

4.2 Versuch mit Vakuumphotozelle zur quantitativen Bestätigung der Einstein'schen Deutung des Photoeffekts:

Der prinzipielle Aufbau einer Vakuumphotozelle und des entsprechenden quantitativen Versuchs zum Photoeffekt kann der folgenden Abbildung 4 entnommen werden. Da von den verschiedenen Lehrmittelherstellern zahlreiche unterschiedliche Versuchsaufbauten angeboten werden, welche teilweise aus einzelnen Komponenten aufgebaut werden müssen, zum Teil aber auch als fertige Kompaktanordnungen existieren, werden hier nur (exemplarisch) die Betriebsanweisungen einiger verschiedener Anordnungen aufgeführt.

Im Allgemeinen sind gute Ergebnisse mit den vorjustierten Kompaktanordnungen wesentlich einfacher und ohne großen Zeitaufwand zu erzielen, da sie die Anordnungen zur Erzeugung verschiedener monochromatischer Lichtbündel meist schon fest verbaut haben (teilweise mit Interferenzfiltern, teilweise in Form mehrerer austauschbarer LEDs unterschiedlicher Farbe). Zudem sind die Vakuumphotozellen meist so verbaut, dass sie nicht dem Umgebungslicht ausgesetzt, sondern dagegen vollkommen abgeschirmt sind. Eine Verfälschung der Messungen durch Streulicht ist daher nahezu ausgeschlossen. Daher ist die empfindliche Photokathode auch (z. B. gegen das intensive und zerstörerische Sonnenlicht) gut geschützt. Die Kompaktanordnungen gewährleisten auch, dass die Ringelektrode nicht ebenfalls vom Lichtbündel getroffen wird, was bei älteren Photozellen, bei denen sich schon Kathodenmaterial auf der Ringelektrode niedergeschlagen hat, zu einem „gegenläufigen“ Photoeffekt und damit zu ungenauen Ergebnissen führt. Andererseits sind die Photozellen bei den Anordnungen, die aus Einzelteilen aufgebaut werden müssen, vollkommen zugänglich und somit gut zur Förderung der Anschauung geeignet. Auch eine spektrale Zerlegung der Lichts der Hg-Lampe ist zwar experimentell aufwändig, im Sinne einer Förderung bzw. Festigung entsprechender Kompetenzen aber wünschenswert.

Ein weiterer Unterschied zwischen den verschiedenen Versuchsanordnungen besteht bei der Bestimmung der kinetischen Energie der schnellsten Photoelektronen. Entweder wird eine externe Gegenspannung angelegt und gemessen (siehe Abbildung 4) oder die Gegenspannung zwischen Kathode und Ringelektrode entsteht, wie in Abbildung 5 gezeigt, durch die Aufladung eines Kondensators, der zwischen Kathode und Anode geschaltet wird. Bei dieser Versuchsvariante wird der Kondensator vom Photostrom geladen, bis die (Gegen-) Spannung schließlich so groß ist, dass selbst die schnellsten Photoelektronen die Ringelektrode (Anode) nicht mehr erreichen können. Anschließend muss die Kondensatorspannung nur noch gemessen werden, was wegen der sehr kleinen Photostromstärke allerdings ein sehr hochohmiges Voltmeter (ca. 10^{12} Ohm) erfordert. Auch hier kann ein Elektrometermessverstärker als preisgünstige Lösung gewählt werden (siehe Abbildung 5).

Die Recherchen der Schülerinnen und Schüler zur Lichtquantenhypothese Einsteins sowie zu seiner Deutung des Photoeffekts werden im Wesentlichen zu den folgenden Aussagen führen:

1. **Licht besteht aus einem Strom von Lichtquanten, den sogenannten Photonen.**

2. **Jedes Lichtquant transportiert die Energie $E = h \cdot f$. Dabei ist f die**

Frequenz des Lichtes und $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ das Planck'sche Wirkungsquantum.

