

**V500**

# **Das Photoeffekt**

Amelie Hater

amelie.hater@tu-dortmund.de

Ngoc Le

ngoc.le@tu-dortmund.de

Durchführung: 11.06.2024

Abgabe: 18.06.2024

TU Dortmund – Fakultät Physik

# **Inhaltsverzeichnis**

<b>1 Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>3</b>
2.1 Vorbereitungsaufgaben . . . . .	4
<b>3 Durchführung</b>	<b>5</b>
<b>4 Auswertung</b>	<b>6</b>
4.1 Strom-Spannungs Kennlinie und Beleuchtungsstärke . . . . .	6
4.2 Grenzspannungen für verschiedene Wellenlängen . . . . .	7
4.3 Planck-Konstante und Austrittsarbeit des Kathodenmaterials . . . . .	11
<b>5 Diskussion</b>	<b>13</b>
<b>Literatur</b>	<b>13</b>
<b>Anhang</b>	<b>15</b>
Originaldaten . . . . .	15

## 1 Zielsetzung

Das Ziel des Versuchs ist die Auseinandersetzung mit dem Photoeffekt. Dazu wird die Strom-Spannungskennlinie einer Photozelle gemessen und das Plancksche Wirkungsquantum bestimmt.

## 2 Theorie

Grundlegend für den Versuch ist der Lichtelektrische Effekt. Dieser beschreibt das Auslösen von Elektronen aus einem Metall durch Licht. Dieser kann außerdem dazu verwendet werden das Plancksche Wirkungsquantum  $h$  zu bestimmen. Notwendig dafür ist die Relation

$$E_\gamma = h \cdot \nu \quad (1)$$

$E_\gamma$  ist Strahlungsenergie eines Photons und  $\nu$  ist die Frequenz des Photons. Wird ein Metall mit Licht bestrahlt, kann die Energie eines Lichtquants nur auf einmal ganz an ein Elektron im Metall abgegeben werden. Falls diese Energie größer ist als die Austrittsarbeit des Metalls löst sich das Elektron aus dem Metall. Im Versuch ist zwischen dem bestrahlten Metall und einer Anode ein Gegenfeld aufgebaut. Durch die Variation der Spannung des Gegenfeldes kann die kinetische Energie bestimmt werden, die die Elektronen nach deren Austreten haben. Es gilt :

$$E_{\text{kin}} = e \cdot U_g. \quad (2)$$

Die gesamte Energiebilanz ist

$$E_\gamma = \Phi + e \cdot U_g \quad (3)$$

mit  $\Phi$  als materialspezifische Austrittsarbeit. Eine schematische Darstellung des Photoeffekts mit Gegenfeld ist in Abbildung (1) zu sehen.

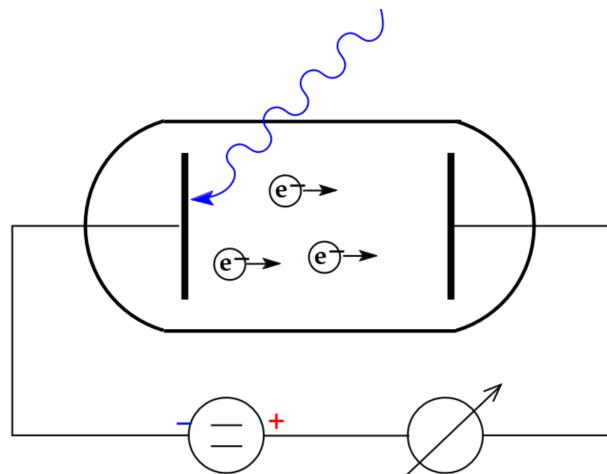
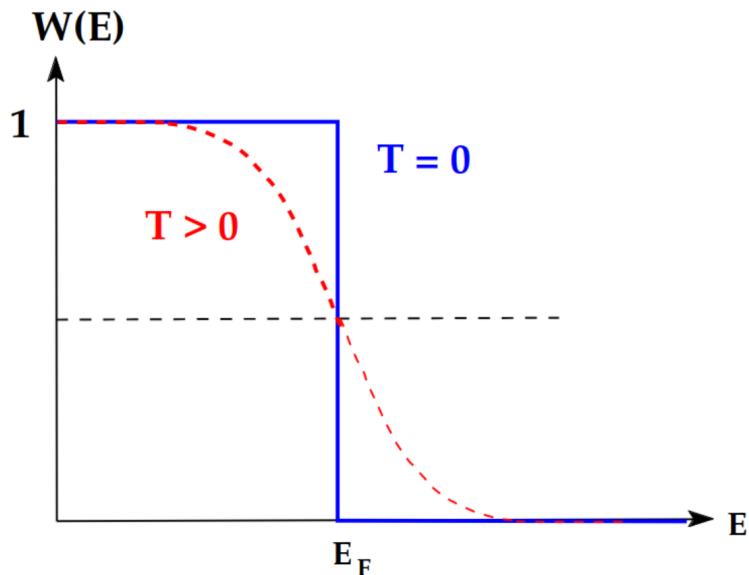


