

V500

Photoeffekt

Nikola Mang

Mirjam Prayer

Durchführung: 22.06.2021

Abgabe: 29.06.2021

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Theorie	3
1.1	Vorüberlegungen zu Licht	3
1.2	Das Prinzip des Photoeffekts	3
1.3	Messung des Photoeffekts	4
2	Durchführung	7
3	Auswertung	7
3.1	Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantum aus dem Photostrom . .	7
3.2	Betrachtung des Photostroms in Abhängigkeit von der Spannung	14
4	Diskussion	15

1 Theorie

1.1 Vorüberlegungen zu Licht

Photoeffekt wird der Vorgang genannt, bei dem auf Metalle treffendes Licht Elektronen aus diesem herauslösen. So ergibt sich ein Strom, der Photostrom.

Wie viele andere Phänomene lässt sich auch der Photoeffekt nur erklären, wenn man von einem korpuskularen Modell für Licht ausgeht. Dieses Modell ist einer der Grenzfälle der Quantenelektrodynamik.

In der Korpuskulartheorie wird davon ausgegangen, Licht bestünde aus Teilchen mit nahezu verschwindender Ausdehnung, den Lichtquanten oder Photonen, die sich geradlinig ausbreiten. Dabei bewegen sie sich im Vakuum stets mit der Geschwindigkeit c .

Handelt es sich um monochromatisches Licht, gilt für die Energie eines einzelnen Photons

$$E = h\nu, \quad (1)$$

wobei h das Planck'sche Wirkungsquantum ist und ν die Frequenz des Lichts.

Mit diesen grundlegenden Überlegungen ist es möglich, die beim Photoeffekt beobachtbaren Phänomene zu erklären.

1.2 Das Prinzip des Photoeffekts

Um den Photostrom auszulösen, wird ein Versuchsaufbau benötigt, dessen grober Aufbau wie 1 aussieht.

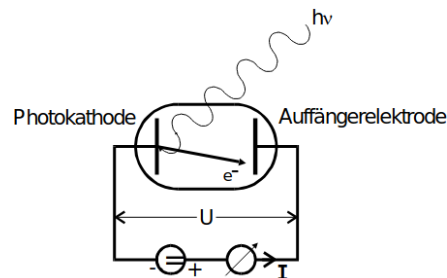


Abbildung 1: Schematischer Aufbau eines Versuchs zur Untersuchung des Photoeffekts.

Die Versuchsanordnung besteht aus einer Kathode, die mit monochromatischem Licht bestrahlt wird, und einer Auffängeranode, die sich in einem Vakuum befinden. Sie werden durch ein Messgerät miteinander verbunden. Es ist dabei nötig, dass sich die Elektroden im Vakuum (bzw. in einem vakuumisierten Gefäß, da im Labor kein perfektes Vakuum möglich ist) befinden, da sonst die Wahrscheinlichkeit hoch ist, dass entweder die Photonen oder die Elektronen mit Gasmolekülen zwischen den Elektroden interagieren und keine aussagekräftigen Beobachtungen genommen werden können.

An der Kathode, die auch Photokathode genannt wird, werden durch die Photonen Elektronen aus der Oberfläche herausgelöst. Diese bewegen sich dann zur Auffängerelektrode

und sorgen so für das Fließen eines Stroms.

Die wichtigsten Beobachtungen, die im Zuge eines derartigen Versuchs gemacht werden können, sind

- Zahl der Elektronen, die pro Zeiteinheit gelöst werden, ist proportional zu ν und unabhängig von der Lichtintensität. Bei Betrachtung aus der Sicht der Korpuskulartheorie ist das naheliegend: Jedes Photon löst je ein Elektron aus, bei Licht höherer Frequenz erreichen allerdings mehr Photonen die Photoelektrode pro Zeiteinheit, die auch eine höhere Energie inne haben. Kombiniert führt das zu mehr ausgelösten Elektronen. Dagegen ist die Energie der Photonen komplett unabhängig von der Intensität.
- Die Energie der Photoelektronen ist proportional zur Lichtfrequenz und unabhängig von der Lichtintensität. Dasselbe Prinzip wie oben hat auch hier seine Effekte; Ein Photon höherer Frequenz hat auch eine höhere Energie und überträgt mehr kinetische Energie an das Elektron.
- Es existiert eine Grundfrequenz, unterhalb der der Photoeffekt nicht auftritt. Auch das ist durch das Modell der Lichtteilchen zu erklären: Beim Auftreffen eines Photons auf ein Elektron überträgt es seine gesamte Energie, die sich allerdings unweigerlich aufteilt in die Arbeit, die gebraucht wird, um das Elektron aus dem Festkörper heraus zu lösen und den restlichen Teil, der dem Elektron als kinetische Energie übergeben wird. Es gilt also für die Energiebilanz

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

mit der Austrittsarbeit A_k . Wenn nun $h\nu < A_k$ kann kein Elektron aus dem Festkörper herausgelöst werden.

