

Durchführung: 09.05.2017
Abgabe: 16.05.2017
2. Abgabe: 30.05.2017

PRAKTIKUMSPROTOKOLL V500

PHOTO-EFFEKT

Anneke Reinold¹,
Vanessa Sulaiman²

¹anneke.reinold@tu-dortmund.de

²vanessa.sulaiman@tu-dortmund.de

1 Einleitung

Mithilfe des hier durchzuführenden Experiments des Photoeffekts können Rückschlüsse auf die Natur des Lichts gezogen werden. Hierfür wird eine Metalloberfläche mit monochromatischem Licht bestrahlt, sodass sich Elektronen aus dieser herausgelösen. Für die Vereinbarkeit des klassischen Teilchen- und des Wellenmodells ist eine Betrachtung auf Ebene der Quantenelektrodynamik notwendig.

2 Theorie

Um den Photoeffekt, das Herauslösen von Elektronen durch Licht und die damit einhergehenden Eigenschaften dessen, erklären zu können, erfordert es die Einsteinsche Korpuskeltheorie. Als ein Kompromiss der Quanten- und Elektrodynamik aus der newtonschen Punktmechanik und den maxwellschen Gleichungen, mit welchen beiden eine vollständige Erklärung jener Phänomene, die bei der Durchführung des Experiments auftreten, nicht möglich ist, folgt die Theorie Einsteins, die besagt, dass die Energie des Lichts in Lichtquanten, den sogenannten Photonen, transportiert wird. Zur Untersuchung des Photoeffekts kann ein Aufbau nach folgender Prinzipschaltung dienen:

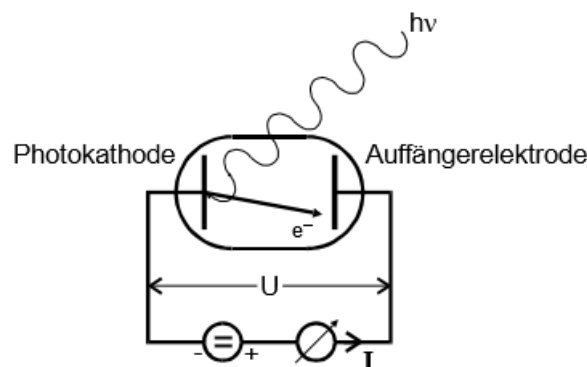


Abbildung 1: Experimenteller Aufbau zur Untersuchung des Photoeffekts[1].

Es wird der Strom gemessen, der entsteht, wenn an der aus der mit monochromatischen Licht bestrahlten Photokathode die herausgelösten Elektronen von dem positiven Kontaktpotential angezogen werden. Die gewonnenen Erkenntnisse lassen sich unter drei Punkten zusammenfassen:

- Die Anzahl der herausgelösten Elektronen ist proportional zu der Lichtintensität.
- Die Energie der Photoelektronen ist proportional zur Lichtfrequenz. Sie ist aber unabhängig von der Intensität des Lichts.
- Es existiert eine Grenzfrequenz, unterhalb der der Effekt nicht auftritt.

All diese Punkte lassen sich nicht mit den klassischen Theorien einheitlich erklären. Einstein folgte zur Erklärung, dass monochromatisches Licht der Frequenz ν aus

Photonen besteht. Diese Photonen sind identisch mit den planckschen Lichtquanten. Die Photonen bewegen sich geradlinig mit der Lichtgeschwindigkeit c und besitzen alle die Energie

$$W_{\text{Ph}} = h\nu, \quad (1)$$

wobei h dem Planckschen Wirkungsquantum entspricht. Beim Herauslösen wird die Energie des Photons momentan auf das Elektron übertragen. Diese setzt sich aus der Austrittsarbeit A_K , die nötig ist, damit das Elektron das Metall verlassen kann und der kinetischen Energie des Elektrons zusammen.

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

Zur Erklärung der aufgetretenen Grenzfrequenz kann aus 2 gefolgert werden, dass der Photoeffekt nur auftreten kann, solange $h\nu > A_K$.

3 Aufbau

Der Teil des Versuchsaufbaus, aus dem durch Bestrahlung mit einer Quecksilberdampfampe die Elektronen herausgelöst werden, wird als Photokathode bezeichnet. Ihr prinzipieller Aufbau ist in Abbildung 2 zu sehen. Sie besteht aus zwei Elektroden in einem evakuierten Glaskolben, die auf der Innenseite mit einer Legierungsschicht bedampft sind.

