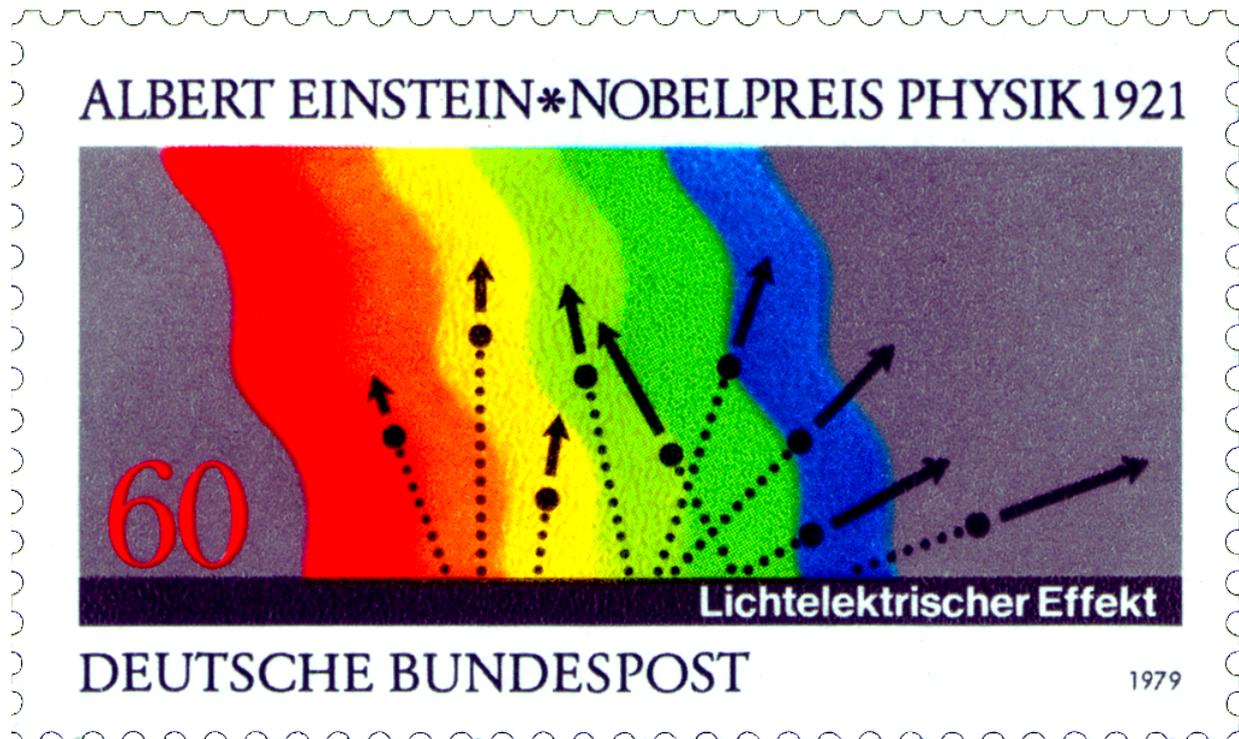


2.5

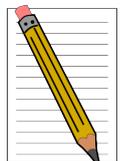


Fotoeffekt

Beim Fotoeffekt werden frei bewegliche Ladungsträger durch die Absorption von Licht erzeugt. Man nutzt den Effekt, um Beleuchtungsstärken elektrisch zu messen. Im Versuch werden Sie mit Fotozelle, Fotowiderstand, Fotodiode und LED experimentieren. Solche Bauteile werden zum Steuern und Regeln z.B. in Fernbedienungen, Lichtschranken, Rauchmelder, Bewegungsdetektoren eingesetzt.

Schriftliche VORbereitung:

- Äußerer Fotoeffekt, innerer Fotoeffekt, Bändermodell, Leitungsband, Valenzband
- Photonen, Planck-Konstante h , Strahlungsmessung, Beleuchtungsstärke E_v
- Optoelektronische Bauteile: Fotozelle, Fotowiderstand, Fotodiode, Leuchtdiode (LED)
- Wie ist die Einheit 1 eV festgelegt?
- Welchen Zusammenhang gibt es zu anderen Energieeinheiten?
- In welchem Frequenzbereich muss das eingestrahlte Licht mindestens liegen, um aus Cäsium Fotoelektronen auszulösen ($W_{kin} = 0$)?
- Welche Wellenlänge hat dieses Licht?