Im Wellenmodell wären diese Beobachtungen nicht zu erklären.

1.3 Messung des Photoeffekts

Die beschriebene Kombination aus Photokathode und Anode wird in einer Photozelle realisiert. Eine schematische Aufbau ist in Abbildung 2 zu finden.

Sie besteht aus einem Glaskolben mit zwei Elektroden, einem kreisförmigen Draht, der als Anode fungiert und parallel zur Kathode verläuft. Diese besteht aus innen aufgedampftem Metall, sodass die Innenseite von Licht bestrahlt werden kann.

Die Photozelle wird mit einer Spannungsquelle und einem Picoamperemeter verschaltet, wie in Abbildung 3 gezeigt.

So kann an die Kathode und Anode eine variable Spannung angelegt werden, wodurch ein elektrisches Feld entsteht, in dem die Elektronen aufgrund ihrer Ladung abgebremst werden, sodass für den Strom eine obere Grenze von

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

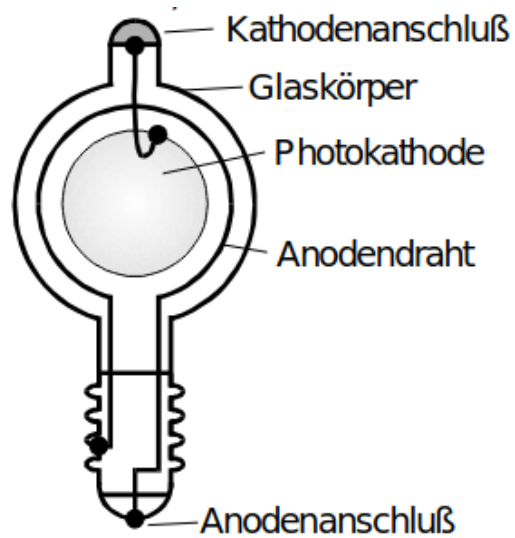


Abbildung 2: Aufbau einer Photozelle.

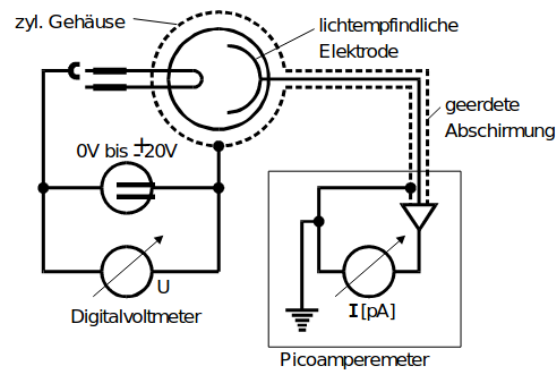


Abbildung 3: Verschaltung der Photozelle.

folgt. Es handelt sich um die Grenze, bei der die kinetische Energie selbst der schnellsten Elektronen zu klein wird, sodass sie die Anode nicht mehr erreichen können.

Um die Geschwindigkeit der schnellsten Elektronen zu berechnen, wird die Gegenspannung U_g in (2) eingesetzt, es folgt

$$h\nu = e_0 U_g + A_k.$$

Bei einer realen Messung bricht der Photostrom allerdings nicht plötzlich ab, sondern nähert sich kontinuierlich der Null. Das liegt an der Energieverteilung der Photoelektronen, die aus den unterschiedlichen Energien folgt, die die Elektronen vor dem Lösen aus dem Festkörper haben. Diese Energien folgen der Fermi-Dirac-Statistik, die besagt, dass sie in einem Intervall von 0 bis ξ liegen, mit der Fermi-Energie ξ . Die Fermi-Energie kann einige Elektronenvolt betragen.

Abbildung 4 verdeutlicht dieses Hindernis: der Strom fällt nicht plötzlich auf null ab, sondern nähert sich schon vorher langsam an null an.

