

**VERSUCH 500**

## **Der Photoeffekt**

Tabea Hacheney  
tabea.hacheney@tu-dortmund.de

Bastian Schuchart  
bastian.schuchart@tu-dortmund.de

Durchführung: 12.04.2022

Abgabe: 19.04.2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>3</b>
2.1 Licht als Welle und Teilchen . . . . .	3
2.2 Photoeffekt nach der einsteinschen Korpuskulartheorie . . . . .	3
2.3 Experimentelle Untersuchung des Photoeffekts . . . . .	5
<b>3 Durchführung</b>	<b>7</b>
3.1 Versuchsaufbau . . . . .	7
3.2 Zusammenhang zwischen der Wellenlänge und der Maximalenergie der emittierten Elektronen . . . . .	8
3.3 Abhängigkeit des Elektronenstroms von der angelegten Spannung . . . . .	8
<b>4 Auswertung</b>	<b>9</b>
4.1 Grenzspannung . . . . .	16
4.2 Plancksche Wirkungsquantum . . . . .	16
4.3 Kurvenverlauf . . . . .	17
<b>5 Diskussion</b>	<b>18</b>
<b>Literatur</b>	<b>19</b>

# 1 Zielsetzung

Es soll anhand des Photoeffekts der Zusammenhang zwischen der Wellenlänge des Lichts und der Maximalenergie der emittierten Elektronen, sowie die Abhängigkeit des Elektronenstroms von der an der Photozelle angelegten Spannung untersucht werden.

## 2 Theorie

Beim Photoeffekt (lichtelektrischer Effekt) werden Elektronen aus einer Metalloberfläche durch Bestrahlung mit Licht gelöst.

### 2.1 Licht als Welle und Teilchen

Licht besitzt sowohl Licht- als auch Welleneigenschaften. Diese beiden Eigenschaften können durch Experimente separat nachgewiesen werden. Beim Compton-Effekt lässt sich die korpuskulare Natur nachweisen, während bei der Interferenz der Wellencharakter zum beobachten ist.

Die beiden Theorien lassen sich nicht miteinander vereinen. Dies geht allein schon aus der unterschiedlichen mathematischen Beschreibung der Phänomene hervor. Während die Teilcheneigenschaften sich mit der Newtonschen Punktmechanik beschreiben lassen, wird der Wellencharakter anhand der Maxwellschen Gleichungen (Wellengleichung) beschrieben.

Durch diese Inkonsistenz des Lichts, ist eine klassische Betrachtungsweise ausgeschlossen. Die Quantenelektrodynamik (QED) liefert hier die Möglichkeit eine widerspruchsfreie Theorie zu liefern. In dieser Theorie sind die Teilchen- Und Wellenzüge des Lichts nämlich Grenzfälle.

Jeder Grenzfall lässt sich durch eine geeignete Formel beschreiben. Die Vermischung ist eher kompliziert. Die jeweilige Annäherung der Gleichung hängt vom Experiment ab. Wenn über eine große Anzahl von Photonen gemittelt wird, wird generell das Wellenmodell verwendet und bei einer Wechselwirkung mit Materie das Teilchenmodell.

### 2.2 Photoeffekt nach der einsteinschen Korpuskulartheorie

Beim Experiment zum lichtelektrischen Effekt wird im Vakuum eine Festkörperoberfläche (vorzugsweise Metall) mit monochromatischem Licht bestrahlt. Diese Oberfläche ist die Photokathode. Ihr gegenüber ist eine Auffängerelektrode gestellt, welche ein positives Potential in Bezug auf die Photokathode besitzt. Die beiden Metallplatten sind über ein Strommessgerät miteinander verbunden.

Wenn sich Elektronen aus der Photokathode lösen, werden sie in Richtung Auffängerelektrode beschleunigt und erzeugen beim Aufprall einen Stromfluss der gemessen wird.

Durch diesen Aufbau lassen sich diese Erkenntnisse ziehen:

- Die Anzahl der gelösten Elektronen pro Zeit ist proportional zur Lichtintensität.

- Die Energie der Photoelektronen ist proportional zur Lichtfrequenz, aber nicht zur Lichtintensität.
- Es gibt eine untere Grenzfrequenz, wo der Photoeffekt nicht zu beobachten ist.

Diese Ergebnisse sind nicht mittels des Wellenmodells erklärbar. Beim Wellenmodell könnte man das Loslösen der Elektronen dadurch erklären, dass die Elektronen durch das E-Feld in Schwingung versetzt werden und die Festkörperoberfläche verlassen, sobald die Schwingungsamplitude zu groß wird. Dies würde jedoch auch bedeuten, dass Elektronen sich bei großer Wellenlänge und Intensität ebenfalls loslösen würden. Zudem sollte es eine bestimmte Frequenz geben, bei der Resonanzphänomene zu beobachten sind, wo der Photoeffekt bevorzugt auftritt. Auch müsste die Elektronenenergie mit der Lichtintensität steigen.