Bilder zu diesem Versuch finden Sie hier: <http://www.iqo.uni-hannover.de/1288.html>

1 Grundlagen

1.1 Fotoeffekt

Die elektrische Stromdichte j in einem Material hängt von der Ladung q , der Geschwindigkeit v und der Raumdichte n der Ladungsträger ab:

$$j = n^+ \cdot q^+ \cdot v^+ + n^- \cdot q^- \cdot v^- \quad (1)$$

Als Fotoeffekt wird die Veränderung der Ladungsträgerdichten n^\pm bei Lichteinfall bezeichnet.

Technisch verwendet werden Materialien mit

- geringen Ladungsträgerdichten n^\pm bei Dunkelheit (Beleuchtungsstärke $E_v > 0$ lx) und
- großen Trägerdichten n^\pm bei merklicher Beleuchtungsstärke $E_v > 0$ lx.

Diese Materialien ergeben eine hohe Fotoempfindlichkeit. Was für Materialien kommen da infrage?

1.2 Äußerer Fotoeffekt

Beim äußeren Fotoeffekt werden bei Lichteinfall aus einer Metalloberfläche Elektronen herausgeschlagen. Ohne Weiteres können die Elektronen die Kathode (Abb. 1) bei Zimmertemperatur nicht verlassen, dazu ist ein Energieübertrag erforderlich, die sog. Ablöse- oder Austrittsarbeit W_A . Sie ist charakteristisch für das Kathodenmaterial:

- Platin: $W_A = 5,36$ eV
- Cäsium $W_A = 1,94$ eV

Photonenbild: Beim Auftreffen wird ein Photon absorbiert und seine Energie $W = h \cdot f$ auf ein Elektron übertragen (h : Planck-Konstante; f : Lichtfrequenz). Nur wenn dieser Energieübertrag größer ist als die Austrittsarbeit W_A , kann der äußere Fotoeffekt stattfinden und ein Elektron verlässt die Oberfläche.

Nach dem Energiesatz hat das Elektron die kinetische Energie (Lichtwellenlänge $\lambda = \frac{c}{f}$)

$$W_{kin} + W_A = h \cdot f \Rightarrow W_{kin} = h \cdot f - W_A = h \cdot \frac{c}{\lambda} - W_A \quad (2)$$

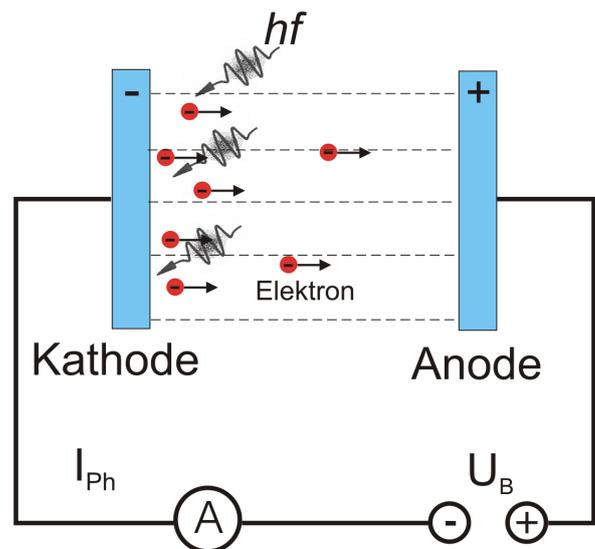


Abbildung 1: Bei Lichteinfall können Elektronen aus der Kathodenoberfläche herausgelöst werden. Sie werden von der Anode angezogen und im äußeren Stromkreis kann man den Fotostrom mit der Stromstärke I_{Ph} messen.

1.3 Innerer Fotoeffekt

Beim inneren Fotoeffekt werden in einem Halbleiter durch Photonenabsorption Valenzelektronen in das Leitungsband angeregt. Bei reinen Halbleitern wie Silizium oder Germanium sind bei Zimmertemperatur die Valenzbänder voll besetzt und das Leitungsband (praktisch) leer. Sie leiten daher den Strom (praktisch) nicht, ihr elektrischer Widerstand ist sehr groß.

Wenn die Energie der absorbierten Photonen $W = h \cdot f$ größer als die der Bandlücke W_{Band} ist, können Elektronen vom Valenzband in das Leitungsband angeregt werden. Dort sind sie beweglich (darum heißt das Leitungsband so); ebenso, da nun das Valenzband nicht mehr voll ist, die Löcher im Valenzband.

Der Halbleiter leitet nun, je mehr Elektronen in das Leitungsband gehoben werden, desto besser leitet er (zumindest bis so viel Elektronen im Leitungsband sind, dass sie sich gegenseitig stören).