3. **Treffen Lichtquanten auf Metall, so können nicht reflektierte Quanten auf Elektronen im Metall treffen und ihre Energie vollständig auf das Elektron übertragen und somit selbst „verschwinden“.**

4. **Ein Teil der Elektronen, die die Energie eines Lichtquants übernommen haben, kann aus der Metalloberfläche austreten. Dabei verliert das Elektron**

einen Teil seiner Energie, die sogenannte Austrittsarbeit W_A . Die restliche Energie behält das Elektron in Form kinetischer Energie. Für diese gilt:

$$W_{\text{kin}} \leq h \cdot f - W_A$$

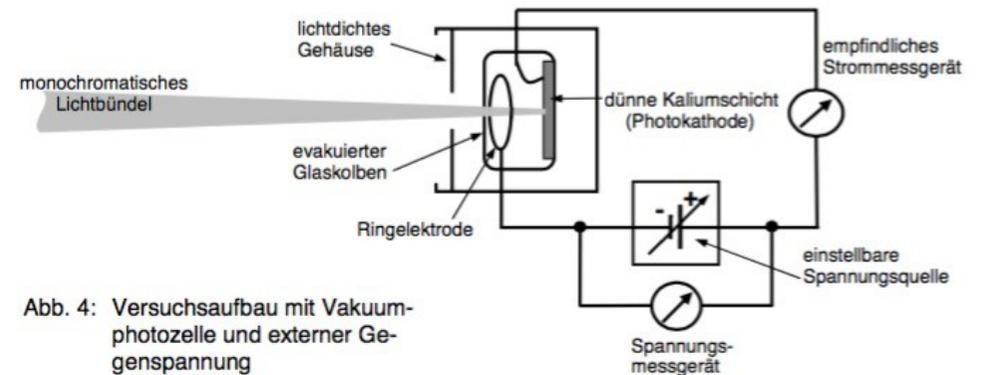


Abb. 4: Versuchsaufbau mit Vakuumphotozelle und externer Gegenspannung

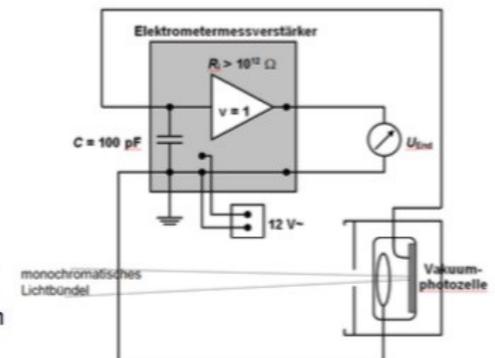


Abb. 5: Aufbau mit zwischen Kathode und Anode liegendem Kondensator (zum Aufbau der Gegenspannung) sowie hochohmigem Elektrometermessverstärker

aus:

<https://www.schulentwicklung.nrw.de/materialdatenbank/nutzersicht/getFile.php?id=8319>

Quantitativer Versuch mit der Vakuumphotozelle - Deutung des Photoeffekts (Teil III)

Eine quantitativ-mathematische Beschreibung der bisher erläuterten Zusammenhänge ist im Jahre 1905 Albert Einstein gelungen:

1. Licht der **Wellenlänge** λ besteht aus einem Strom von vielen (einzelnen) Lichtquanten, den sogenannten Photonen.
2. Jedes einzelne Lichtquant besitzt / transportiert die Energie $E = h \cdot f$. Dabei ist f die Frequenz des Lichtes mit der Wellenlänge λ (es gilt: $\lambda \cdot f = c$) und $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ist eine Naturkonstante, das sogenannte Planck'sche Wirkungsquantum.
3. Treffen Lichtquanten auf Metall, so werden die meisten von ihnen reflektiert, einige der auftreffenden Quanten werden aber nicht reflektiert. Diese nicht reflektierten Quanten treffen z.B. auf Elektronen im Metall. Trifft ein Lichtquant auf ein Elektron, so wird die Energie des Lichtquants **vollständig** auf das Elektron übertragen, das Lichtquant ist damit nicht mehr existent, es bestand ja aus Energie, die aber vollständig auf das Elektron übertragen wurde.
4. Ein (kleiner) Teil derjenigen Elektronen, die die Energie eines Lichtquants übernommen haben, kann bei „günstiger“ Bewegungsrichtung aus der Metalloberfläche austreten und das Metall (-Gitter) verlassen. Bei diesem Austritt verliert das Elektron aber einen Teil seiner Energie, nämlich die zum Austreten erforderliche Austrittsarbeit W_A . Die restliche Energie behält das Elektron auch nach dem Austritt in Form kinetischer Energie. Für diese kinetische Energie gilt somit: $W_{\text{kin}} = h \cdot f - W_A$, allerdings nur dann, wenn das Elektron im Metall nicht bereits vor dem Austritt schon einen Teil der vom Lichtquant übernommenen Energie durch „irgendwelche Zusammenstöße“ verloren hat. Allgemein gilt: $W_{\text{kin}} \leq h \cdot f - W_A$.