Eben das lässt sich alles nicht beobachten.

Nimmt man nun aber an, dass die Energie in Volumina subatomarer Größe konzentriert sind, lassen sich die Erkenntnisse des Experiments erklären. Diese Lichtquanten (Photonen) haben praktisch eine verschwindende Ausdehnung.

Nach Einstein sind diese Korpuskel identisch mit Planckschen Energiequanten.

Mit den Planckschen Energiequanten lassen sich folgende Annahmen postulieren:

- monochromatisches Licht mit einer Frequenz  $f$  besteht aus Photonen. Diese bewegen sich geradlinig mit  $c$  und haben jeweils die Energie  $hf$  (mit  $h$  = Plancksches Wirkungsquantum)
- Wenn ein Photon seine Energie auf ein Elektron überträgt, teilt sich diese in die Austrittsarbeit  $A_k$  (Energie die benötigt wird, damit sich Elektronen von der Festkörperoberfläche lösen können) und die kinetische Energie des Photons.

Mit der Energieerhaltung ergibt sich also

$$hf = E_{kin} + A_k. \quad (1)$$

Aus diesen beiden Annahmen folgt also, dass wenn

$$hf < A_k \quad (2)$$

ist, kein Photoeffekt mehr zu beobachten ist. Das lässt sich auch im Experiment beobachten.

Eine weitere Annahme ist,

- dass die Lichtintensität proportional zur Zahl der Photonen pro Zeit- und Raumwinkeleinheit ist.

Durch diese Annahme lässt sich auch die erste Erkenntnis aus dem Experiment erklären.

## 2.3 Experimentelle Untersuchung des Photoeffekts

Für die experimentelle Untersuchung wird eine Photozelle verwendet, ein evakuierter Glaskolben mit zwei Elektroden. Die Photokathode ist auf ihrer Innenseite mit einer Metall- oder Legierungsschicht aufgedampft, welche während des Experiments bestrahlt wird. Die Anode ist ein kreisförmiger Draht ring, die wenige Millimeter Abstand zur Kathodenoberfläche hat.

Die Energie lässt sich mit der Gegenfeldmethode messen. Dazu legt man eine variable Spannung  $U$  an, die abbremsendes Feld für die Elektronen erzeugt. Der gemessene Strom zwischen den Elektroden verschwindet nun spätestens dann, wenn

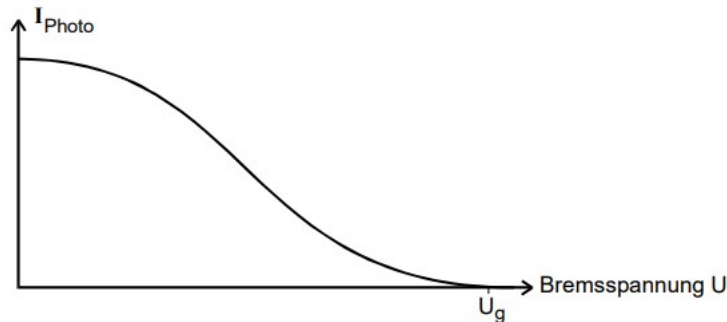
$$e_0 U_g = \frac{1}{2} m_0 v_{max}^2 \quad (3)$$

ist.  $v_{max}$  ist die Geschwindigkeit der schnellsten Elektronen,  $m_0$  die Ruhemasse des Elektrons,  $e_0$  die Elementarladung und  $U_g$  die Gegenspannung.

Für die schnellsten Elektronen gilt zudem nach Gleichung 1 und Gleichung 3 folgende Relation:

$$hf = e_0 U_g + A_k. \quad (4)$$

Durch diese Formel sollte sich dann das Verhältnis von Wirkungsquantum  $h$  zur Elementarladung  $e_0$  bestimmen lassen. Beim Experiment selbst lässt sich jedoch feststellen, dass der Photostrom nicht schlagartig bei  $U = U_g$  verschwindet, sondern bereits bei  $U < U_g$  deutlich sinkt. Die Strom-Spannungskurve hat also die in Abbildung 2 gezeigte Form. Dadurch wird die Bestimmung von  $U_g$  erschwert. Das Problem kommt dadurch



**Abbildung 1:** Photostrom in Abhängigkeit von Bremsspannung einer Photozelle bei monochromatischem Licht.[1]

zur Stande, dass die Photoelektronen eine Energieverteilung besitzen. Die Energie hängt hier davon ab, wie viel Energie sie im Festkörper vorher besessen haben.

Über diese Energieverteilung macht die Fermi-Dirac-Statistik eine Aussage. Diese besagt, dass sich die Energie der Valenzelektronen von 0 bis zur Fermi-Energie erstrecken.