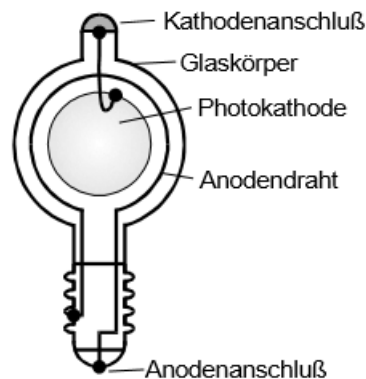


Abbildung 2: Aufbau der Photokathode [1].

Der gesamte Versuchsaufbau ist schematisch in Abbildung 3 zu sehen. Durch Bündelung und Aufspaltung des Lichts der Lampe wird die Photokathode mit der jeweiligen Wellenlänge an monochromatischem Licht bestrahlt.

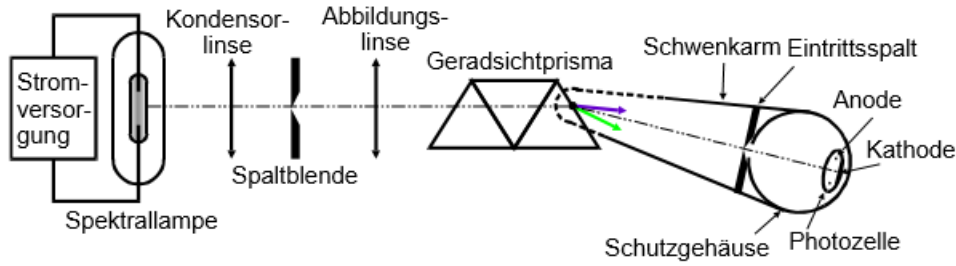


Abbildung 3: Versuchsaufbau [1].

4 Durchführung

Zuerst soll für unterschiedliche Wellenlängen des Lichts der Photostrom in Abhängigkeit der Gegenspannung gemessen werden. Hierzu wird ein Gegenfeld zwischen Kathode und Anode angelegt, um die Elektronen auf ihrem Weg zu bremsen und so deren Energie messen zu können, da nur noch die ausgetretenen Elektronen zur Anode gelangen können, die eine Energie $E_{\text{kin}} > e_0 U$ besitzen. Der Strom zwischen den Elektroden verschwindet, sobald

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

Für die Energie der schnellsten Elektronen gilt

$$h\nu = e_0 U_g + A_K. \quad (4)$$

Es kann gezeigt werden, dass sich ein Zusammenhang von $I_{\text{Ph}} \sim U^2$ zwischen der Bremsspannung und dem Photostrom einstellt. Bei diesem Versuch ist es möglich, dass einige Photoelektronen eine Energie größer als $h\nu - A_K$ besitzen, da sie schon eine höhere Energie im Festkörper besaßen. Über die Energieverteilung dessen gibt die Fermi-Dirac-Statistik Auskunft. Die Messung wird für die sechs Spektralfarben, die sich abgezeichnet haben, durchgeführt. Des Weiteren wird der auftretende Sättigungstrom und das generelle Verhalten des Photostroms im Speziellen für das Licht mit einer Wellenlänge von $\lambda = 579 \text{ nm}$ genauer untersucht. Hierzu wird zum einen mit einer beschleunigenden Spannung, als auch mit einer bremsenden gearbeitet. Es wird diese in einem Bereich von $-20 \text{ V} \leq U \leq 20 \text{ V}$ gemessen.

5 Auswertung

Zur Bestimmung der Grenzspannung U_g , bei welcher der Strom gerade verschwindet, wird eine Regression der Form

$$y = ax + b \quad (5)$$

mit $y = \sqrt{I}$ und $x = U$ berechnet. Die Grenzspannung ist dann die Nullstelle, welche sich nach

$$U_g = -\frac{b}{a} \quad (6)$$

berechnet. In den folgenden Tabellen 1 bis 6 und den zugehörigen Abbildungen 4 bis 9 sind die entsprechenden Messwerte aufgetragen und Regressionen eingezeichnet.

Tabelle 1: Messwerte der gelben Spektrallinie.

U in V	I in nA
0,000	0,120
0,050	0,105
0,100	0,090
0,150	0,075
0,200	0,060
0,250	0,048
0,300	0,031
0,350	0,019
0,400	0,010
0,450	0,005
0,500	0,001