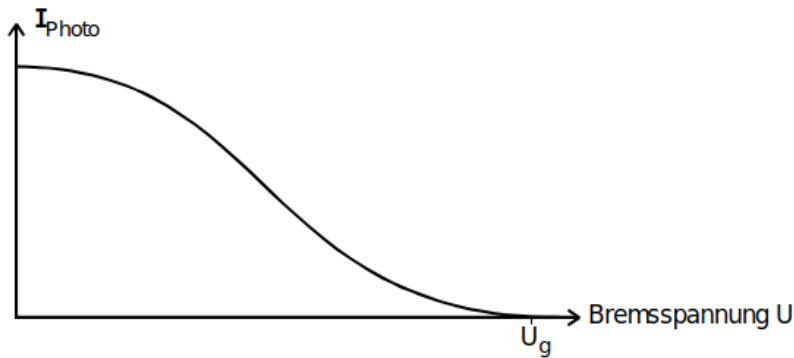


Abbildung 4: Kontinuierlicher Verlauf des Photostroms in Abhängigkeit von der Bremsspannung.

Es lässt sich aber ein Zusammenhang nutzen, der unter bestimmten Voraussetzungen gilt; demnach ist $I_{\text{ph}} \propto U^2$.

Ganz anders ist das im Fall, dass die Austrittsarbeit der Anode größer ist als $h\nu$, in diesem Fall tritt kein Photostrom auf, es sei denn, es wurde eine beschleunigende Spannung angelegt. Das liegt daran, dass die Elektronen sich erst gegen ein elektrisches Gegenfeld bewegen müssen, um zur Anode zu gelangen. Die Voraussetzung, einen Photostrom zu messen, ist dann

$$h\nu + e_0 U_b \geq A_k.$$

Es kann bei einigen Photozellen, so auch der hier verwendeten, bei hoher Bremsspannung auch einen negativen Strom beobachtet werden. Dieser überlagert sich mit dem Photostrom und erschwert die Bestimmung von U_g .

2 Durchführung

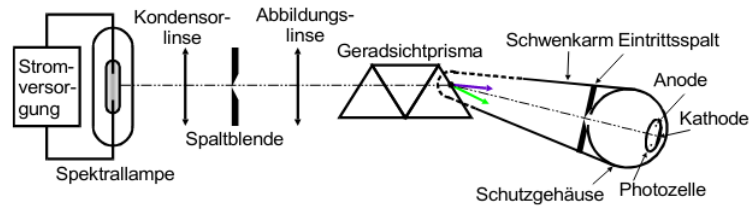


Abbildung 5: Versuchsanordnung zur Untersuchung des Photoeffekts.

In Abbildung 5 ist der Versuchsaufbau gezeigt, der genutzt wird, um den Photoeffekt genauer zu betrachten. Hier wird als Strahlungsquelle eine Quecksilberlampe verwendet. Aufgrund der hohen Empfindlichkeit der Messapparatur ist es wichtig, dass alles gut justiert ist. Das aus der Kondensorlinse kommende Licht soll so auf den Spalt treffen, dass die Breite der Spaltblende genau ausgefüllt ist. Dann können optimale Ergebnisse erzielt werden.

Durch Verschiebung der Abbildungslinse wird das Bild des vom Prisma zerlegten Lichtes so eingestellt, dass sich am Eingang der Photozelle scharfe Spektrallinien ergeben.

Zunächst werden die grüne, violette und rote Spektrallinie so justiert, dass sie genau auf den Eingang der Photozelle treffen. Dazu wird der Teil der Versuchsanordnung mit der Lampe verschoben.

Für jede dieser Spektrallinien wird dann der Photostrom für eine Spannung ab 2 V gemessen, wobei die Spannung in Schritten von 0.25V verringert wird, bis die Spannung unter 0 fällt. Ab diesem Punkt wird die Spannung in 0.2V-Schritten verringert, bis der Photostrom verschwindet.

Anschließend wird die gelbe auf den Eingang der Photozelle ausgerichtet und der resultierende Photostrom im Bereich von 20 bis -20V unter verschiedenen Schrittweiten gemessen. Bei höheren Spannungen wird in 2V Schritten gemessen, im Bereich von 2 bis -2V wird die Schrittweite auf 0.25V verringert, daraufhin wieder auf 5V vergrößert.