Man kann zeigen, dass unter bestimmten Voraussetzung der parabolische Zusammenhang

$$I_{Ph} \sim U^2$$

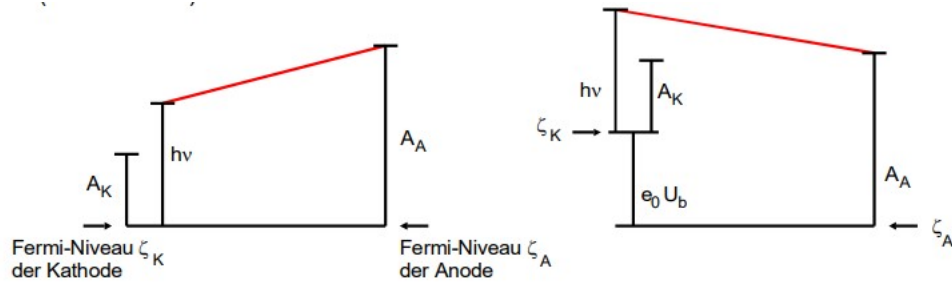
besteht. Mit diesem Zusammenhang kann man  $U_g$  erhalten, indem man  $\sqrt{I}$  gegen  $U$  aufträgt und  $U_g$  als Schnittpunkt mit der  $U$ -Achse entnimmt.

Bei der verwendeten Apparatur verwendet man falsche Ergebnisse, da nicht alle Photoelektronen die Anode erreichen, da ihre Oberfläche zu klein ist. Eine weitere Voraussetzung unter der nicht alle Photoelektronen die Anode erreichen ist, wenn das Anodenmaterial eine zu hohe Austrittsarbeit  $A_A$  hat. Wenn man zwei Metalle miteinander verbindet, stellen sich ihre Fermi-Niveaus auf gleiche Höhe ein. Es tritt also auch kein Photostrom auf (trotz  $hf > A_k$ ), wenn  $hf < A_A$  ist, da die Elektronen dann gegen ein Gegenfeld anlaufen müssten.

Es tritt also dann ein Photostrom auf, wenn

$$hf + e_0 U_b \geq A_A \quad (5)$$

gegeben ist. Hierbei ist  $U_b$  eine Beschleunigungsspannung, die gegen das Gegenfeld wirkt. Bei dem später aufgeführten Experiment kann man sogar einen negativen Strom beobachten, wenn  $U_b$  hoch genug ist. Das erschwert ebenfalls die Bestimmung von  $U_g$ , da sich der Strom mit dem Photostrom überlagert.

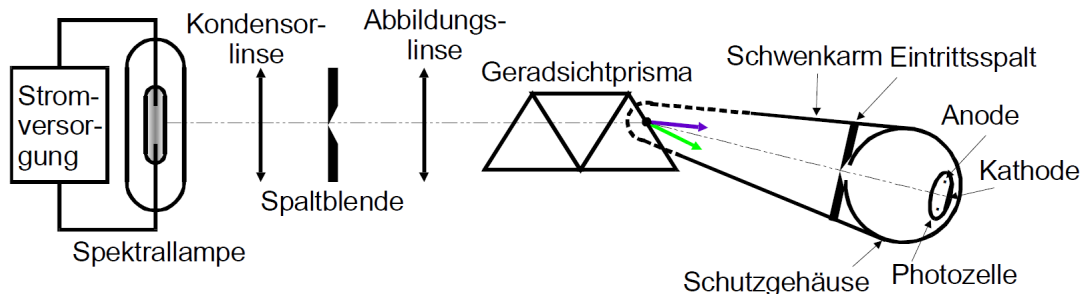


**Abbildung 2:** Abb. links: Potentialverhältnisse zwischen Anode und Kathode unter Berücksichtigung der Austrittsarbeiten von Anode und Kathode. Abb. rechts: Anlegen eines beschleunigenden Potentials  $U_b$  zur Erzeugung eines Photostroms. [1]

### 3 Durchführung

#### 3.1 Versuchsaufbau

In der Versuchsreihe wird der in Abbildung 3 gezeigte Aufbau verwendet.



**Abbildung 3:** Verwendeter Versuchsaufbau in beiden Teilversuchen (optischer Teil).[1]

Die Quecksilber-Spektrallampe wird mit Strom versorgt und erzeugt Licht mit einem für Quecksilber spezifischen Spektrum. Diese spezifischen Frequenzen sind in Abbildung 4 abzulesen.