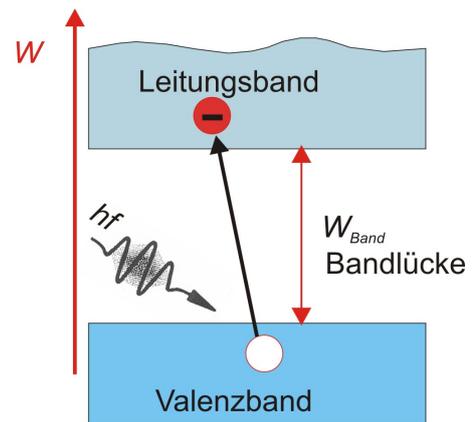


Abbildung 2: Photonen brechen Kristallbindungen auf und heben Elektronen ins Leitungsband

Anwendung: Fotowiderstand (LDR: light dependent resistor)

Ein Fotowiderstand ist solch ein homogener Halbleiter, bei dem der innere Fotoeffekt ausgenutzt wird. Bei Si z. B. beträgt der Bandabstand $W_{\text{Band}} \approx 1,1 \text{ eV}$. Photonen mit der Frequenz $f \approx \frac{W_{\text{Band}}}{h} = 2,4 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ lösen hier den inneren Fotoeffekt aus.

Die entsprechende (Grenz-)Wellenlänge $\lambda = \frac{c}{f} = 1200 \text{ nm}$ liegt im Infraroten. Licht dieser Wellenlänge, aber auch solches mit kürzerer, wird von Si absorbiert; ein Si-Fotowiderstand wird daher leitend.

in Fotowiderstand verhält sich insofern wie ein ohmscher Widerstand, als sein Widerstandswert nicht von der angelegten Spannung abhängig ist, auch nicht von deren Polarität. Die I-U-Kennlinie ist daher näherungsweise eine Gerade. Dagegen ändert der Fotowiderstand seinen Widerstandswert R_{LDR} bei Lichteinfall mit

$$R_{\text{LDR}} \propto E_v^\gamma \text{ mit } 0,5 < \gamma < 1;$$

E_v : Beleuchtungsstärke

und sein Hell/Dunkel-Widerstandsverhältnis kann 6 Zehnerpotenzen betragen (Abb. 4)

Die gebräuchlichen Fotowiderstände sind keine reinen Halbleiter, sondern oft CdS- oder CdSe-Kristalle. Durch Dotierung mit Fremdatomen wird der Bandabstand gezielt verändert und die selektive Empfindlichkeit für Licht verschiedener Wellenlängen erhöht. Im Praktikum wird in Versuch zur Absorption ein Fotowiderstand benutzt, um die Absorption von Licht in Farbstoffen zu messen.

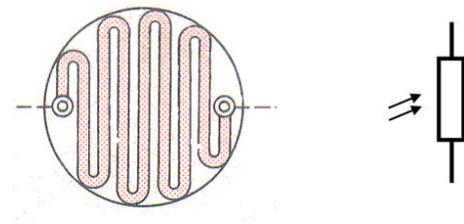


Abbildung 3: So sieht ein Fotowiderstand von oben aus, rechts sein Schaltbild

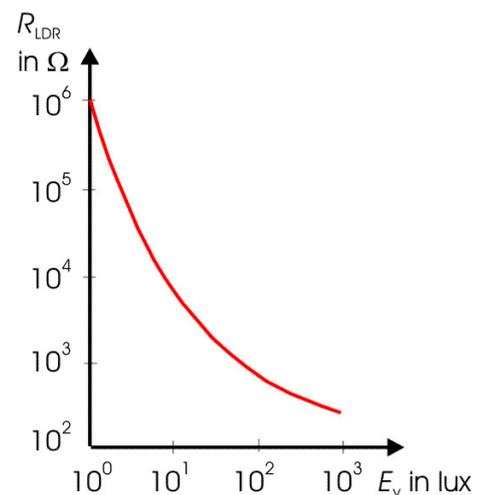


Abbildung 4: Bei Lichteinfall sinkt R_{LDR} von $1 \text{ M}\Omega$ auf 100Ω

Anwendung: Fotodiode

Die Fotodiode besitzt, anders als der Fotowiderstand, einen pn-Übergang (s. Skript zur Halbleiter-Diode). Ohne Beleuchtung verhält sich die Fotodiode wie eine normale Diode. Bei Anlegen einer Spannung U in Durchlassrichtung steigt der Strom exponentiell mit U an, bei Polung in Sperrrichtung ist der Strom sehr klein (Abb. 7: $E_v = 0 \text{ lx}$).