3 Auswertung

3.1 Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantum aus dem Photostrom

Es wurden für verschiedene Spektrallinien die Anodenspannung variiert und der resultierende Strom zwischen Anode und Anode gemessen. Folgende Werte wurden ermittelt:

Tabelle 1: Messwerte der roten Spektrallinie

U [V]	I[nA]
2	0.025
1.75	0.02
1.5	0.018
1.25	0.016
1	0.0143
0.75	0.012
0.5	0.01
0.25	0.0075
0.02	0.002
-0.2	0.001
-0.4	0
-0.6	0

Tabelle 2: Messwerte der grünen Spektrallinie

U [V]	I[nA]
2	1.4
1.75	1
1.5	0.95
1.25	0.8
1	0.7
0.75	0.6
0.5	0.5
0.25	0.4
0.02	0.3
-0.2	0.2
-0.4	0.09
-0.6	0.01
-0.8	0
-1	0

Tabelle 3: Messwerte der blauen Spektrallinie

U [V]	I[nA]
2	2.1
1.75	1.75
1.5	1.55
1.25	1.4
1	1.23
0.75	1.1
0.5	0.95
0.25	0.8
0	0.7
-0.2	0.5
-0.4	0.3
-0.6	0.2
-0.8	0.15
-1	0

Tabelle 4: Messwerte der gelben Spektrallinie im Bereich von 2 V bis -1 V

U [V]	I[nA]
2	0.6
1.75	0.55
1.5	0.5
1.25	0.45
1	0.4
0.75	0.35
0.5	0.28
0.25	0.22
0.02	0.15
-0.2	0.1
-0.4	0.018
-0.6	0
-0.8	0
-1	0

Tabelle 5: Messwerte der gelben Spektrallinie im Bereich von 19 V bis -0.2 V

U [V]	I[nA]
19	1.43
18	1.4
17	1.37
16	1.3
15	1.27
14	1.26
13	1.25
12	1.2
11	1.19
10	1.17
9	1.1
8	1.07
7	1
6	0.9
5	0.92
4	0.84
3.5	0.78
3	0.72
2.5	0.63
2	0.45
1.75	0.4
1.5	0.32
1.25	0.25
1	0.2
0.75	0.175
0.5	0.12
0.25	0.05
0.002	0.012
-0.2	0

Die für die verschiedenen Spektrallinien aufgenommenen Daten werden in Tabelle 1 bis Tabelle 5 wiedergegeben. Für die Analyse anhand der Funktion $\sqrt{I} = aU + b$ sind in Abbildung 6 bis 10 die Wurzel des Photostromes gegen die angelegte Spannung für jede betrachtete Spektrallinie aufgetragen. Diese werden grafisch auf Linearität untersucht. Für die als linear befundenen Teile der jeweiligen Messwertfolge wurde mittels Python eine lineare Regression mit der Funktion $\sqrt{I} = aU + b$ angefertigt. Zunächst sind nun die Abbildungen dargestellt, danach folgen die Erläuterungen und Ergebnisse. Die Messwerte für die rote Spektrallinie mit einer Wellenlänge von $\lambda = 614\text{nm}$ ist in folgender Abbildung dargestellt.

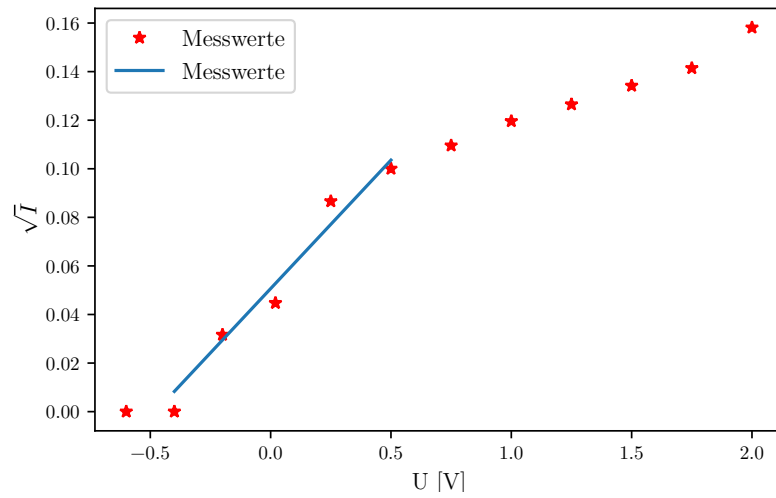


Abbildung 6: Messwerte und lineare Regression der roten Spektrallinie

Die Messwerte für die grüne Spektrallinie mit einer Wellenlänge von $\lambda = 546\text{nm}$ ist in folgender Abbildung dargestellt.