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Photoeffekts und einem Gegenfeld. Q[1]

Bei der Durchführung der Bestrahlung der Metallplatte mit Licht werden verschiedene Eigenschaften des Photoeffekts deutlich. Der Photostrom ist instantan mit der Bestrahlung des Metalls messbar. Außerdem ist die Anzahl der ausgelösten Elektronen direkt proportional zur Lichtintensität bei einer festen Frequenz. Zudem gibt es für jedes Material eine feste Grenzfrequenz, ab der Elektronen ausgelöst werden. Diese Grenzfrequenz ist unabhängig von der Lichtintensität. Die Energieverteilung der Elektronen hängt von der verwendeten Lichtfrequenz ab. Die klassische Interpretation des Lichts als elektromagnetische Welle kann allein die Eigenschaft erklären, dass die Anzahl der ausgelösten Elektronen direkt proportional zu der Intensität des einstrahlenden Lichtes abhängt. Daher müssen quantenmechanische Erklärungen verwendet werden. Ein wichtiger Faktor ist, dass die Elektronen im Material bereits eine bestimmte Energie besitzen, die durch die Fermi-Dirac Verteilung gegeben ist. Diese Verteilung ist in Abbildung (2) zu sehen.



**Abbildung 2:** Wahrscheinlichkeit, dass ein Zustand mit bestimmter Energie im thermischen Gleichgewicht ist. Q[1]

## 2.1 Vorbereitungsaufgaben

Zur Vorbereitung sollen die ausgetrahlten Wellenlängen einer Hg-Hochdrucklampe recherchiert werden. Die Wellenlängen sind zusammen mit den entsprechenden Farben, Frequenzen und Energien in Tabelle (1) aufgelistet.

**Tabelle 1:** Von Hg-Lampe emittierte Wellenlängen mit Frequenz  $\nu$  und Energie im Bereich des sichtbaren Lichts. Q[2]

Farbe	Wellenlänge [nm]	$\nu$ [THz]	Energie [eV]
violett	408	735,18	3,04
blau	435	687,87	2,84
cyan	492	609,83	2,52
grün	546	549,00	2,27
orange	577	519,61	2,15

In Tabelle (2) ist die Austrittsarbeit des Kathodenmaterials aufgelistet.

**Tabelle 2:** Austrittsarbeit des Kathodenmaterials mit zugehöriger Wellenlänge. Q[3]

Metall	Austrittsarbeit [eV]	Wellenlänge [nm]
Cs	1,7 - 2,14	579 - 729
Ka	2,25	551,04
W	4,54 - 4,60	269,53 - 273,09
Pt	5,32 - 5,66	219,05 - 233,05

Zudem wird die Gegenstandsweite  $g$  der ersten Sammellinse zu 10 cm abgeschätzt.