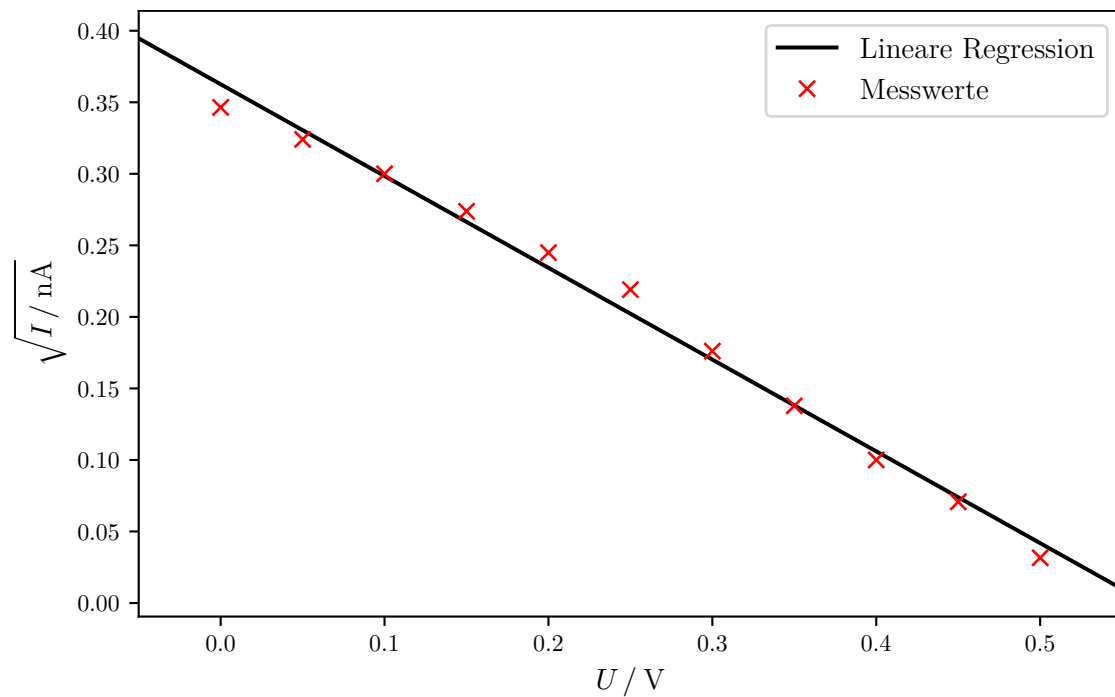


Abbildung 4: Messwerte zur Bestimmung der Grenzspannung der gelben Spektrallinie.

Tabelle 2: Messwerte der grünen Spektrallinie.

U in V	I in nA
0,000	0,280
0,065	0,260
0,130	0,225
0,195	0,180
0,260	0,145
0,325	0,100
0,390	0,066
0,455	0,036
0,520	0,017
0,585	0,006
0,650	0,000

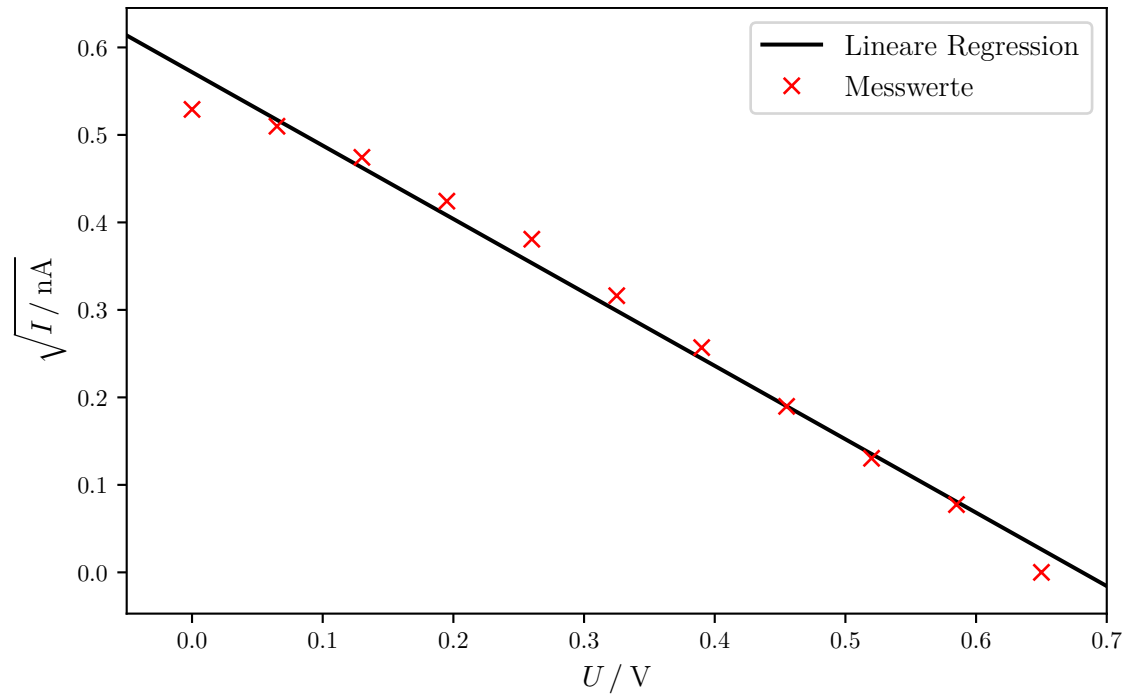


Abbildung 5: Messwerte zur Bestimmung der Grenzspannung der grünen Spektrallinie.