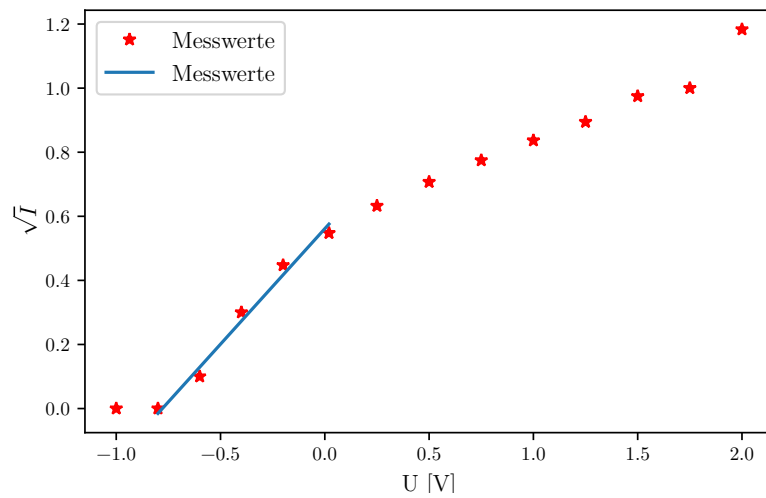


Abbildung 7: Messwerte und lineare Regression der grünen Spektrallinie

Die Messwerte für die blaue Spektrallinie mit einer Wellenlänge von $\lambda = 492\text{nm}$ ist in folgender Abbildung dargestellt.

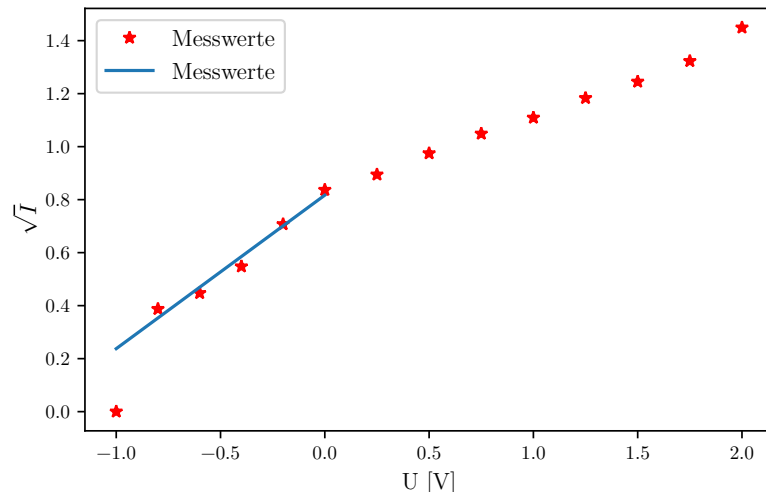


Abbildung 8: Messwerte und lineare Regression der blauen Spektrallinie

Für die gelbe Spektrallinie mit einer Wellenlänge von $\lambda = 577.579\text{nm}$ wurden zwei Messreihen durchgeführt. Die erste jener ist in folgender Abbildung dargestellt.

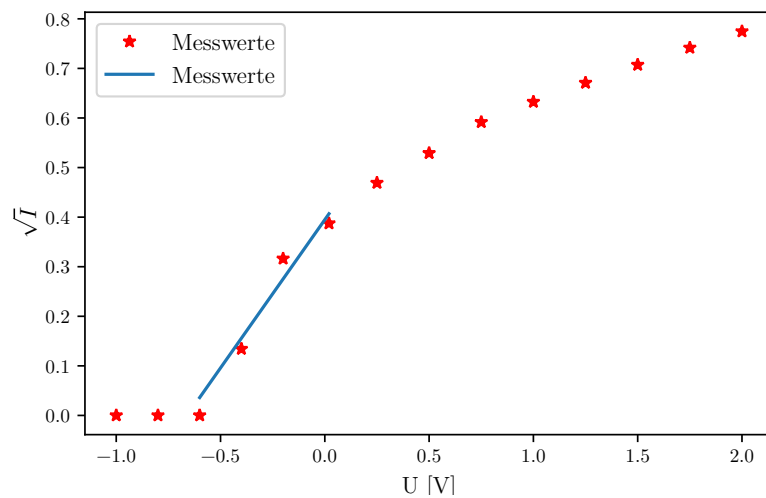


Abbildung 9: Messwerte und lineare Regression der gelben Spektrallinie

In der folgenden Abbildung 10 ist die zweite Messreihe für die gelbe Spektrallinie dargestellt.