$\lambda$ [nm]	Farbe	Intensität
577, 579	gelb	stark
546	grün	stark
492	blaugrün	gering
434, 435, 436	violett	stark
(408), 405	violett	(gering), stark
365, 366	ultraviolett	stark

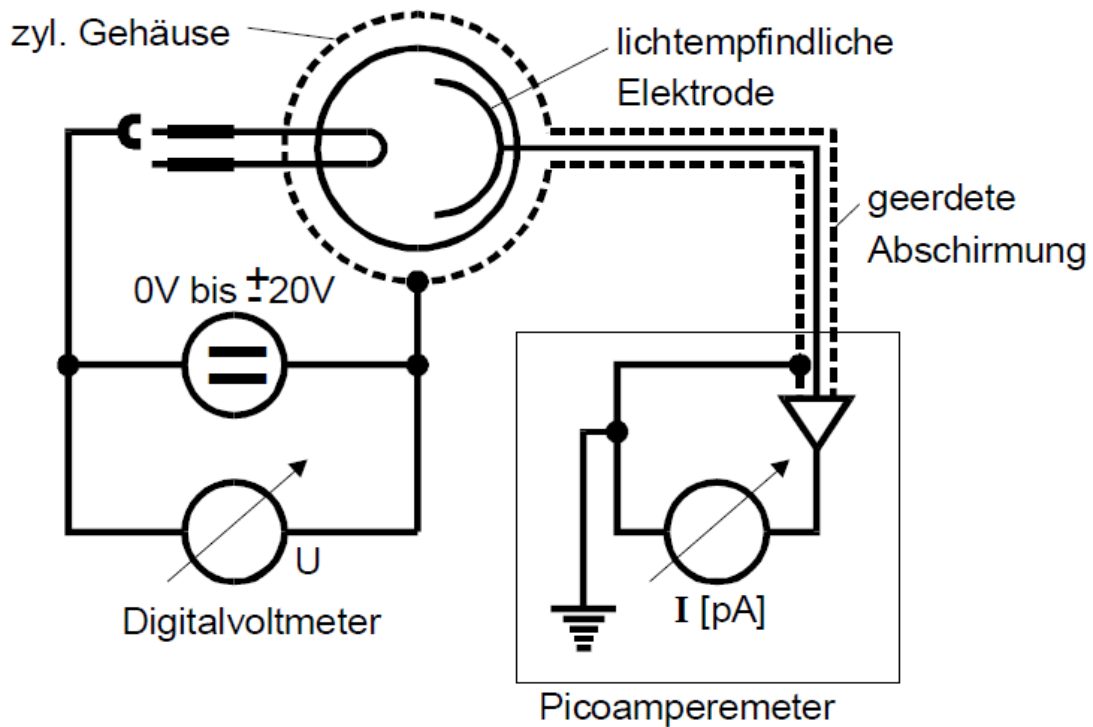
**Abbildung 4:** Die dominantesten Linien im Hg-Spektrum.[1]

Das erzeugte Licht wird in der Kondensorlinse gebündelt und fällt auf die Spaltblende. Die danach geschaltete Abbildungslinse entwirft nun ein Bild der Spaltblendenöffnung auf den Eintrittsspalt der Photokathode.

Danach durchläuft das Licht ein Geradsichtprisma, wodurch die einzelnen enthaltenen Frequenzen optisch getrennt werden. Somit sind auf der Mattscheibe vor der Photokathode nun die einzelnen Spektallinien zu beobachten.

Die Kathode kann nun mit einem Schwenkarm so geschwenkt werden, sodass jeweils nur eine Spektrallinie auf den Eintrittsspalt fällt.

Um Gegenfelder und Beschleunigungssfelder zu erzeugen und den Strom zu messen, wird außerdem der in Abbildung 5 verwendete Versuchsaufbau verwendet.



**Abbildung 5:** Verwendeter Versuchsaufbau in beiden Teilversuchen (elektrisches Schaltbild).[1]

An die Kathoden-Anoden-Strecke wird eine variable Spannung angeschlossen, wo entweder eine Bremsspannung oder eine Beschleunigungsspannung verwendet werden kann. Mit einem Picoamperemeter kann nun der Strom gemessen werden, welcher von der Kathode zur Anode fließt.

### 3.2 Zusammenhang zwischen der Wellenlänge und der Maximalenergie der emittierten Elektronen

Für die Messungen mit einer angelegten Gegenspannung werden jeweils die rote, gelbe, grüne und zwei violette Spektrallinien verwendet.

Es wird die Abhängigkeit des fließenden Stroms zur angelegten Bremspannung gemessen, bis kein Strom mehr fließt. Es werden ausreichend kleine Schritte verwendet.

### 3.3 Abhängigkeit des Elektronenstroms von der angelegten Spannung

Für das gelbe Licht ( $\lambda = 578 \text{ nm}$ ) wird der Photostrom in Abhängigkeit einer angelegten Spannung gemessen. Hier werden sowohl Beschleunigungsspannung als auch Bremsspan-



nung verwendet im Bereich von  $-20\text{ V} \leq U \leq +20\text{ V}$ . Es muss darauf geachtet werden, die Lichtintensität konstant zu halten.