Zur Messung von Beleuchtungsstärken wird die Fotodiode in Sperrrichtung betrieben, der Pluspol liegt am n-Halbleiter. Die von außen angelegte Spannung erzeugt ein elektrisches Feld E , das das vorhandene Diffusionsfeld E_{Diff} noch verstärkt. Es entsteht eine sehr breite Sperrschicht (Raumladungszone).

Ohne Lichteinfall gibt es nur wenige Elektron-Loch-Paare durch thermische Anregung. In Abb. 6 erfahren die Elektronen aus dem Leitungsband des p-Halbleiters im elektrischen Feld der Raumladungszone ein Kraft nach links, die Löcher im Valenzband des n-Halbleiters nach rechts. Im äußeren Kreis misst man nur einen geringen Sperrstrom (Dunkelstrom I_D).

Bei Beleuchtung werden durch die Photonen Elektronenbindungen im Kristall aufgebrochen und zusätzliche Elektron-Loch-Paare erzeugt. Sie werden durch das elektrische Feld im Raumladungsgebiet sofort abgesaugt, und zwar wieder die Löcher zur p-, die Elektronen zur n-Seite hin. Der Strom im äußeren Kreis wird damit wesentlich größer (Fotostrom I_{Ph}).

Bei Lichteinfall setzt sich der Sperrstrom daher aus zwei Anteilen zusammen: $I_{Sperr} = I_D + I_{Ph}$.

Je größer die Beleuchtungsstärke E_v ist, desto mehr Photonen können von der Fotodiode absorbiert werden und umso mehr Elektron-Loch-Paare werden erzeugt. Die Stromstärke des Fotostroms I_{Ph} ist in guter Näherung proportional zur Beleuchtungsstärke E_v :

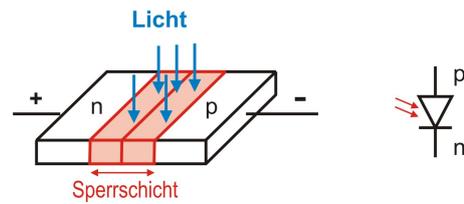


Abbildung 5: Schematischer Aufbau und Schaltzeichen einer Fotodiode

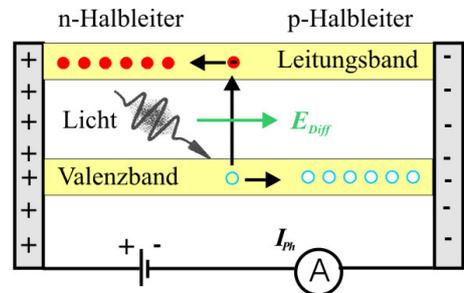


Abbildung 6: Bei Lichteinfall werden Elektron-Loch-Paare erzeugt und die Stromstärke I_{Ph} des Fotostroms wird größer

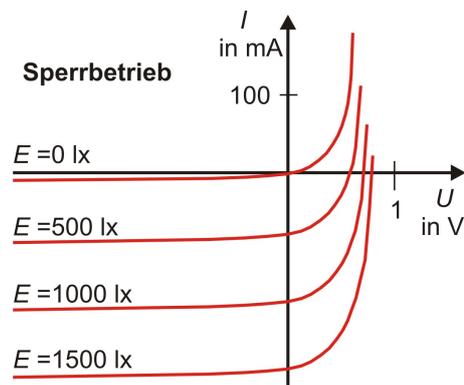


Abbildung 7: Kennlinienfeld einer Fotodiode in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke E_v

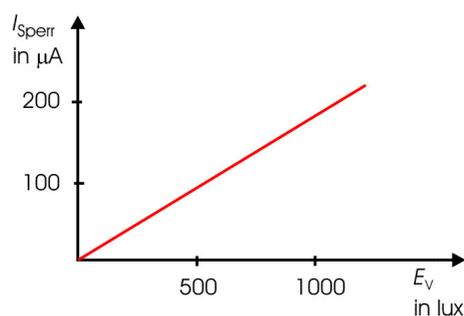


Abbildung 8: Die Stromstärke I_{Sperr} des Sperrstroms ändert sich linearer mit der Beleuchtungsstärke E_v

$I_{PH} = \eta_Q E_v$; η_Q : Quantenausbeute. Und, da I_D sehr klein ist, gilt auch (s. Abb. 8):

$$I_{Sperr} \propto E_v \tag{3}$$

Der Sperrstrom ändert sich mit der Beleuchtungsstärke E_v fast verzögerungslos. Fotodioden eignen sich deshalb gut zur Messung kurzer Lichtimpulse. Fotowiderstände sind wesentlich langsamer.