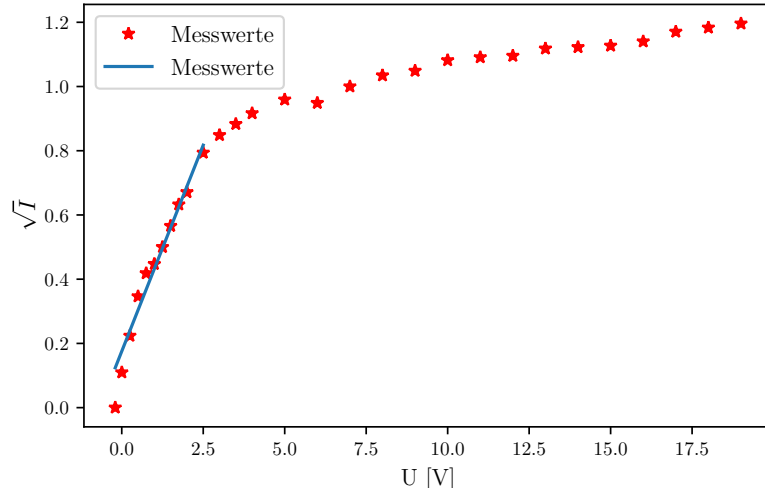


Abbildung 10: Messwerte und lineare Regression der gelben Spektrallinie

In Tabelle 6 sind jeweils der Beginn und das Ende der linearen Teile der Messdaten für die jeweilige Spektrallinie dargestellt. Es wird für jede Spektrallinie von U_a bis U_b die lineare Regression durchgeführt.

Tabelle 6: Parameter der linearen Regressionen

λ [nm]	U_a [V]	U_b [V]
614	-0.2	0.5
577.579	-0.2	2.5
577.579	-0.6	0.02
546	-0.8	0.02
434	-1	0

Die durch die lineare Regression bestimmten Koeffizienten und den Grenzspannungen U_G , der sich aus den Schnittpunkten mit der Spannungsachse ergibt, sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Parameter der linearen Regressionen

λ [nm]	a	b	U_G [nV]
614	0.106 ± 0.018	0.051 ± 0.005	-0.47867
577.579	0.257 ± 0.015	0.175 ± 0.021	-0.683269
577.579	0.598 ± 0.169	0.395 ± 0.044	-0.660231
546	0.721 ± 0.087	0.561 ± 0.033	-0.77884
434	0.579 ± 0.054	0.817 ± 0.026	-1.41017

Durch Umpolen werden die Werte für U_G positiv. Um nun die Austrittsarbeit aus der Photokathode und das Plancksche Wirkungsquantum zu bestimmen, wird mit den erhaltenen Gegenspannungen mit zugehörigen Lichtfrequenzen erneut eine lineare Regression durchgeführt. Die bestimmten Gegenspannungen U_G sind in der folgenden Grafik 11 gegen die zugehörigen Wellenlängen aufgetragen. Mit einer linearen Regression in Python