## 4 Auswertung

Es werden die Bremsspannungen  $U_B$  gegen die Wurzel des Photostroms  $\sqrt{I}$  für die rote, gelbe, grüne und violette Spektrallinie aufgetragen und mit Hilfe einer durch Python berechneten Ausgleichsgeraden die Grenzspannung  $U_G$  bestimmt.

Die Messwerte für die rote Spektrallinie sind in Tabelle 1, die für die gelbe in Tabelle 2, die für die grüne in Tabelle 3 und die der ersten violetten in Tabelle 4 zu finden. Für die zweite violette Spektrallinie konnten keine Messwerte aufgenommen werden, da die Versuchsaппaratur beschädigt war.

**Tabelle 1:** Messwerte für die rote Spektrallinie.

$U_B/\text{mV}$	$I/\text{nA}$
0	0,040
20	0,030
40	0,025
60	0,020
80	0,020
100	0,020
120	0,020
220	0,010
380	0,000

**Tabelle 2:** Messwerte für die gelbe Spektrallinie.

$U_{\text{B}}/\text{mV}$	$I/\text{nA}$
0	1,000
20	0,900
40	0,810
60	0,720
80	0,640
100	0,550
120	0,475
140	0,400
160	0,350
180	0,290
200	0,230
220	0,190
240	0,150
260	0,100
280	0,100
300	0,090
320	0,060
340	0,050
360	0,040
380	0,010
400	0,010
420	0,005
440	0,000

**Tabelle 3:** Messwerte für die grüne Spektrallinie.

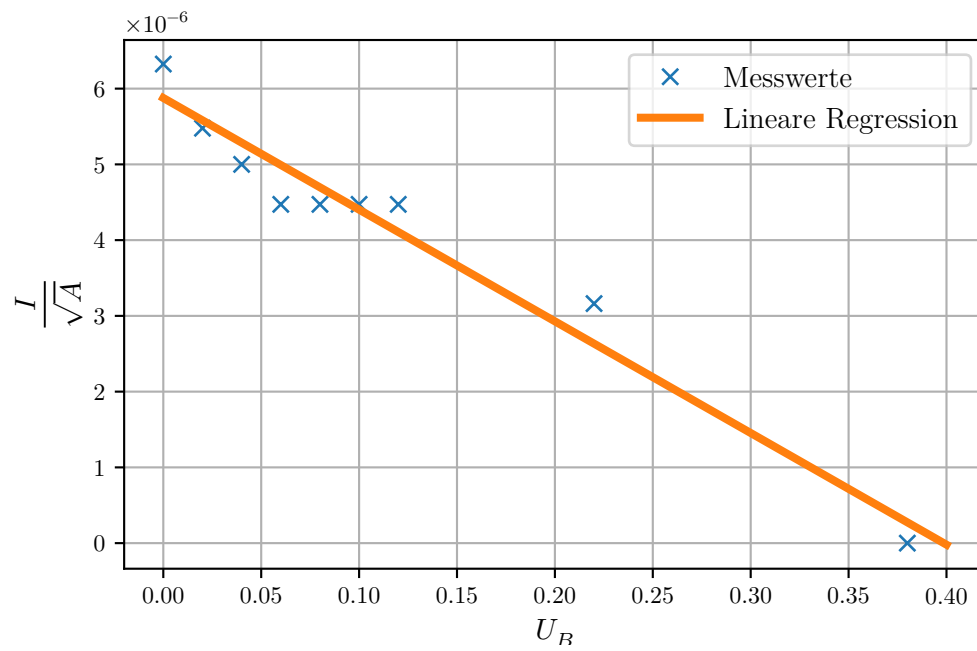
$U_{\text{B}}/\text{mV}$	$I/\text{nA}$
0	5,00
20	4,90
40	4,80
80	3,80
120	3,00
160	2,40
200	1,80
240	1,25
280	0,90
320	0,60
360	0,40
400	0,20
440	0,10
480	0,00