Tabelle 3: Messwerte der blaugrünen Spektrallinie.

U in V	I in nA
0,000	0,022
0,080	0,020
0,160	0,018
0,240	0,015
0,320	0,012
0,400	0,009
0,480	0,006
0,560	0,004
0,640	0,003
0,720	0,001
0,800	0,000

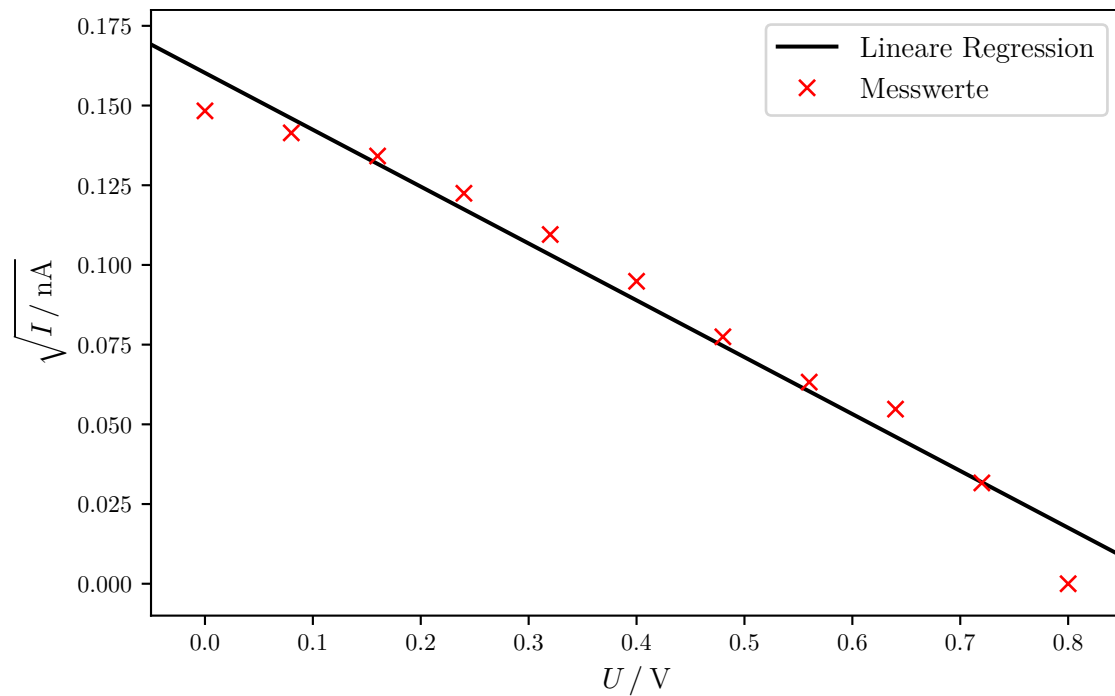


Abbildung 6: Messwerte zur Bestimmung der Grenzspannung der blaugrünen Spektrallinie.

Tabelle 4: Messwerte der ersten violetten Spektrallinie.

U in V	I in nA
0,000	0,480
0,120	0,420
0,240	0,360
0,360	0,300
0,480	0,230
0,600	0,155
0,720	0,096
0,840	0,052
0,960	0,022
1,080	0,005
1,200	0,000

