

Versuchsprotokoll zum Versuch Nr. 500

Der Photoeffekt

Johannes Kollek	Jean-Marco Alameddine
johannes.kollek@udo.edu	jean-marco.alameddine@udo.edu

Durchführung: 14.06.2016

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Theorie	3
1.1	Motivation	3
1.2	Erklärung des Photoeffektes	3
2	Fehlerrechnung	4
3	Aufbau und Durchführung	5
3.1	Aufbau	5
3.1.1	Optischer Aufbau	5
3.1.2	Bestimmung der Photonenenergie mithilfe der Gegenfeldmethode	5
3.2	Durchführung	6
3.2.1	Verifizierung des theoretischen Zusammenhanges und Bestimmung der Kenngrößen	6
3.2.2	Untersuchung des Photostromes in Abhängigkeit von der Spannung	6
4	Auswertung	7
4.1	Bestimmung von $\frac{h}{e_0}$ und der Austrittsarbeit.	7
4.2	Betrachtung des Photostroms in Abhängigkeit der Spannung	11
5	Diskussion	12
	Literatur	13

1 Theorie

1.1 Motivation

Wird eine Metalloberfläche mit Licht bestrahlt, ist es möglich Elektronen aus dem Metall zu lösen. Dieser Effekt, welcher neben Compton-Effekt und Paarbildung eine quantenmechanische Sichtweise auf Licht fordert, wird als Photoeffekt bezeichnet. Eine qualitative Erklärung des Photoeffektes lieferte Einstein im Jahre 1905, wofür er jedoch erst 1921 den Nobelpreis für Physik erhielt.

1.2 Erklärung des Photoeffektes

Zur Untersuchung des Photoeffektes wird in einem einfachen Fall eine Photozelle benutzt, wie sie in Abbildung 1 in einem einfachen Stromkreis dargestellt ist.

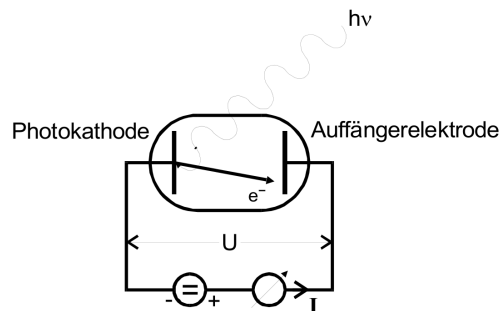


Abbildung 1: Photozelle in einem Stromkreis. [2]

Die Photonen treffen auf die Photokathode in welcher sie Elektronen loslösen, die wiederum von der Photoanode aufgefangen werden wodurch ein messbarer Strom erzeugt wird. Empirisch ergeben sich somit drei Zusammenhänge.

Zunächst, dass Stromstärke, somit die Anzahl der aufgefangenen Elektronen proportional zur Intensität der verwendeten Strahlung ist. Zweitens ist die kinetische Energie der Elektronen proportional zur Lichtfrequenz und steht in keiner Beziehung zur Lichtintensität. Zuletzt, dass erst Licht ab einer gewissen Frequenz nötig ist, um den Photoeffekt zu beobachten.

Dabei ist zu erwähnen, dass sich diese Phänomene nicht mit dem üblichen Wellenmodell des Lichtes erklären lassen. Wird davon ausgegangen, dass die Elektronen von den Lichtwellen zu Schwingungen angeregt werden, müsste der Photoeffekt nach einer gewissen Zeit auch bei Licht geringer Frequenz beobachtet werden. Geschweige dessen, dass Resonanzeffekte zu bevorzugten Situationen führen würde, unter denen der Photoeffekt auftritt.