**Tabelle 4:** Messwerte für die erste violette Spektrallinie.

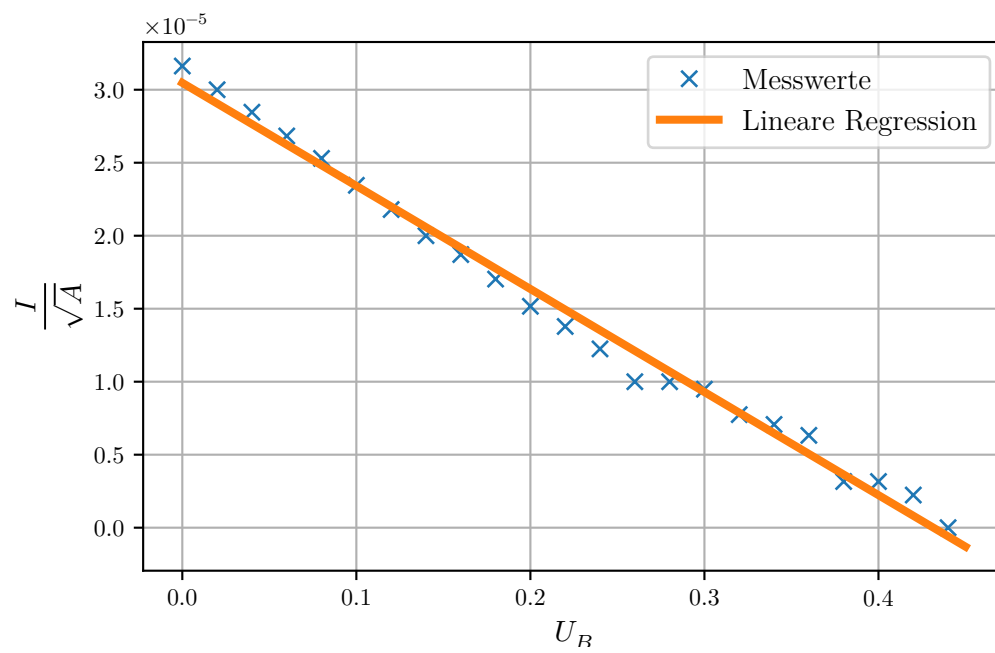
$U_B/\text{mV}$	$I/\text{nA}$
0	5,50
40	4,80
80	4,20
120	3,60
160	3,20
200	2,80
240	2,60
280	2,20
320	1,90
360	1,75
400	1,60
440	1,40
480	1,20
520	1,00
560	0,80
600	0,60
640	0,50
680	0,40
720	0,30
760	0,10
800	0,10
840	0,05
880	0,00

Die Plots mit den entsprechenden linearen Regressionen für rot, gelb, grün und violett sind in Abbildung 6, Abbildung 7, Abbildung 8 und Abbildung 9 zu finden.

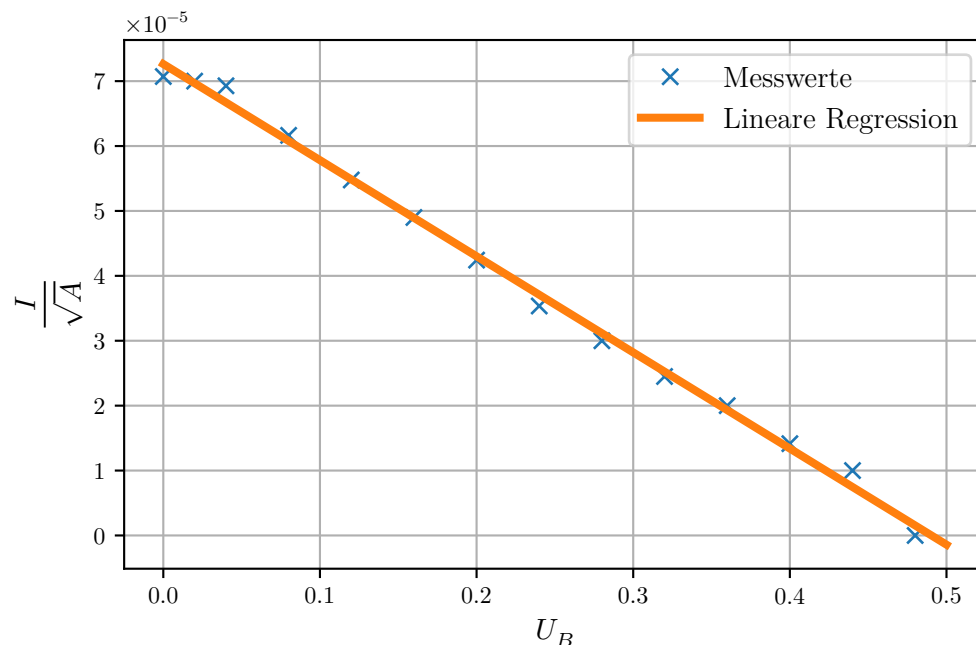
**Abbildung 6:** Photostrom in Abhängigkeit der Bremsspannung und Ausgleichsgerade für die rote Spektrallinie.