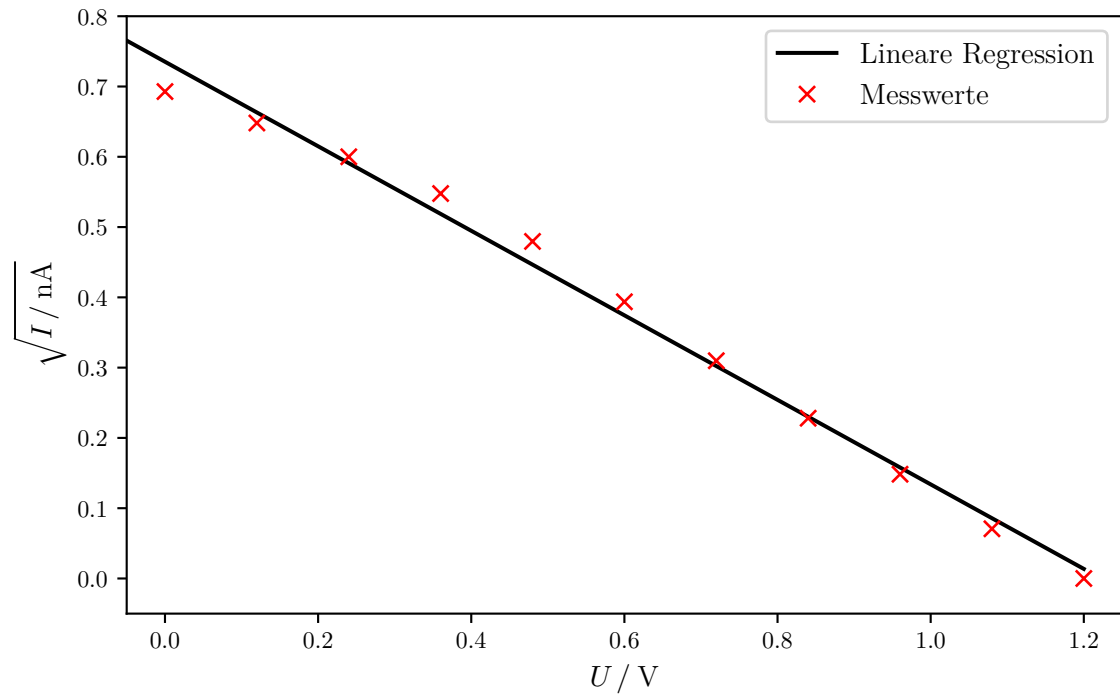


Abbildung 7: Messwerte zur Bestimmung der Grenzspannung der ersten violetten Spektrallinie.

Tabelle 5: Messwerte der zweiten violetten Spektrallinie.

U in V	I in nA
0,000	0,110
0,130	0,096
0,260	0,080
0,390	0,067
0,520	0,050
0,650	0,036
0,780	0,024
0,910	0,014
1,040	0,007
1,170	0,002
1,300	0,000

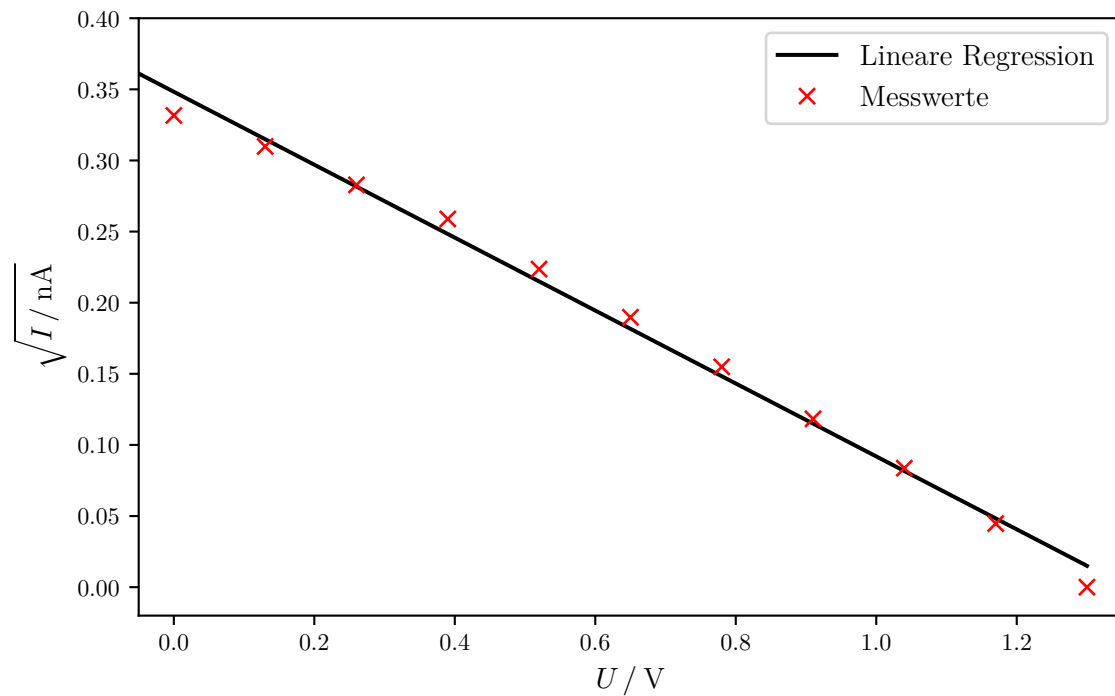


Abbildung 8: Messwerte zur Bestimmung der Grenzspannung der zweiten violetten Spektrallinie.

Tabelle 6: Messwerte der dritten violetten Spektrallinie.