### 3 Durchführung

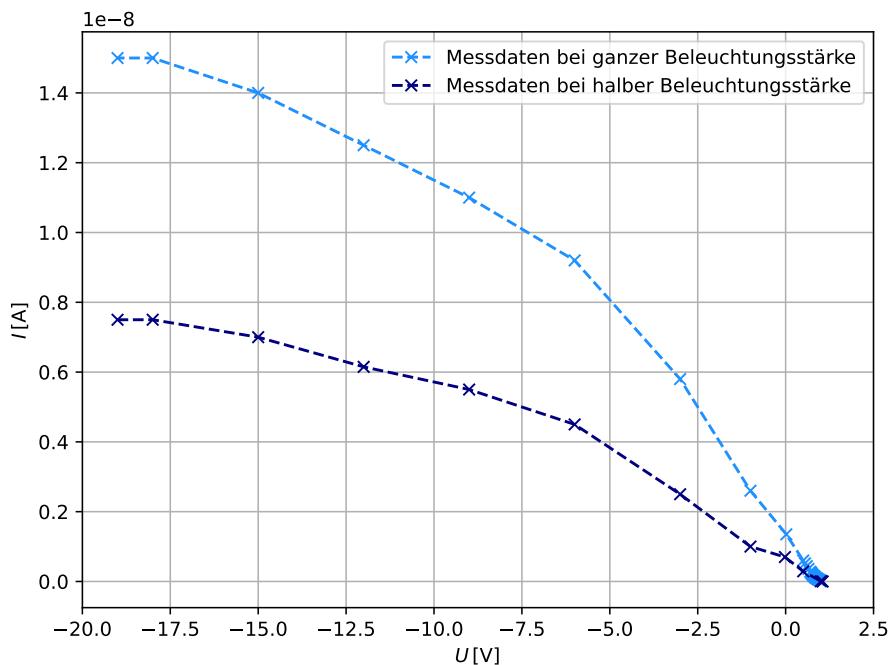
Zuerst wird der Versuchsaufbau so justiert, dass das Lichtspektrum der Hg-Lampe scharf auf der Photozelle abgebildet wird. Danach wird der Photostrom  $I$  in Abhängigkeit von der Spannung des Gegenfeldes der Photozelle  $U$  gemessen innerhalb eines Bereiches von  $-2$  bis  $19$  V. Für die ersten Messwerte wird eine geringe Schrittweite von  $0,2$  V verwendet, für die folgenden Messwerte eine Schrittweite von  $3$  V. Diese Messung wird bei einer bestimmten Wellenlänge des Spektrums durchgeführt. Nach der Messung wird der Spalt neu eingestellt, sodass die halbe Intensität im Vergleich zur ersten Messreihe erreicht wird. Die bei diesen Einstellungen vorgenommene Messreihe hat eine Schrittweite von  $3$  V im gesamten Messbereich. Danach wird eine neue Spektrallinie vermessen. Bei dieser Messung und bei allen folgenden werden ungefähr  $10$  Messwerte aufgenommen mit einer Schrittweite von  $0,2$  V beginnend bei der Spannung für die der korrespondierende Photostrom  $0$  ist. Diese Messung wird für  $3$  unterschiedliche Spektrallinien durchgeführt.

## 4 Auswertung

### 4.1 Strom-Spannungs Kennlinie und Beleuchtungsstärke

Die gemessenen Photoströme und die zugehörigen Spannungen bei vollständiger Beleuchtungsstärke sind in der Tabelle (3) aufgelistet. Zusätzlich sind die Photostrome bei einer halben Beleuchtungsstärke in der Tabelle (4) aufgeführt. Für die Auswertung werden allerdings diese und die folgenden Spannungen der Messungen mit (-1) multipliziert, damit für die Berechnung der Planck-Konstante das richtige Vorzeichen herauskommt. Jedoch wird durch das wechselnde Vorzeichen der Spannungen die weitere Auswertung qualitativ nicht beeinträchtigt. Diese Umrechnung hätte durch umschalten des Schaltbilds verhindert werden können.

Mithilfe der beiden Messreihen werden zwei Strom-Spannungs Kennlinien in der Abbildung (3) graphisch dargestellt. Der Verlauf dieser beiden Messreihen entspricht den Erwartungen. Bei einer höheren Beschleunigungsspannung nähert sich der Photostrom asymptotisch dem Maximum an. Wenn die Spannung sich der Grenzspannung annähert, nimmt der Photostrom quadratisch ab. Dieser Verlauf wird in der Abbildung (5) genauer dargestellt. Außerdem ist anhand der Abbildung (3) zu erkennen, dass der Photostrom sich mit einem kleinen Spalt bzw. mit einer kleineren Beleuchtungsstärke, ebenfalls verkleinert, was ebenfalls den Erwartungen entspricht.