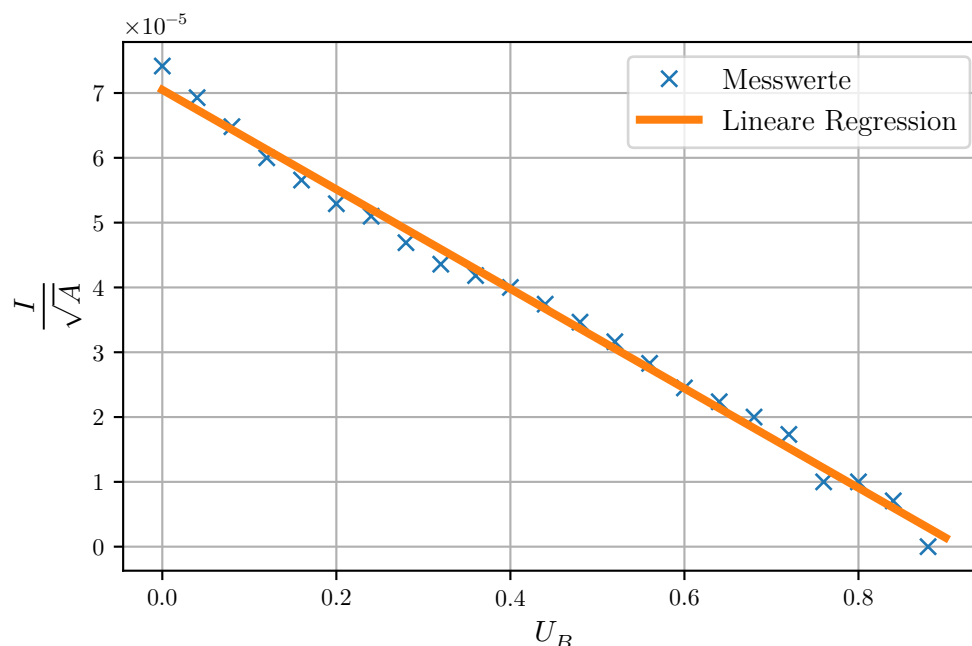
**Abbildung 7:** Photostrom in Abhängigkeit der Bremsspannung und Ausgleichsgerade für die gelbe Spektrallinie.



**Abbildung 8:** Photostrom in Abhängigkeit der Bremsspannung und Ausgleichsgerade für die grüne Spektrallinie.



**Abbildung 9:** Photostrom in Abhängigkeit der Bremsspannung und Ausgleichsgerade für die erste violette Spektrallinie.



#### 4.1 Grenzspannung

Die Ausgleichsgerade hat die Form  $\sqrt{I} = a \cdot U_B + b$ . Die Grenzspannung  $U_G$  ergibt sich aus dem Verhältnis  $-\frac{b}{a}$ . Die für  $a$  und  $b$  bestimmten Werte und die Grenzspannung  $U_G$  sind in Tabelle 5 eingetragen.

**Tabelle 5:** Werte der linearen Regression.

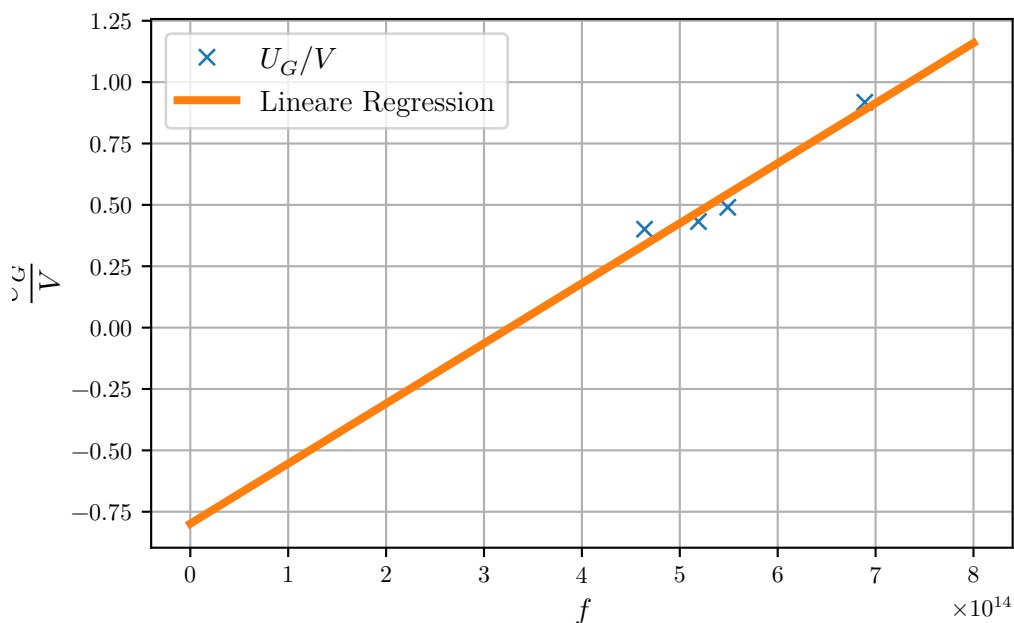
$\lambda/\text{nm}$	$a \cdot 10^{-5}$	$b \cdot 10^{-5}$	$U_G/\text{V}$
646	$-1,47 \pm 0,12$	$0,59 \pm 0,02$	$0,401 \pm 0,035$
578	$-7,06 \pm 0,15$	$3,05 \pm 0,04$	$0,432 \pm 0,011$
546	$-14,81 \pm 0,26$	$7,26 \pm 0,07$	$0,490 \pm 0,010$
435	$-7,68 \pm 0,14$	$7,05 \pm 0,07$	$0,981 \pm 0,019$

#### 4.2 Plancksche Wirkungsquantum

Nun wird die Grenzspannung in Abbildung 10 gegen die Frequenz des Lichts aufgetragen.