U in V	I in nA
0,000	0,195
0,160	0,170
0,320	0,145
0,480	0,120
0,640	0,092
0,800	0,066
0,960	0,044
1,120	0,028
1,280	0,014
1,440	0,005
1,600	0,000

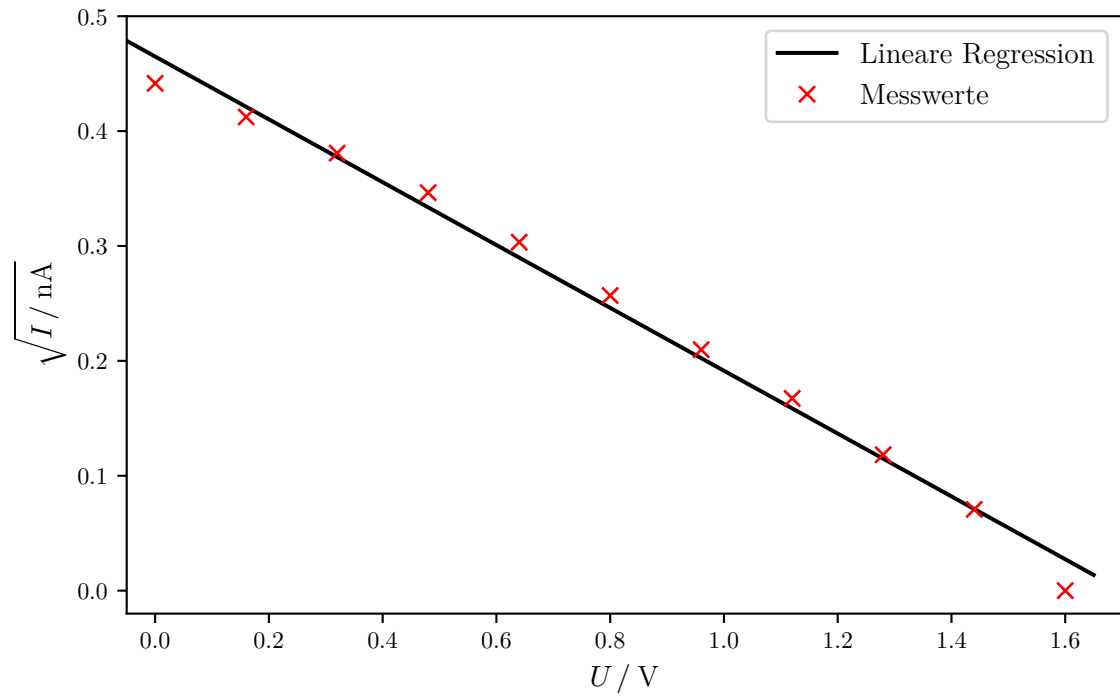


Abbildung 9: Messwerte zur Bestimmung der Grenzspannung der dritten violetten Spektrallinie.

Aus den Regressionen ergeben sich die in Tabelle 7 aufgetragenen Werte für die verschiedenen Spektrallinien. Dabei ergeben sich die Fehler der Grenzspannungen aus der Gaußschen Fehlerfortpflanzung

$$\Delta f = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \Delta x_i^2}. \quad (7)$$

Tabelle 7: Regressionsparameter und Grenzspannungen der jeweiligen Spektrallinien.

Farbe	λ / nm	$a / (\sqrt{A} / \text{V})$	b / \sqrt{A}	U_g / V
Gelb	579	$-0,641 \pm 0,020$	$0,363 \pm 0,006$	$0,566 \pm 0,020$
Grün	546	$-0,839 \pm 0,032$	$0,572 \pm 0,012$	$0,682 \pm 0,030$
Blaugrün	492	$-0,178 \pm 0,010$	$0,160 \pm 0,005$	$0,90 \pm 0,06$
Violett 1	436	$-0,601 \pm 0,019$	$0,735 \pm 0,013$	$1,22 \pm 0,04$
Violett 2	434	$-0,256 \pm 0,007$	$0,348 \pm 0,005$	$1,36 \pm 0,04$
Violett 3	405	$-0,273 \pm 0,009$	$0,465 \pm 0,008$	$1,70 \pm 0,06$