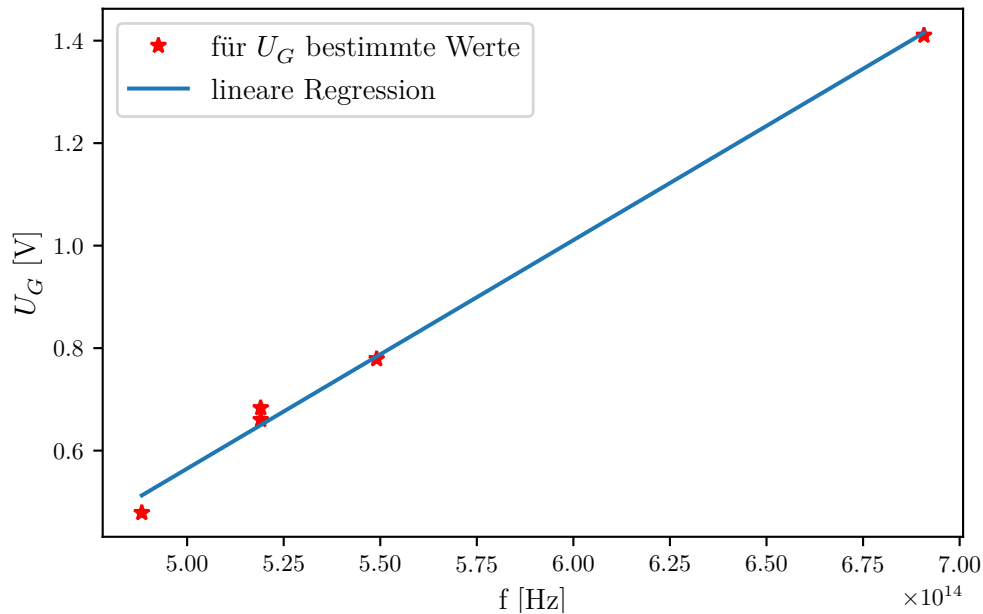


Abbildung 11

der Ausgleichsgeraden $U_G = a \cdot f + b$ werden die Koeffizienten

$$a = (4.46 \pm 0.18) \cdot 10^{-15}$$

$$b = 1.66 \pm 0.1$$

bestimmt. Aus Gleichung 2 folgt, dass die Steigung a dem Bruch $\frac{h}{e}$ und der Achsenabschnitt b der Austrittsarbeit in eV entspricht. Somit ergibt sich

$$h = 4.46 \cdot 10^{-15} \text{ eVs}$$

$$W_A = 1.66 \text{ eV.}$$

nachdem die Umrechnung von Nanometern in Metern erfolgt ist.

3.2 Betrachtung des Photostroms in Abhängigkeit von der Spannung

Nun wird bei einer Wellenlänge von $\lambda = 578 \text{ nm}$ der Photostrom bei einer Variation der angelegten Brems- bzw. Beschleunigungsspannung von -0.2 V bis 19 V gemessen. Die

Daten sind in Tabelle 5 gelistet und in Abbildung 10 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass es einen Sättigungswert gibt, gegen den die Kurve strebt. Dieser kommt durch die konstante Intensität des bestrahlenden Lichtes zustande. Die Anzahl der austretenden Elektronen ist nämlich proportional zu der Intensität des einfallenden Lichtes. Ab einem gewissen Punkt werden nicht mehr Elektronen vom Licht freigesetzt als von der Anode angezogen. Da die Elektronen beim Austritt über verschiedene kinetische Energien verfügen, und einen Impuls in Unterschiedliche Richtungen aufweisen, und daher teilweise die Anode verfehlen, wird der Sättigungswert asymptotisch erreicht. Der Sättigungswert hängt also von der Oberfläche der Anode sowie der Intensität ab.

Auch bei der Spannung U_G gibt es keinen Knick, sondern eine asymptotische Annäherung. Diese existiert aus dem selben Grund. Auch wenn keine Spannung anliegt, gibt es Elektronen, die kinetische Energie in Richtung der Anode besitzen, sodass trotzdem ein Strom zwischen Kathode und Anode entsteht.

Weiterhin wurde im Bereich der Gegenspannung, also bei $U_G \leq U$ ein entgegengesetzter Stromfluss gemessen. Dieser ist durch die Beschichtung der Kathode zu erklären. Diese ist so gewählt, dass diese eine geringe Austrittsarbeit für Elektronen besitzt. Sie verdampft bereits bei geringen Temperaturen, sodass sich ionisierte Atome von der Kathode lösen und aufgrund Ihrer positiven Ladung zur Anode fliegen.

4 Diskussion

Der aus der linearen Regression bestimmte Wert für die Plancksche Konstante lautet $h = 4.46 \cdot 10^{-15} \text{ eVs}$. Von dem Literaturwert $h = 4.136 \cdot 10^{-15} \text{ eVs}$ weicht er also um $\Delta h = 7.8\%$ ab. Trotz der Tatsache, dass nur vier Werte zur Bestimmung von h verwendet wurden, ist diese Abweichung sehr gering. Bei der Versuchsdurchführung ist aufgefallen, dass die Nadel des Pikoamperemeters ohne Veränderung der zu untersuchenden Parameter schwankt. Außerdem war der Raum nicht komplett abgedunkelt, so dass auch anderes Licht auf die Photokathode fällt.