Einstein folgerte, dass jene Lichtteilchen gleich den Planckschen Energiequanten sind. Im Bezug auf den Photoeffekt ergibt sich im Voraus die Erkenntnis, dass monochromatisches Licht der Frequenz ν aus Photonen der Energie

$$E_{\text{ph}} = h\nu \quad (1)$$

besteht, wobei h das Plancksche Wirkungsquantum ist. Trifft nun dieses Lichtteilchen auf ein Elektron im Material, so gibt es seine Energie ab. Die gewonnene Energie teilt sich in einen Teil A , den das Elektron braucht, um sich vom Material zu lösen, und einen kinetischen Teil auf,

$$h\nu = A + E_{\text{kin}}. \quad (2)$$

Bei dem Wechselwirkungsprozess verschwindet das Photon, da es seine ganze Energie an das Elektron abgibt. Die Gleichung sagt außerdem aus, dass der Photoeffekt nur beobachtbar ist, wenn die Energie des Photons mindestens die Austrittsarbeit tilgen kann.

2 Fehlerrechnung

Im folgenden Kapitel werden die wichtigsten Formeln der Fehlerrechnung aufgelistet, welche für die folgende Versuchsauswertung benötigt werden. Der Mittelwert berechnet sich zu

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (3)$$

Der Fehler des Mittelwertes berechnet sich zu

$$\Delta\bar{x} = \sqrt{\frac{1}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} . \quad (4)$$

Die Schätzung der Standardabweichung berechnet sich zu

$$\Delta x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} . \quad (5)$$

Für die Fehlerrechnung wird bei allen folgenden Rechnungen das Gaußsche Fehlerfortpflanzungsgesetz

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \Delta x_1\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \Delta x_2\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x_n} \Delta x_n\right)^2} \quad (6)$$

für eine Funktion $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, bei der die Größen x_1, x_2, \dots, x_n voneinander unabhängig sind, verwendet.

Bei der linearen Regressionsrechnung gilt mit den Parametern m und b und der Ausgleichsgerade $y = mx + b$ der Zusammenhang:

$$m = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{\overline{x^2} - \bar{x}^2} \quad b = \bar{y} - m\bar{x} . \quad (7)$$

Dabei sind x_i und y_i linear abhängige Messgrößen. Der Fehler dieser Parameter errechnet sich zudem zu

$$\sigma_m^2 = \frac{\sigma^2}{n(\overline{x^2} - \bar{x}^2)} \quad \sigma_b^2 = \frac{\sigma^2 \bar{x}^2}{n(\overline{x^2} - \bar{x}^2)} \quad (8)$$

3 Aufbau und Durchführung

3.1 Aufbau

3.1.1 Optischer Aufbau

Der gesamte Versuchsaufbau ist in Abbildung 2 dargestellt.

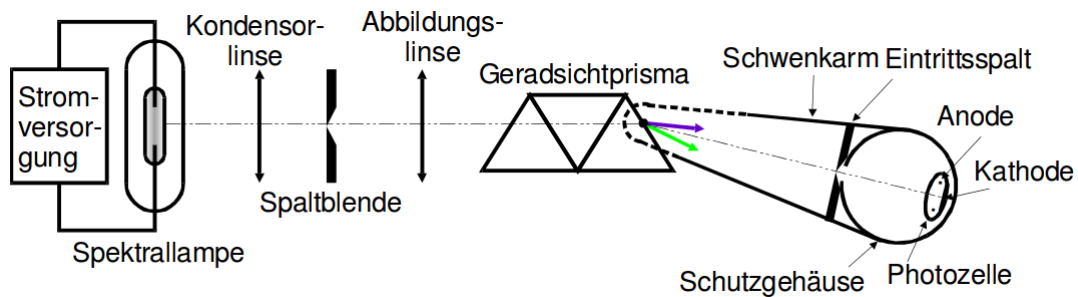


Abbildung 2: Gesamte Übersicht über den verwendeten Versuchsaufbau. [2]

Die Spektrallampe emittiert Licht mit diskreten Wellenlängen. Dieses wird unter Verwendung einer Kondensorlinse, einer Spaltblende sowie einer Abbildungslinse auf ein Prisma fokussiert und abgebildet. Dieses Prisma bricht das Licht, so dass dieses auf Grund der optischen Dispersion für jede Wellenlänge unterschiedlich stark gebrochen wird. Der Öffnungsspalt der Photozelle wird nun so ausgerichtet, dass das Licht der zu messenden Wellenlänge auf die Kathode einfällt.