**Abbildung 3:** Strom-Spannungs Kennlinien der blauen Linien bei zwei verschiedenen Beleuchtungsstärken.

**Tabelle 3:** Gemessene Photoströme in Abhängigkeit der Spannung bei ganzer Beleuchtungsstärke für die blaue Linie.

$U$ [V]	$I$ [nA]	$U$ [V]	$I$ [nA]	$U$ [V]	$I$ [nA]
-1,05	0	-0,80	0,160	-0,02	1,350
-1,00	0,030	-0,78	0,175	1,00	2,600
-0,96	0,038	-0,76	0,200	3,00	5,800
-0,94	0,052	-0,74	0,230	6,00	9,200
-0,92	0,062	-0,72	0,255	9,00	11,00
-0,90	0,078	-0,70	0,280	12,00	12,50
-0,88	0,090	-0,65	0,360	15,00	14,00
-0,86	0,105	-0,60	0,440	18,00	15,00
-0,84	0,115	-0,55	0,520	19,00	15,00
-0,82	0,140	-0,50	0,600		

**Tabelle 4:** Gemessene Photoströme in Abhängigkeit der Spannung bei halber Beleuchtungsstärke für die blaue Linie.

$U$ [V]	$I$ [nA]	$U$ [V]	$I$ [nA]
19,00	7,50	3,00	2,50
18,00	7,50	1,00	1,00
15,00	7,00	0,02	0,70
12,00	6,15	-0,50	0,29
9,00	5,50	-1,00	0,07
6,00	4,50	-1,05	0

## 4.2 Grenzspannungen für verschiedene Wellenlängen

In den Abbildungen (4), (5), (6) und (7) sind die Messdaten des linearen Verlaufs des Photostroms für verschiedene Wellenlängen dargestellt. Hierfür ist  $\sqrt{I}$  gegen  $U$  aufgetragen und es wird jeweils eine Ausgleichsgerade eingezeichnet. Mithilfe dieser Abbildungen lassen sich die verschiedenen Grenzspannungen in Abhängigkeit der Wellenlänge bestimmen. Die zugehörigen Messdaten sind in den Tabellen (5), (3), (6) und (7) aufgelistet. Die Ausgleichsgeraden entsprechen der Form

$$\sqrt{I} = m \cdot U + b.$$

Daraus ergibt sich für die Grenzspannung

$$U_G = \frac{-b}{m}.$$

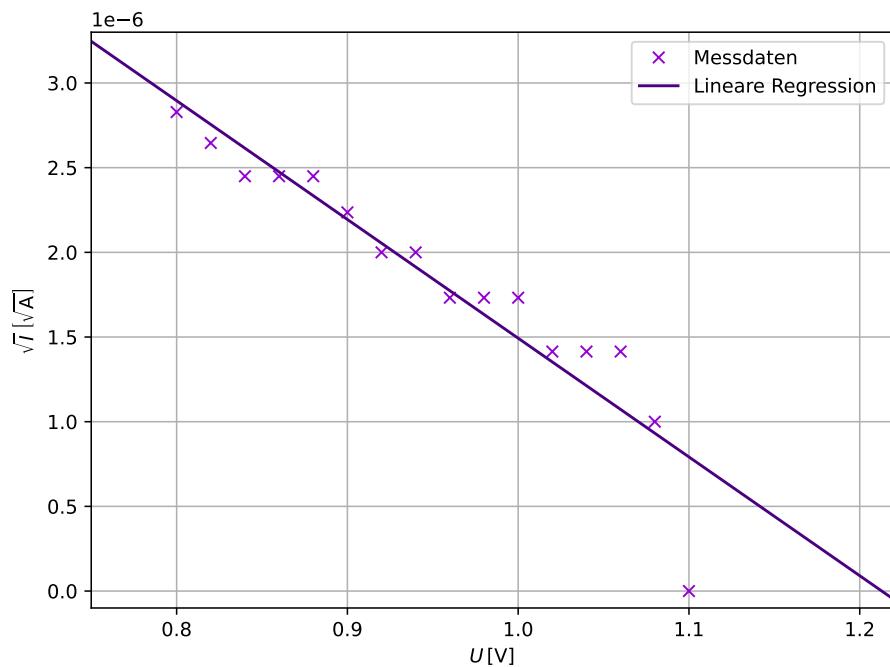
Demnach ergeben sich die folgenden Grenzspannungen