Anwendung: Leuchtdiode (LED)

In ihnen findet der umkehrte Fotoeffekt statt. Sie sind ebenfalls pn-Halbleiter, die aber in Durchlassrichtung betrieben werden, der Minuspol liegt hier am n-Halbleiter (s. Abb. 10).

Bei fehlender äußerer Spannung (Abb. 9) erzeugen die ortsfesten Raumladungen in der Sperrschicht ein elektrisches Feld E_{Diff} . Es verhindert, dass Elektronen aus dem n-Bereich und Löcher aus dem p-Bereich in den jeweils anderen Bereich gelangen können.

Die von außen angelegte Spannung U in Abb. 10 baut ein elektrisches Gegenfeld E_{Gegen} auf. In Ihm erfahren Elektronen eine Kraft nach rechts und die Sperrschicht wird schmaler. Wenn diese beiden gegengerichteten Felder etwa gleich groß sind, also bei einer äußere Spannung $U \geq U_{Diff}$, gelangen frei bewegliche Elektronen über die Raumladungszone in das p-Gebiet. Im äußeren Kreis kann man dann einen Durchlassstrom der Stärke I messen.

Wenn Energiesatz und Impulssatz es zulassen, „fallen“ die Elektronen dabei energetisch gesehen aus dem Leitungsband herunter in das Valenzband. Die bei diesem Vorgang freiwerdende Energie wird als Strahlung emittiert. Relevant dabei ist der Abstand der Bandkanten, da innerhalb der Bänder die Ladungsträger thermisch, also strahlungsfrei, zum Bandminimum relaxieren:

$$h \cdot f \approx W_L - W_V = W_{Band}. \tag{4}$$

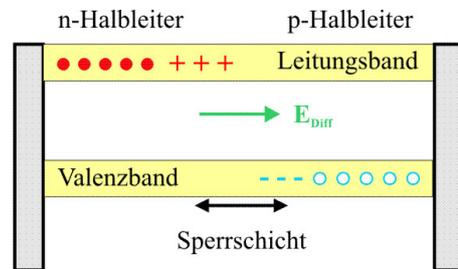


Abbildung 9: Im elektrischen Feld E_{Diff} erfahren positive Ladungen eine Kraft nach rechts, negative nach links. Der pn-Übergang ist stromlos.

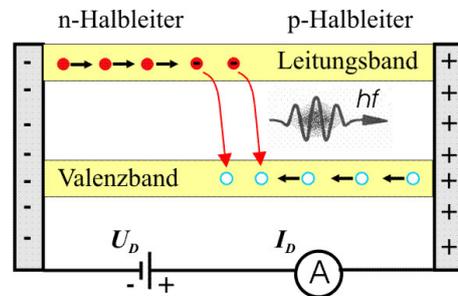


Abbildung 10: Die Elektronen rekombinieren mit den Löchern im Valenzband. Dabei werden Photonen emittiert.

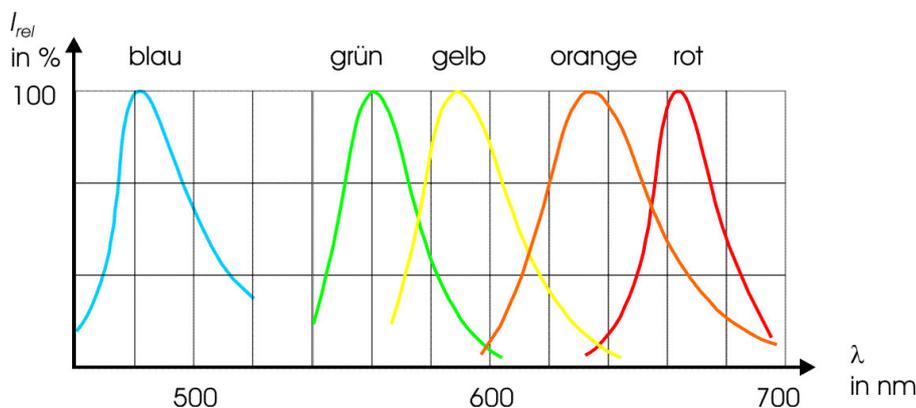


Abbildung 11: Die Lichtstärke der Leuchtdioden ändert sich linear mit dem Durchlassstrom. Um eine Zerstörung der LED zu verhindern (LED sind Heißleiter!) muss dieser durch einen Vorwiderstand auf 20-60 mA begrenzt werden.