3.1.2 Bestimmung der Photonenenergie mithilfe der Gegenfeldmethode

Um eine quantitative Aussage über die kinetische Energie der Elektronen, welche aus der Photokathode gelöst werden, treffen zu können, wird der in Abbildung 3 dargestellte Aufbau verwendet.

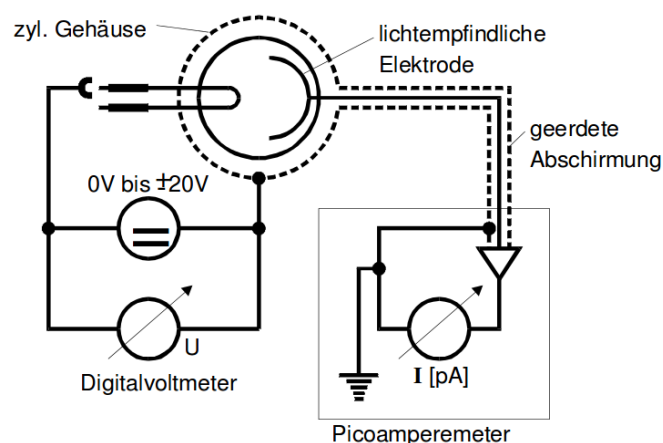


Abbildung 3: Aufbau der Photozelle zur Verwendung der Gegenfeldmethode. [2]

Zwischen der Photokathode und einer Anode kann eine Spannung U angelegt werden, die je nach Polung als Bremsspannung oder Beschleunigungsspannung für die Elektronen dienen kann.

Verfügen die Elektronen über eine ausreichende kinetische Energie um die Gegenspannung überwinden zu können, erreichen diese die Anode. Solange dies erfüllt ist, kann mithilfe eines Picoamperemeters ein geringer Strom zwischen Kathode und Anode gemessen werden.

3.2 Durchführung

3.2.1 Verifizierung des theoretischen Zusammenhanges und Bestimmung der Kenngrößen

Um den theoretisch erwarteten linearen Zusammenhang des Photoeffekts bestätigen zu können, wird die kinetische Energie der Elektronen in Abhängigkeit von der Wellenlänge untersucht. Dazu wird für fünf verschiedene Wellenlängen die Grenzspannung U_g ermittelt.

Bei dessen Bestimmung mit der Gegenfeldmethode ist zu beachten, dass das Erreichen von U_g nicht durch einen eindeutigen Abfall des Stroms zwischen Kathode und Anode gekennzeichnet ist. Dies liegt daran, dass die herausgelösten Elektronen keine einheitliche kinetische Energie besitzen, sondern nach der Fermi-Dirac-Statistik eine kontinuierliche Energieverteilung. Deshalb wird zur Bestimmung von U_g bei jeder Wellenlänge der Photostrom in Abhängigkeit von der angelegten Spannung für zehn Werte gemessen. Diese orientieren sich jeweils in der Nähe des niedrigsten messbaren Stromes.

3.2.2 Untersuchung des Photostromes in Abhängigkeit von der Spannung

Für eine Wellenlänge wird der Photostrom in Abhängigkeit von der Spannung betrachtet. Dabei werden Spannungen sowohl im positiven als auch im negativen Bereich untersucht, so dass es auch zu einer Umpolung des Stroms kommt.

4 Auswertung

4.1 Bestimmung von $\frac{h}{e_0}$ und der Austrittsarbeit.

Um die Grenzspannungen zu bestimmen, wird für fünf Spektrallinien die Stromstärke in Abhängigkeit von der Gegenspannung gemessen. Da das Verhältnis im Bereich der Grenzspannung als quadratisch angenommen werden kann, wird die Wurzel der Stromstärke jeweils gegen die Gegenspannung aufgetragen. Mit diesen Werten wird jeweils ein linearer Fit mit SciPy in Python erstellt. Die sich ergebenden Fitparameter für die zugehörigen Wellenlängen λ [2] sind in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1: Parameter der linearen Fits.