$$U_{G, \text{ violett}} = (1,21 \pm 0,15) \text{ V}$$

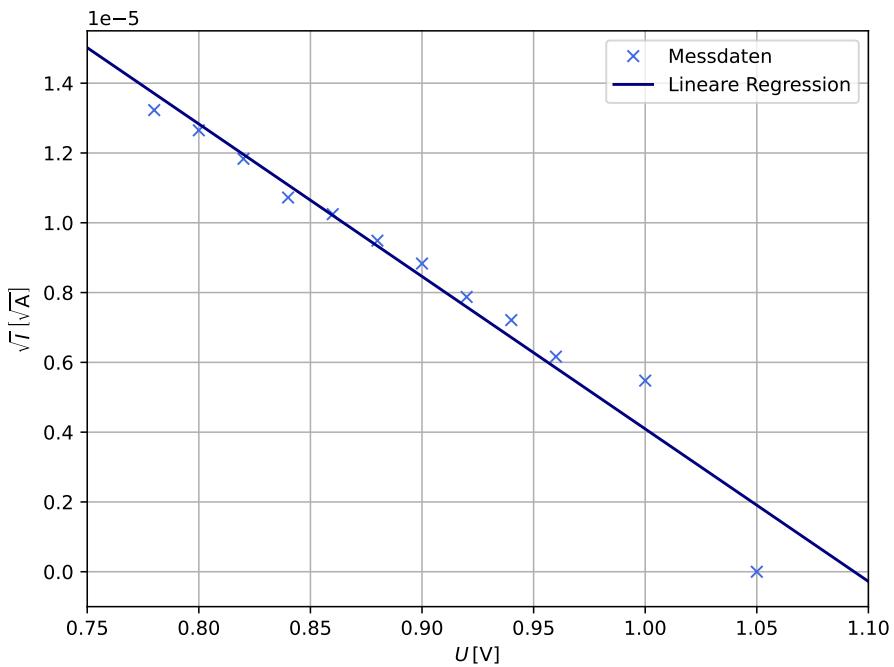
$$U_{G, \text{ blau}} = (1,09 \pm 0,10) \text{ V}$$

$$U_{G, \text{ grün}} = (0,62 \pm 0,07) \text{ V}$$

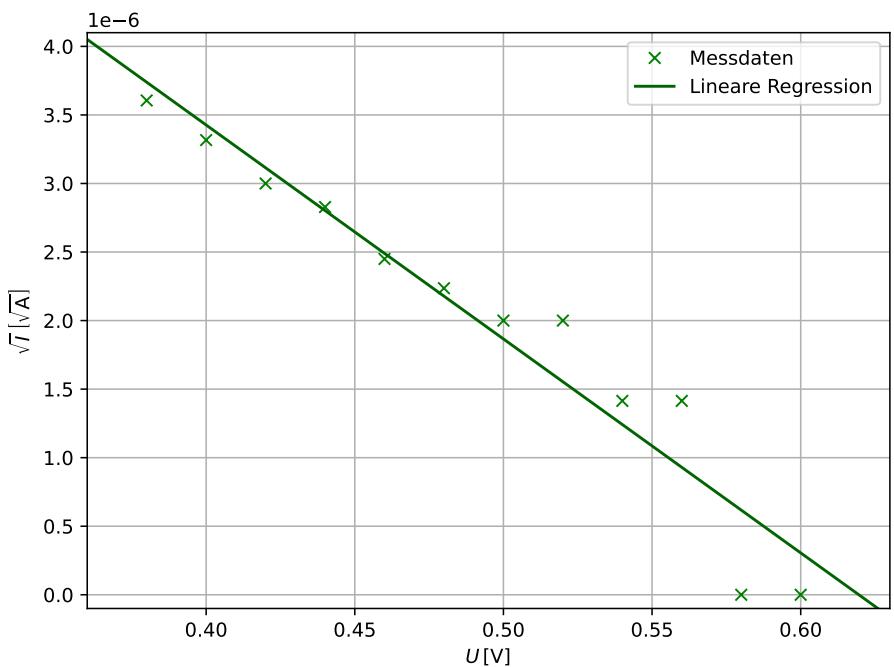
$$U_{G, \text{ orange}} = (0,54 \pm 0,04) \text{ V}.$$