Die Lichtstärke der Leuchtdioden ändert sich linear mit dem Durchlassstrom. Um eine Zerstörung der LED zu verhindern (LED sind Halbleiter!) muss dieser durch einen Vorwiderstand auf 20-60 mA begrenzt werden.

2 A-Teil: Experimente mit der Vakuumfotозelle

2.1 Aufnahme der Strom-Spannungskennlinie bei konstanter Beleuchtungsstärke

Wählen Sie den Abstand Lampe-Fotозelle so, dass bei der maximalen Spannung U_a die Stromstärke I_{Ph} des Photostroms etwa $50 \mu\text{A}$ beträgt.

Messung:

(M1) Messen Sie für 10 Werte U_a die Stromstärke I_{PH} .

Auswertung:

(A1) Graphische Darstellung $I_{PH} = I_{PH}(U_a)$.

(A2) Erklären Sie den Verlauf der Kennlinie.

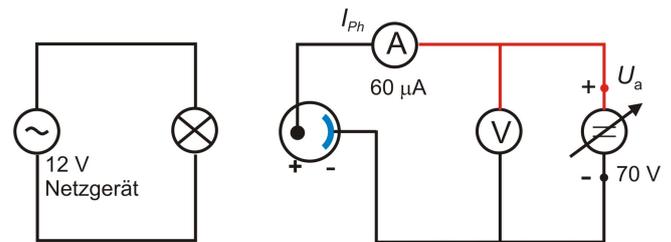


Abbildung 12: Halogenlampe (links) und Fotозelle Nr.1 (rechts)

2.2 Hängt die Stromstärke I_{Ph} der herausgeschlagenen Fotoelektronen von der Beleuchtungsstärke E_v ab?

Verändern Sie die Beleuchtungsstärke, indem Sie den Abstand Lampe-Fotозelle vergrößern (bei fester Spannung $U_a = 50 \text{ V}$). Beobachten Sie dabei, wie sich die Stromstärke I_{Ph} ändert. Keine Messung.

(A3) Beschreiben Sie die Abhängigkeit der Stromstärke I_{Ph} von der Beleuchtungsstärke E_v .

2.3 Hängt die Energie der herausgeschlagenen Fotoelektronen von der Beleuchtungsstärke E_v ab?

Man kann vermuten, dass auch die Energie der Fotoelektronen mit der Beleuchtungsstärke E_v zunimmt. Wie können Sie das messen?

In den vorherigen Versuchen haben Sie die Fotoelektronen mit der Spannung U_a abgesaugt, die Anode war dazu mit dem Pluspol verbunden. In der Schaltung Abb. 13 liegt an der Fotozelle eine Gegenspannung, die Anode ist jetzt mit dem Minuspol verbunden. Über einen Verstärker misst man die Spannung U_{Gegen} , die notwendig ist, damit kein Fotoelektron die Anode mehr erreicht. Die Energie $e \cdot U_{Gegen}$ dieses Gegenfeldes ist dann genau so groß wie die kinetische Energie W_{kin} der Elektronen; alle herausgeschlagenen Elektronen werden zurückgedrängt, die Stromstärke des Fotozellenstroms ist Null.

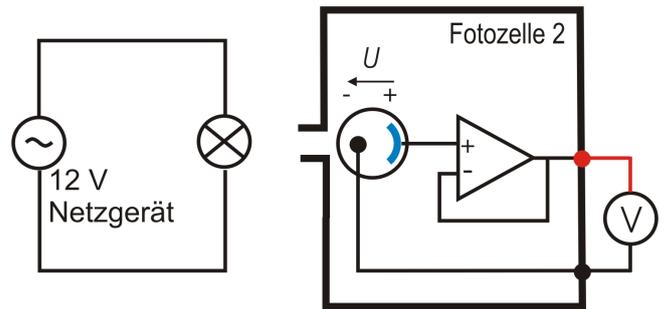


Abbildung 13: Im Gehäuse der Fotozelle Nr.2 (schwarz) sind Schaltung und Verstärker integriert. Sie müssen nur noch das Digitalvoltmeter anschließen

Hinweise zum Experimentieren

Bei geringer Entfernung bitte nur kurzzeitig beleuchten und messen. Die Kathode oxydiert sonst sehr schnell und wird unbrauchbar.