**Abbildung 10:** Grenzspannung gegen die Frequenz aufgetragen mit linearer Regression.



Aus der linearen Regression und Gleichung 4 ergibt sich  $a = \frac{h}{e_0}$  und  $b = A_k$ . Die Werte ermitteln sich zu

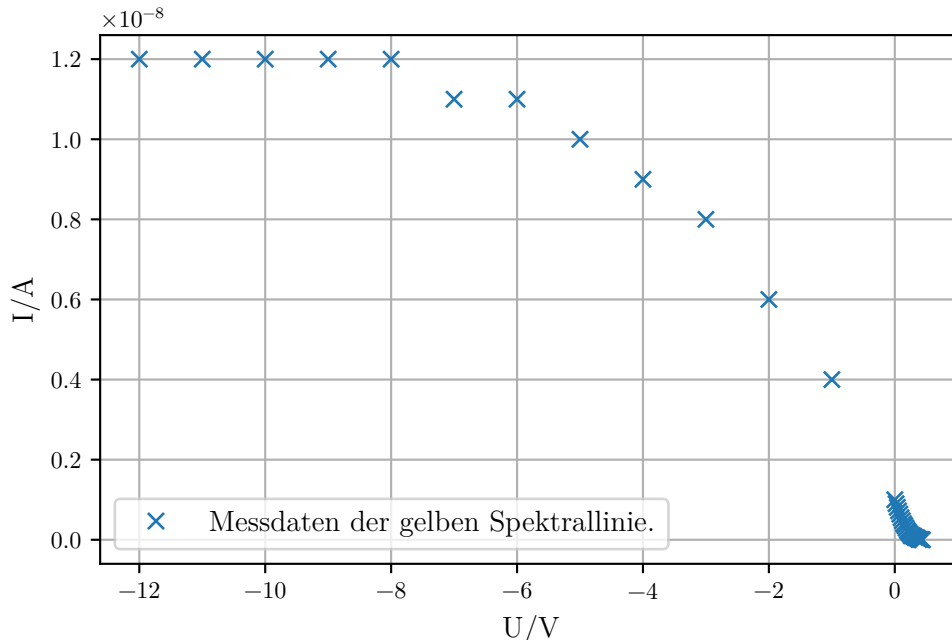
$$\frac{h}{e_0} = (2,4 \pm 0,4) \cdot 10^{-15} \text{Vs}$$

$$A_k = (0,80 \pm 0,23) \text{eV}.$$

### 4.3 Kurvenverlauf

In Abbildung 11 ist der Photostrom gegen die Brems- bzw. Beschleunigungsspannung von ca.  $-12\text{V}$  bis  $0,2\text{V}$  aufgetragen.

**Abbildung 11:** Photostrom in Abhängigkeit der Spannung für die gelbe Spektrallinie.



Die Kurve entspricht den Erwartungen. Für hohe Beschleunigungsspannungen nähert sich die Kurve asymptotisch einem Sättigungswert an. Für Spannungen die gegen die Grenzspannung  $U_G$  gehen, geht der Photostrom gegen Null. Dieser Umstand lässt sich dadurch erklären, dass die Elektronen energetisch verteilt sind und deshalb schon bei  $U < U_G$  sich Null annähern. Da die Lichtintensität konstant ist, kann nur eine begrenzte Anzahl von Elektronen losgelöst werden, so dass die Kurve sich einem Sättigungswert annähert.

## 5 Diskussion

Insgesamt haben sich Werte zwischen 0,4 bis ca. 1 V bestimmen lassen, die im realistischen Bereich für die Grenzspannungen liegen. Das Plancksche Wirkungsquantum durch die Elementarladung wurden zu  $\frac{h}{e_0} = 2,4 \cdot 10^{-15} \text{ V s}$  bestimmt. Dadurch ergibt sich eine Abweichung zum Theoriewert  $\frac{h}{e_0} = 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ V s}$  von 72,5%. Die Abweichung ist relativ hoch und lässt sich auf den beschädigten Aufbau zurückführen. So war der Auslenkarm der Photozelle nicht orthogonal zum Tisch, so dass das Intensitätsmaximum der Spektrallinien nicht auf die Photozelle traf. Dadurch sind alle Werte zu klein. Obwohl die quantitativen Aussagen nur grob überprüfbar waren, sind die qualitativen Zusammenhänge des Photoeffekts eindeutig zeigbar.

## Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuch Photoeffekt, V500*. 2014.