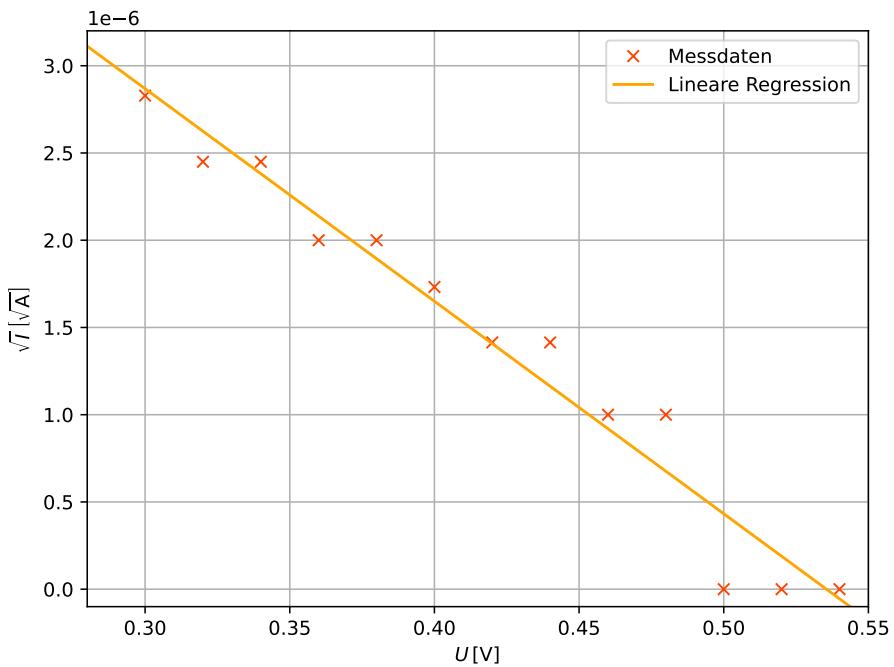
**Abbildung 4:** Graphische Darstellung der Messreihe und Ausgleichsgerade für die violette Linie.



**Abbildung 5:** Graphische Darstellung der Messreihe und Ausgleichsgerade für die blaue Linie.



**Abbildung 6:** Graphische Darstellung der Messreihe und Ausgleichsgerade für die grüne Linie.



**Abbildung 7:** Graphische Darstellung der Messreihe und Ausgleichsgerade für die orangene Linie.

**Tabelle 5:** Gemessene Photoströme in Abhängigkeit der Spannung für die violette Linie.

$U [\text{V}]$	$I [\text{pA}]$	$U [\text{V}]$	$I [\text{pA}]$
-1.10	0	-0.94	4
-1.08	1	-0.92	4
-1.06	2	-0.90	5
-1.04	2	-0.88	6
-1.02	2	-0.86	6
-1.00	3	-0.84	6
-0.98	3	-0.82	7
-0.96	3	-0.80	8

**Tabelle 6:** Gemessene Photoströme in Abhängigkeit der Spannung für die grüne Linie.

$U$ [V]	$I$ [pA]	$U$ [V]	$I$ [pA]
-0.6	0	-0.48	5
-0.58	0	-0.46	6
-0.56	2	-0.44	8
-0.54	2	-0.42	9
-0.52	4	-0.40	11
-0.50	4	-0.38	13