λ / nm	m / V s	b / V
546,07	$-0839 \pm 0,030$	$0,384 \pm 0,010$
491,60	$-0148 \pm 0,012$	$0,0971 \pm 0,0031$
435,83	$-0517 \pm 0,018$	$0,532 \pm 0,015$
404,66	$-0155 \pm 0,014$	$0,227 \pm 0,013$
576,96	$-0477 \pm 0,016$	$0,2236 \pm 0,0047$

,

Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 4, 5, 6, 7 und 8 zu sehen. Aus den Schnittpunkten mit der Spannungsachse ergeben sich somit die Grenzspannungen, diese sind in Tabelle 2 eingetragen.

Tabelle 2: Schnittpunkte mit der Spannungsachse.

λ / nm	U_g / V
546,07	$0,457 \pm 0,004$
491,60	$0,66 \pm 0,05$
435,83	$1,028 \pm 0,007$
404,66	$1,46 \pm 0,06$
576,96	$0,469 \pm 0,007$

,

Die Werte der Grenzspannungen werden nun gegen die jeweilige Frequenz aufgetragen, wobei eine Ausgleichsgerade durch alle Werte gelegt wird. Das Ergebnis hierzu ist in Abbildung 9 zu begutachten.

Es ergeben sich die Fitparameter

$$m = (4,486 \pm 0,655) \cdot 10^{-15} \text{ V s},$$

$$b = (-2,0 \pm 0,4) \text{ V}.$$

Da nach Formel (2) der Zusammenhang zwischen U_g und f

$$hf = e_0 U_g + A_k \tag{9}$$

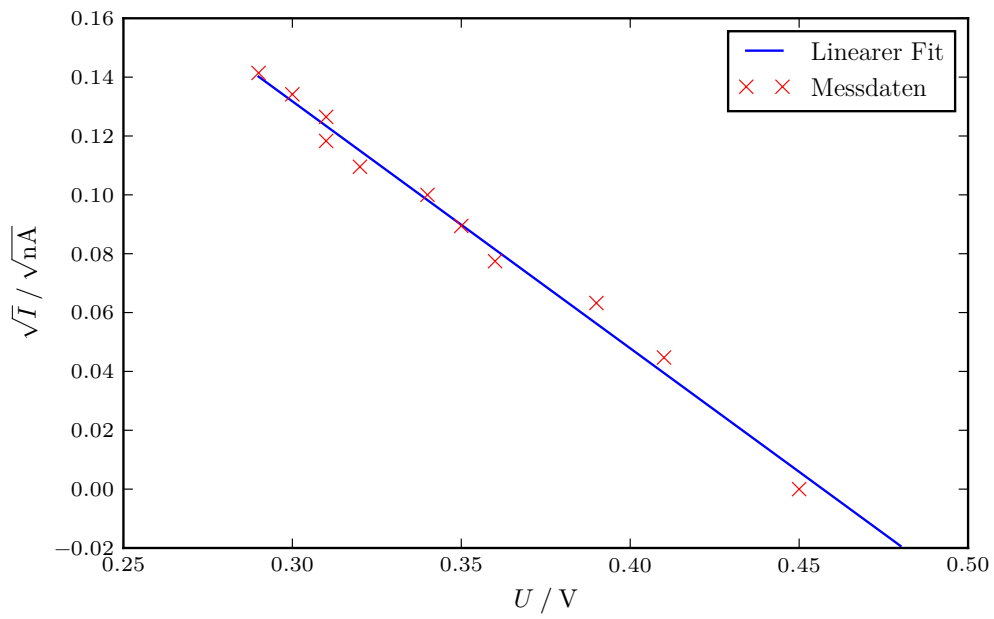


Abbildung 4: Messdaten für grünes Licht, $\lambda = 546,07 \text{ nm}$.