Aufgaben:

1. Berechnen Sie die (maximal mögliche) kinetische Energie und die (maximal mögliche) Geschwindigkeit der ausgelösten Elektronen, wenn die Kaliumschicht einer Vakuumphotozelle von blauem Licht mit der Wellenlänge $\lambda = 436 \text{ nm}$ getroffen wird.
Hinweise: Für Kalium beträgt die Austrittsarbeit $W_A \approx 3,6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$.
Die Masse eines Elektrons beträgt $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$.
2. Zeigen Sie, dass rotes Licht mit einer Wellenlänge von $\lambda = 680 \text{ nm}$ **keine** Elektronen aus der Kaliumschicht einer Vakuumphotozelle auslösen kann.
3. Beschreiben Sie die Durchführung des vorgestellten und nachfolgend skizzierten Versuchs zum Photoeffekt (mit Vakuumphotozelle), und geben Sie die Versuchsbeobachtungen auf dem folgenden Arbeitsblatt an.
4. Beschreiben Sie, wie sich der gemessene Photostrom mit der Vergrößerung der „Gegenspannung“ verändert, und begründen Sie diesen Zusammenhang anschaulich / qualitativ.
5. Berechnen Sie jeweils die Frequenz f des verwendeten Lichts sowie die kinetische Energie der schnellsten Photoelektronen (Vorsicht, W_A für Cäsium ist noch **nicht** bekannt!), und tragen Sie die berechneten Werte in ein Frequenz - Energie - Diagramm ein.
Hinweis: Die gemessene Gegenspannung U_g ist ein Maß für die (maximale) kinetische Energie der Photoelektronen, wenn sie mit der Ladung e des Elektrons multipliziert wird. Es gilt also $W_{\text{kin(max)}} = e \cdot U_g$ (mit $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ A} \cdot \text{s}$). **Dies ist noch zu zeigen!!!**
6. Bestimmen Sie aus dem Diagramm (der Aufgabe 5) das Planck'sche Wirkungsquantum h und die (noch unbekannt) Austrittsarbeit W_A für Cäsium.

Aufbau, Durchführung und Auswertung des Versuchs zum quantitativen Photoeffekt, Bestimmung des Planck'schen Wirkungsquantums h und der Austrittsarbeit W_A

Aufbau:

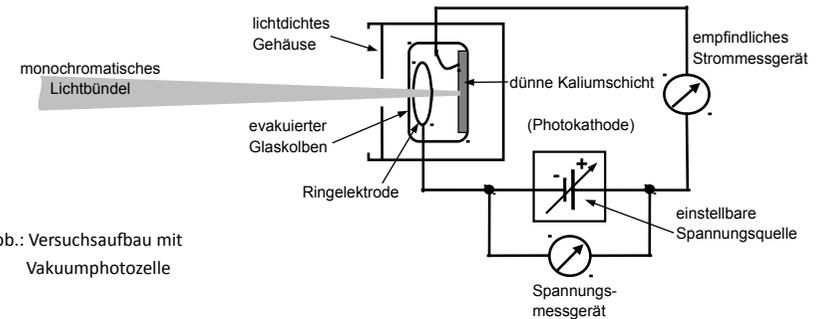


Abb.: Versuchsaufbau mit Vakuumphotozelle

Durchführung und Beobachtung:

Die Photozelle wird **nacheinander mit den verschiedenen monochromatischen Anteilen** des Lichtes der verwendeten Lampe bestrahlt. Die Gegenspannung wird jeweils (also für jede Lichtfarbe) zunächst auf $U_g = 0 \text{ V}$ eingestellt. Das empfindliche Strommessgerät zeigt jeweils einen Photostrom an.

Dann wird die Gegenspannung U_g

Farbe	λ in nm	f in s^{-1}	Intensität relativ	U_g in Volt	$W_{\text{kin(max)}} = e \cdot U_g$ in J

Der jeweilige Endwert der Gegenspannung U_g ist, wie der Versuch zeigt, abhängig von

.....