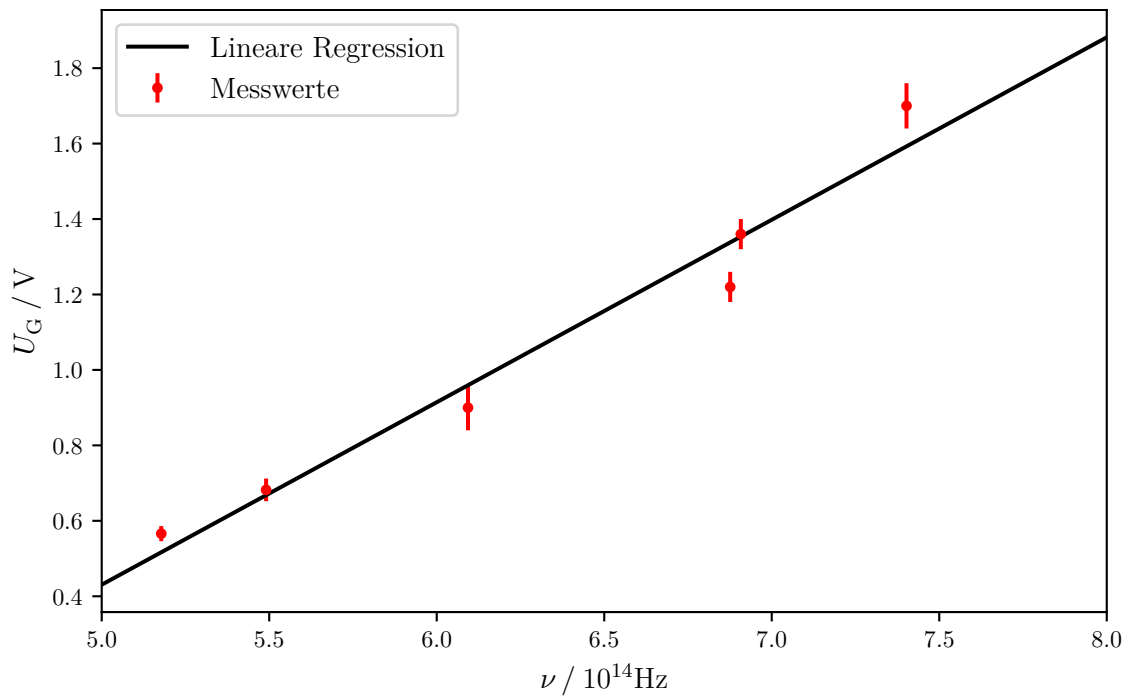


Abbildung 10: Grenzspannung abhängig von der Frequenz.

In Abbildung 10 sind die Grenzspannungen abhängig von der Frequenz, welche sich nach

$\nu = \frac{c}{\lambda}$ berechnet, aufgetragen. Aus der Regression der Form (5) ergeben sich die Werte

$$a = (4,84 \pm 0,45) \cdot 10^{-15} \text{ Vs}$$

$$b = (-1,99 \pm 0,29) \text{ V},$$

wobei nach Gleichung (4) $a = \frac{h}{e_0}$ und $b = -\frac{A_k}{e_0}$ sind. Daraus ergibt sich für die Austrittsarbeit

$$A_k = (1,99 \pm 0,29) \text{ eV}.$$

Zum Schluss wird bei Betrachtung der gelben Spektrallinie eine beschleunigende Spannung angelegt. Die Messwerte sind in Tabelle 8 und in Abbildung 11 aufgetragen. Auffällig ist, dass bei hoher Beschleunigungsspannung ein Sättigungswert erreicht wird, da dann alle ausgelösten Elektronen die Anode erreichen und die Anzahl der ausgelösten Elektronen nicht abhängig von der Beschleunigungsspannung, sondern nur von der Lichtintensität ist. Außerdem fällt auf, dass der Photostrom schon vor Erreichen der Grenzspannung U_g anfängt, abzunehmen, was daran liegt, dass die Elektronen unterschiedliche kinetische Energien haben und die meisten schon bei niedrigeren Grenzspannungen die Anode nicht mehr erreichen. Zudem kann ein entgegengesetzter Strom auftreten, da das Kathodenmaterial bereits bei einer Temperatur von 20°C verdampft, sodass dort thermische Elektronenemission in die entgegengesetzte Richtung auftritt. Die Bremsspannung beschleunigt diese Elektronen und es sind nur vergleichsweise wenige Elektronen, sodass der Sättigungswert für diese Elektronen schnell erreicht ist.