**Tabelle 7:** Gemessene Photoströme in Abhängigkeit der Spannung für die orangene Linie.

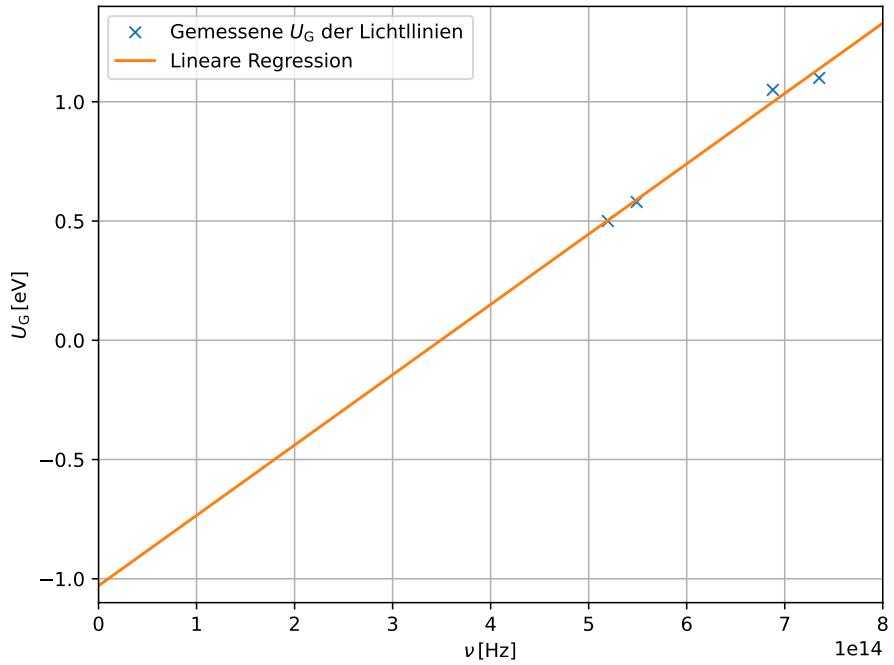
$U$ [V]	$I$ [pA]	$U$ [V]	$I$ [pA]
-0.54	0	-0.40	3
-0.52	0	-0.38	4
-0.50	0	-0.36	4
-0.48	1	-0.34	6
-0.46	1	-0.32	6
-0.44	2	-0.30	8
-0.42	2		

#### 4.3 Planck-Konstante und Austrittsarbeit des Kathodenmaterials

Um die Plank-Konstante und die Austrittsarbeit zu bestimmen, werden die Grenzspannungen benötigt. Zunächst werden die Grenzspannungen betrachtet, welche anhand der jeweiligen Tabellen abgelesen werden. Diese werden anschließend gegen die Frequenz  $\nu$  aufgetragen und eine Ausgleichsgerade wird eingezeichnet. Die zugehörigen Frequenzen sind in der Tabelle (1) aufgeführt. Die Ausgleichsgerade ergibt sich aus den Gleichungen (1) und (3), weswegen die Steigung der Planck-Konstante in eVs und der Betrag vom  $y$ -Achsen Abschnitt der Austrittsarbeit  $\Phi_A$  in eV entspricht. Daraus folgt