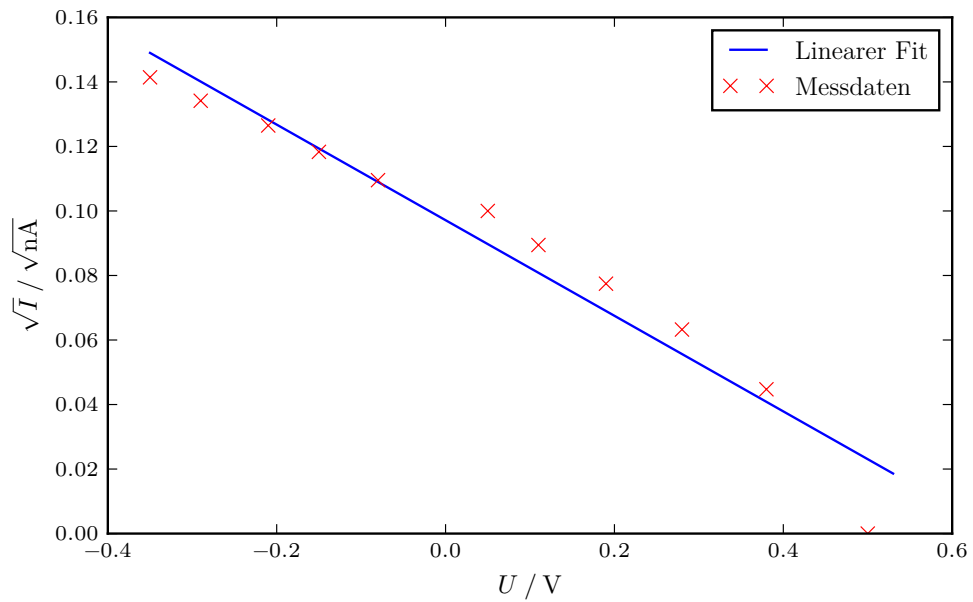


Abbildung 5: Messdaten für blaugrünes Licht, $\lambda = 491,6 \text{ nm}$.

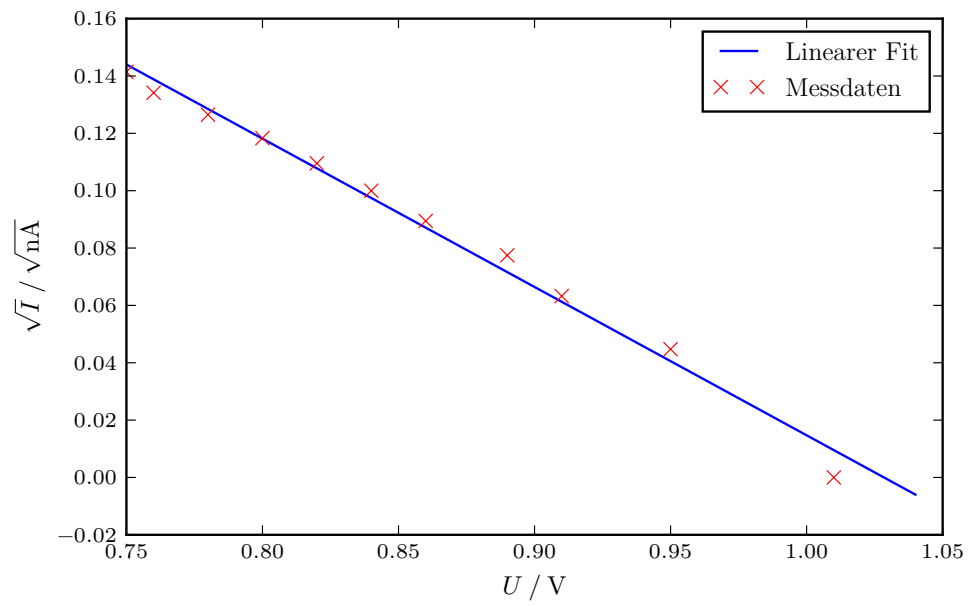


Abbildung 6: Messdaten für violettes Licht, $\lambda = 435,83 \text{ nm}$.