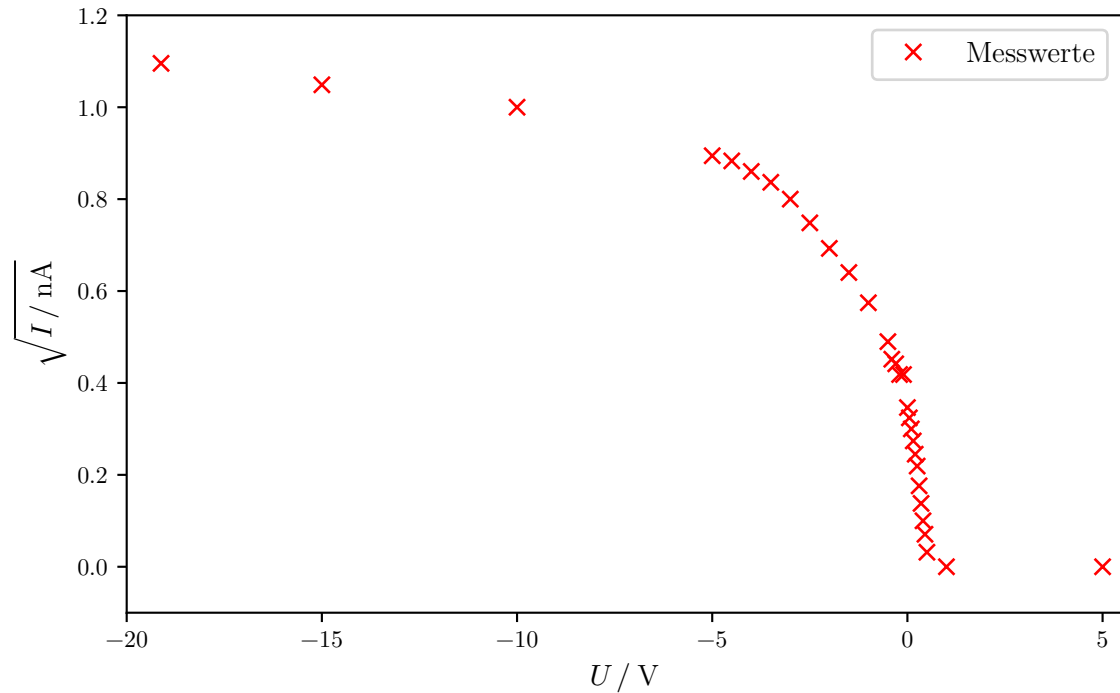


Abbildung 11: Photostrom bei Anlegen einer beschleunigenden Spannung.

Tabelle 8: Messwerte des Photostroms bei Anlegen einer beschleunigenden Spannung.

U in V	I in nA
−19,120	1,200
−15,000	1,100
−10,000	1,000
−5,000	0,800
−4,500	0,780
−4,000	0,740
−3,500	0,700
−3,000	0,640
−2,500	0,560
−2,000	0,480
−1,500	0,410
−1,000	0,330
−0,500	0,240
−0,400	0,204
−0,300	0,195
−0,100	0,175
−0,200	0,175
0,000	0,120
0,050	0,105
0,100	0,090
0,150	0,075
0,200	0,060
0,250	0,048
0,300	0,031
0,350	0,019
0,400	0,010
0,450	0,005
0,500	0,001
1,000	0,000
5,000	0,000

6 Diskussion

Für das Verhältnis $\frac{h}{e_0}$ ergibt sich im Vergleich mit den Literaturwerten für h [2] und e_0 [3]:

$$\begin{aligned}\left(\frac{h}{e_0}\right)_{\text{exp}} &= (4,84 \pm 0,45) \cdot 10^{-15} \text{ Vs} \\ \left(\frac{h}{e_0}\right)_{\text{theo}} &= 4,1357 \cdot 10^{-15} \text{ Vs} \\ \text{Abweichung: } 17,03 \, \%\end{aligned}$$

Die Abweichung ist relativ hoch, aber der experimentell bestimmte Wert befindet sich in der richtigen Größenordnung. Ursachen für die Ungenauigkeiten könnten das Weiterrechnen mit fehlerbehafteten Größen und Ungenauigkeiten beim Messprozess sein. Die Grenzspannungen sind bereits fehlerbehaftet, da sie aus Regressionen gewonnen wurden und durch diese wurde erneut eine Regression zur Bestimmung des Verhältnisses $\frac{h}{e_0}$ durchgeführt. Allerdings fällt auf, dass die Abweichung des Ergebnisses um ca. den Faktor 1,6 größer als die Standardabweichung des experimentellen Werts ist. Dies deutet auf einen systematischen Fehler hin. Weiterhin wurden während der Messung teilweise starke Schwankungen beim Photostrom festgestellt, die auf schwankende Intensität des Lichts der Spektrallampe zurückzuführen sind und die Ursache für die große Abweichung sein könnten.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuchsanleitung zu Versuch 500*. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/V500.pdf> (besucht am 04.04.2017).
- [2] National Institute of Standards und Technology. *CODATA Recommended Values*. URL: <http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?h> (besucht am 15.05.2017).
- [3] National Institute of Standards und Technology. *CODATA Recommended Values*. URL: <http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?e> (besucht am 15.05.2017).