Messung:

(M2) Benutzen Sie die Fotozelle Nr. 2. Verringern Sie die Intensität des einfallenden Lichtes wieder durch Abstandsänderung und beobachten Sie die Spannung U_{Gegen} am Voltmeter. **Beachten Sie den Hinweis!**

(A4) Ergebnis:

Unsere Vermutung ist

Die Gegenspannung bleibt ... , die Energie der herausgeschlagenen Fotoelektronen hängt nicht ab von

2.4 Die Energie der Photonen bestimmt die Energie der Fotoelektronen

Im Unterkapitel 1.2 war angegeben, dass sich die Energie der herausgeschlagenen Fotoelektronen aus

$$W_{kin} = hf - W_A \quad (5)$$

ergibt und damit von der Photoenergie $b \cdot f$ abhängt. Um das zu untersuchen, beleuchten Sie die Fotozelle Nr. 2 diesmal mit Leuchtdioden verschiedener Wellenlängen.

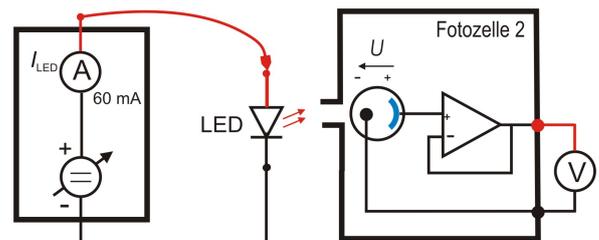


Abbildung 14: Im Praktikum stehen 6 Leuchtdioden zur Verfügung

Messung:

(M3) Benutzen Sie hier bitte nur die letzten 4 angegebenen Leuchtdioden (orange-blau) und messen Sie die Gegenspannung U_{Gegen} mit der Schaltung nach Abb. 14. Die LEDs werden dazu direkt in die Blende der Fotozelle gesteckt. Überprüfen Sie mithilfe des USB-Spektrometers die Mittelwellenlänge λ_0 der LED.

Farbe	IR	rot	orange	gelb	grün	blau
Wellenlänge λ_0 in nm	950 ± 20	665 ± 20	635 ± 15	590 ± 15	560 ± 15	480 ± 40
Gemessen λ_0 in nm						
Frequenz f_0 in 10^{14} Hz		4,51	4,72	5,08	5,35	6,25

Auswertung:

(A5) Legen Sie eine Ausgleichsgerade durch Ihre Messpunkte $U_{Gegen} = U_{Gegen}(f)$ (Fehlerbalken nicht vergessen!) und bestimmen Sie nach Gl. 2 aus der Steigung das Plancksche Wirkungsquantum h und aus dem Achsenabschnitt die Austrittsarbeit W_A . Bewerten Sie die Qualität Ihrer Messung. Können Sie die „Nobelpreisgleichung“ Gl. 2 bestätigen?

A. EINSTEIN hat diese Interpretation des Fotoeffekts in seiner später mit dem Nobelpreis prämierten Arbeit „Ueber einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt“ (Annalen der Physik. 322, Nr. 6, 1905, S. 132–148) vorhergesagt.

3 B-Teil: Fotowiderstand und Fotodiode**3.1 Experimente mit dem Fotowiderstand**

Der Fotowiderstand (LDR) wird mit einer Infrarotleuchtdiode (IRED) bestrahlt. Für eine IRED gilt über einen weiten Bereich, dass ihre Leuchtstärke proportional zur Durchlassstromstärke I_{IRED} ist. Bei unveränderter Entfernung und Richtung der LDR-Empfängerfläche ist dann auch deren Beleuchtungsstärke

$$E_V \propto I_{IRED}$$

Ein Fotowiderstand ändert seinen Widerstands-wert R_{LDR} bei Lichteinfall mit $R_{LDR} \propto E_V^{-\gamma}$. Da wir E_V nicht so einfach messen können, testen wir hier, ob nicht ggf. die Stärke des Durchlassstroms I_{IRED} ein direkt proportionales Maß für die Beleuchtungsstärke hergibt:

$$R_{LDR} \propto I_{IRED}^{-\gamma} \quad (6)$$

Messung:

(M4) Schaltung nach Abb. 15. Für die angegebenen Werte wird mit I_{IRED} die Beleuchtungsstärke des Fotowiderstandes verändert und der Strom I_{LDR} durch den Fotowiderstand gemessen.