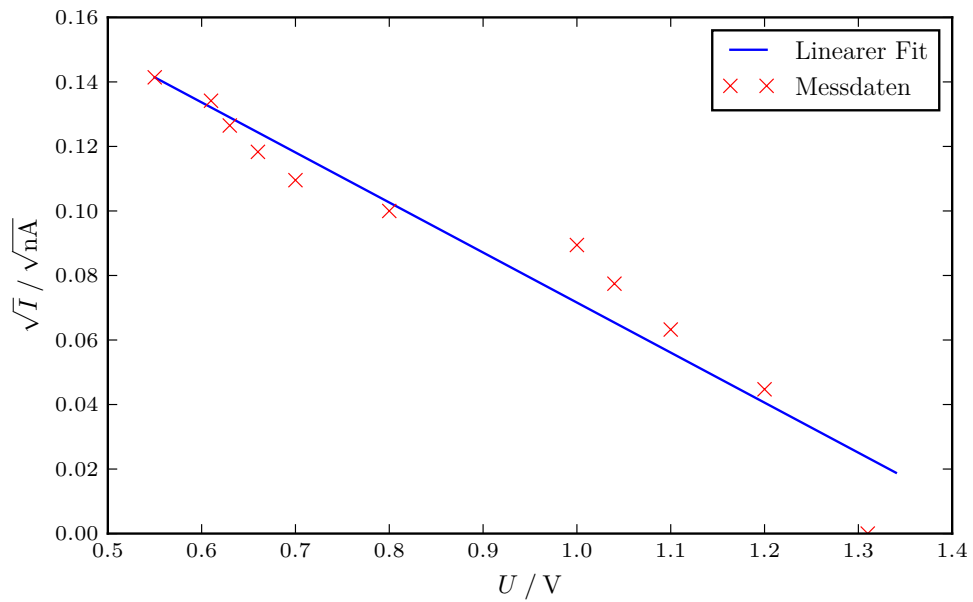


Abbildung 7: Messdaten für ultraviolettes Licht, $\lambda = 404,66 \text{ nm}$.

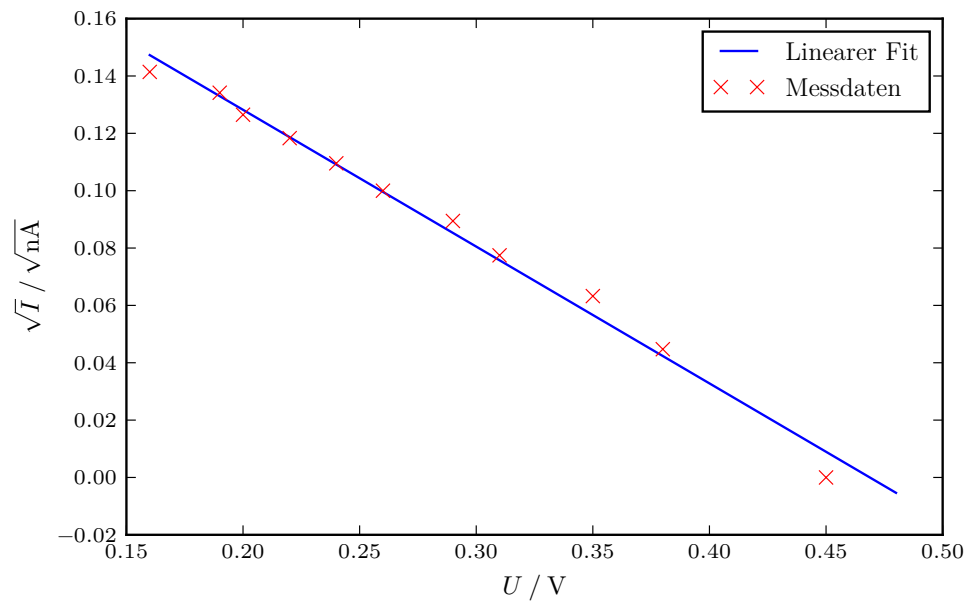


Abbildung 8: Messdaten für oranges Licht, $\lambda = 576,96 \text{ nm}$.

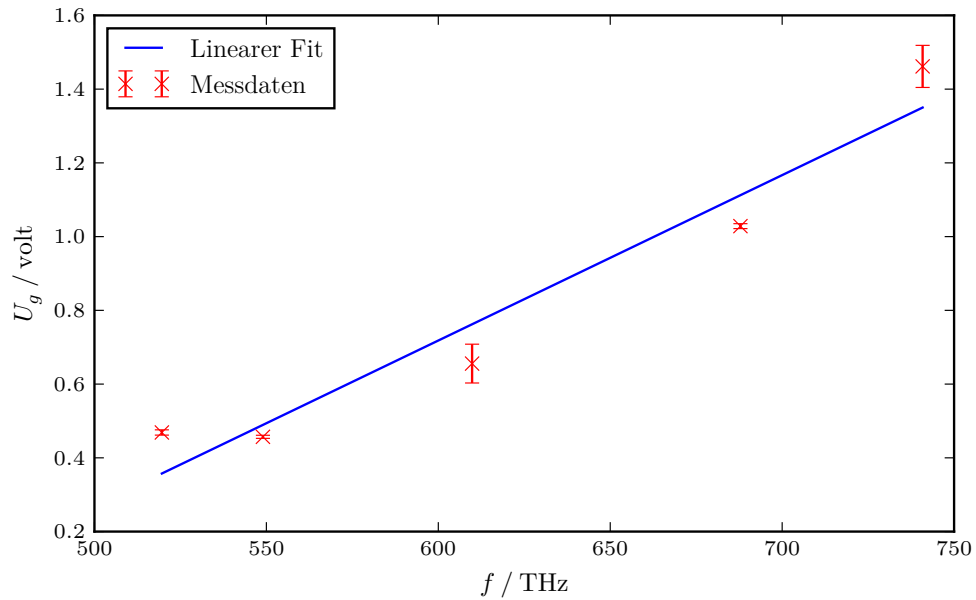


Abbildung 9: Die zuvor berechneten Spannungswerte gegen die jeweilige Frequenz.

beträgt, entspricht die Steigung der Konstante $\frac{h}{e_0}$, wobei h das Plancksche Wirkungsquantum und e_0 die Elementarladung ist. Zudem folgt die Austrittsarbeit des Materials der Photokathode aus dem Achsenabschnitt zu

$$A_k = (-2,0 \pm 0,4) \text{ eV}.$$

4.2 Betrachtung des Photostroms in Abhängigkeit der Spannung

Im zweiten Versuchsteil wird der Photostrom I in Abhängigkeit der angelegten Spannung U betrachtet, wobei die Spannung im Bereich von -20 V bis 20 V variiert wird. Dementsprechend wird sowohl das Verhalten unter einer Beschleunigungsspannung, hier mit einem negativen Vorzeichen versehen, als auch das Verhalten unter einer Bremsspannung betrachtet. Das Ergebnis ist in Abbildung 10 dargestellt. Es können mehrere Phänomene qualitativ beobachtet werden.