Auswertung:

(A6) Tragen Sie R_{LDR} als Funktion der Stromstärke I_{IRED} (Strom durch die IRED) auf (mm-Papier oder Plotprogramm); $R_{LDR} = U_{LDR}/I_{LDR}$

(A7) Tragen Sie $R_{LDR} = R_{LDR}(I_{IRED})$ auf doppelt logarithmischem Papier oder mit logarithmisch skalierten Achsen im Plotprogramm auf und legen Sie durch Ihre Messwerte eine Ausgleichsgerade. Bestimmen Sie aus der Steigung den Wert von γ

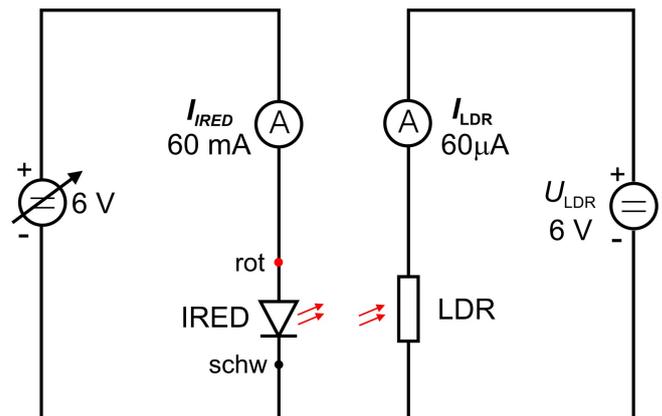


Abbildung 15: Die Spannung U_0 wird näherungsweise durch lineare Extrapolation des gerade verlaufenden Teils der U-I-Kennlinien als Schnittpunkt mit der U-Achse bestimmt.

Hinweise zum Experiment:

- $U_{LDR} = 6V$
- $I_{IRED} \approx 50 \text{ mA}$ einstellen und den Abstand IRED - LDR so wählen, dass der Fotostrom $I_{LDR} \approx 50 \mu\text{A}$ beträgt.
- Danach für $0 < I_{IRED} < 60 \text{ mA}$ insgesamt 10 Messpunkte I_{LDR} aufnehmen.

3.2 Experimente mit der Fotodiode

Fotodioden werden oft benutzt, um die Beleuchtungsstärke zu messen; vor allem dann, wenn diese sich schnell ändert (Lichtschranken).

Messung:

(M5) Schaltung nach Abb. 16. Für die dort angegebenen Werte wird wieder die Beleuchtungsstärke mit I_{RED} verändert, und die Sperrstromstärke I_{FD} und die Spannung U_{Sperr} der Fotodiode gemessen.

Auswertung:

- (A8) Graphische Darstellung $I_{FD} = I_{FD}(U_{Sperr})$ für die erste Messreihe.
- (A9) Graphische Darstellung $I_{FD} = I_{FD}(I_{RED})$ für die zweite Messreihe.
- (A10) Interpretieren Sie Ihre Kennlinien.

Literatur

- [1] Scholz, R.(2014): *Analyse und Präsentation von Messdaten* Leibniz Universität Hannover, <http://www.iqo.uni-hannover.de/>

Hinweise zum Experiment:

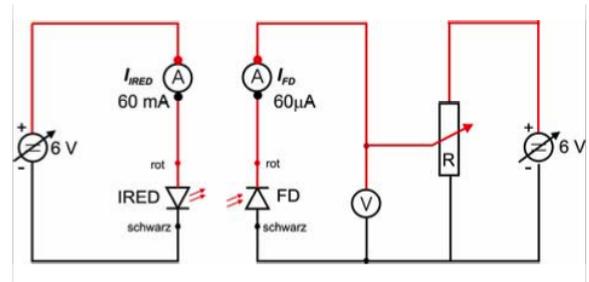


Abbildung 16: Die Spannung U_0 wird näherungsweise durch lineare Extrapolation des gerade verlaufenden Teils der U-I-Kennlinien als Schnittpunkt mit der U-Achse bestimmt.

- $I_{RED} = 60 \text{ mA}$ konstant; messen Sie für die Spannungen $U_{Sperr} = 1 \text{ V}, 3 \text{ V}, 4 \text{ V}, 5 \text{ V}$ die Stromstärke I_{FD}
- $U_{Sperr} = 4 \text{ V}$ konstant; messen Sie für $I_{RED} = 5 \text{ mA}, 10 \text{ mA}, 20 \text{ mA}, 40 \text{ mA}, 50 \text{ mA}$ die Stromstärke I_{FD} .

[fileadmin/institut/pdf/AP/Material/Crash_Messunsicherheit.pdf](http://www.iqo.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/AP/Material/Crash_Messunsicherheit.pdf)

- [2] Scholz, R.(2011): *Crashkurs - Pendel* Leibniz Universität Hannover, http://www.iqo.uni-hannover.de/fileadmin/institut/pdf/AP/Material/Crash_Pendel.pdf