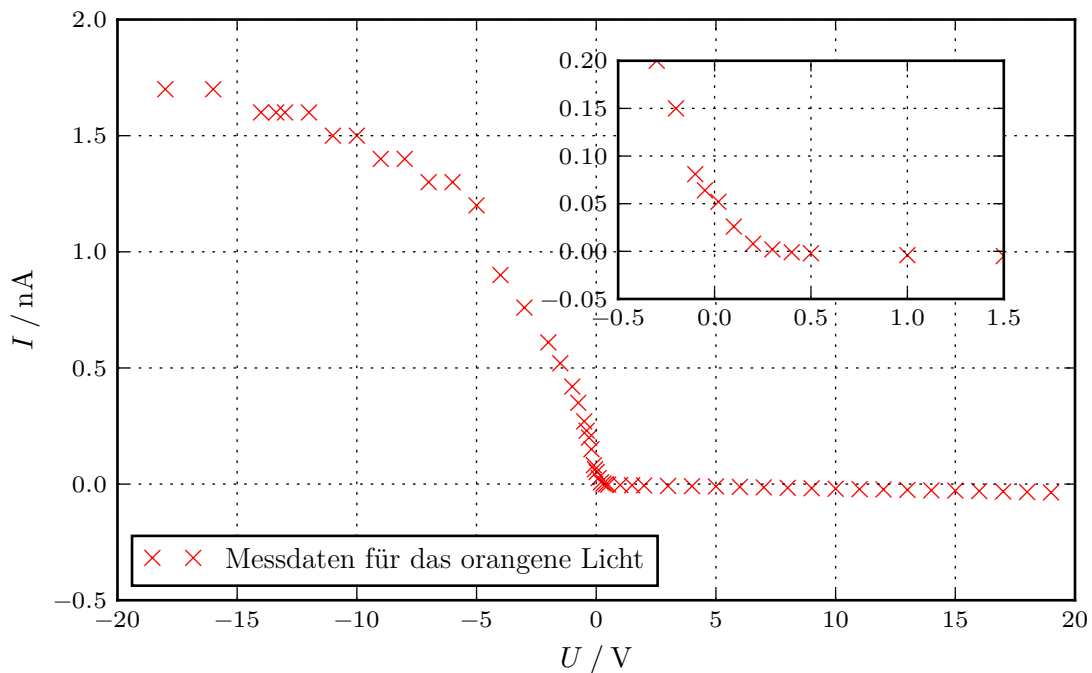


Abbildung 10: Verhalten des Photostroms in Abhängigkeit von der angelegten Spannung.

Zunächst fällt auf, dass sich der Photostrom für höhere Beschleunigungsspannungen einem Sättigungswert asymptotisch nähert. Dies hängt damit zusammen, dass durch die beschränkte Lichtintensität nur eine begrenzte Anzahl von Elektronen aus dem Material herausgelöst wird. Für eine hinreichend hohe Beschleunigungsspannung können somit keine weiteren Elektronen mehr beschleunigt werden, so dass eine Sättigung auftritt. Da die Photokathode nicht perfekt evakuiert ist, wird der Wert nur asymptotisch erreicht.

Des Weiteren ist auffällig, dass der Photostrom bei der zuvor ermittelten Gegenspannung von

$$U_{g,\text{orange}} = (0,469 \pm 0,007) \text{ V}$$

keinen diskreten Abfall erleidet. Dies liegt an der durch die Fermi-Dirac-Statistik bedingte Energieverteilung der Elektronen, weswegen die Elektronen bereits vorher Energie besitzen können. Ein weiterer Punkt ist der negative Photostrom, der sich für ausreichend große Bremsspannungen beobachten lässt und sich nicht durch den Photoeffekt an der Photokathode erklären lässt.

Trotzdem tritt dieser Strom auf, da das verwendete Material bereits bei Raumtemperatur verdampft. Hierdurch herausgelöste Elektronen können von der Anode zur Kathode beschleunigt werden und somit einen negativen Strom verursachen.

5 Diskussion

Der aus Plot 9 bestimmte Quotient aus der Planckschen Konstante und der Elementarladung lautet

$$\left(\frac{h}{e_0}\right)_{\text{gem}} = (4,486 \pm 0,655) \cdot 10^{-15} \text{ V s.}$$

Verglichen mit dem Literaturwert [1],

$$\left(\frac{h}{e_0}\right)_{\text{lit}} = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ V s,}$$

ergibt sich eine prozentuale Abweichung von

$$\Delta\left(\frac{h}{e_0}\right) = 8,5 \text{ \%}.$$

Die aus jenem Plot berechnete Austrittsarbeit beträgt

$$A = (-2,0 \pm 0,4) \text{ eV.}$$

Es fallen jedoch zwei Besonderheiten auf. Zunächst sieht es so aus, als würden die Punkte des Plots eher einen quadratisch ansteigenden Trend verfolgen, welcher die Theorie widerlegen würde. Die berechnete Steigung bestätigt die Theorie wiederum, was darauf schließen lässt, dass die bestimmten Punkte durch eine unglückliche Messdatenaufnahme vom wahren Wert abweichen. Zum Beispiel könnte dies an der geringen Intensität oder der Fokussierung der Spektrallinien liegen. Exemplarisch lässt sich hier die blaugrüne Linie nennen, welche durch eine sehr schwache Intensität gekennzeichnet ist. Zum anderen war es schwierig, die ultraviolette Linie aufzunehmen, da diese nur auf dem fluoreszierenden Schirm zu sehen ist.

Insgesamt lässt sich die Theorie zum Photoeffekt bestätigen, jedoch laden gewisse Messungenauigkeiten eher zu einem sogenannten vorsichtigen Genuss ein.

Literatur

- [1] *CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants*. Juni 2016. URL: <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>.
- [2] *TU Dortmund - Fachbereich Physik : Anfängerpraktikum Anleitung zu Versuch Nr. 500*. <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/V500.pdf>. Juni 2016.