$$h_{\text{exp},1} = (2,95 \pm 0,25) \text{ eV s}$$

$$\Phi_{A,\text{exp},1} = (1,03 \pm 0,16) \text{ eV}.$$

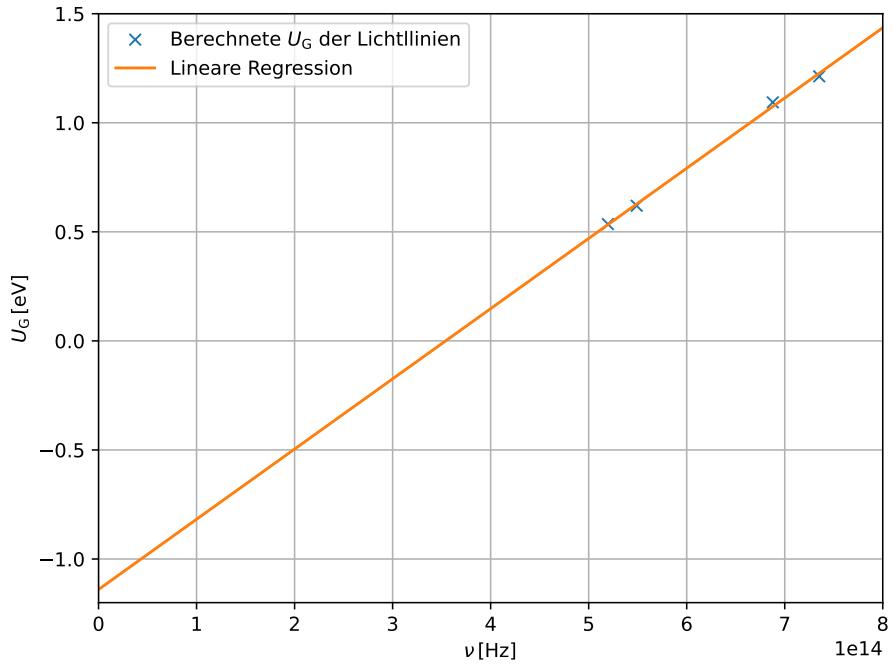


**Abbildung 8:** Gemessene Grenzspannungen in Abhangigkeit der Frequenz mit einer Ausgleichsgerade.

Bei der zweiten Methode wird die Planck-Konstante sowie die Austrittsarbeit mithilfe der berechneten Grenzspannungen aus den Ausgleichsgeraden in (4.2) berechnet. Damit werden wie bei der ersten Methode die Grenzspannungen gegen die Frequenz aufgetragen und eine Ausgleichsgerade durchgezogen. Durch die Ausgleichsgerade ergeben sich die Werte

$$h_{\text{exp},2} = (3,219 \pm 0,098) \text{ eV s}$$

$$\Phi_{A,\text{exp},2} = (1,14 \pm 0,06) \text{ eV}.$$



**Abbildung 9:** Berechnete Grenzspannungen in Abhängigkeit der Frequenz mit einer Ausgleichsgerade.

## 5 Diskussion

Für die Grenzspannungen sind keine Theoriwerte vorhanden. Allerdings liegen die abgelesenen Grenzspannungen im Fehlerbereich der berechneten Grenzspannungen durch die Ausgleichsgeraden. Jedoch fällt beim Vergleichen der Planck-Konstante und der Austrittsarbeit auf, dass die berechneten Grenzspannungen bessere Werte erzielen. Für die Planck-Konstante ergibt sich eine relative Abweichung von 28,7 % für die Methode mit den abgelesenen Grenzspannungen. Dahingegen ergibt sich mit den berechneten Grenzspannungen eine relative Abweichung von 22,2 % zur Planck-Konstante.

Laut der Anleitung [1] besteht die Kathode aus einer oxidierten Silberschicht, auf der Kalium aufgebracht ist. Daher werden die Austrittsarbeiten mit den Theoriwerten  $\Phi_{A, Ag} = 4,05 - 4,60$  und  $\Phi_{A, K_a} = 2,25$  verglichen Q[3]. Mithilfe der gemessenen Grenzspannungen lautet die Abweichung im Vergleich zu Eisen 74,6 % – 77,6 % und im Vergleich zu Kalium 54,3 %. Für die berechneten Werte sind die relativen Abweichung 71,9 % – 75,2 % von Eisen und 49,3 % von Kalium. Diese Abweichungen könnten daran liegen, dass die Metallschicht der Kathode verunreinigt sein könnte.

## Literatur

- [1] Unknown. *Der Photoeffekt*. TU Dortmund, Fakultät Physik. 2024.

- [2] Siegfried Finke. *Versuchsanleitungen zum Anfänger-Praktikum in Physik. Bd. 21.* Fachbereich Physik Universität Dortmund. 1988.
- [3] chemie.de. *Austrittsarbeiten*. URL: <https://www.chemie.de/lexikon/Austrittsarbeiten.html> (besucht am 16.06.2024).

## Anhang

### Originaldaten

VS00 - Fotoeffekt		91.06.2021
Spannung [V]	Photostrom I	
-1	<del>2</del> $\cdot \frac{0,1}{10} \text{ nA}$	
<del>-0,98</del>	<del>3</del>	
-0,96	3,8	
-0,94	5,2	
-0,92	6,2	
-0,90	7,8	
-0,88	9	
-0,86	$\overline{1,015} \cdot \frac{0,3}{3} \text{ nA}$	
-0,84	1,15	
-0,82	1,9	
-0,80	1,6	
-0,78	1,75	
-0,76	2	
-0,74	2,3	
-0,72	2,55	
-0,70	2,8	
-0,68	$\overline{3,6} \cdot \frac{1}{10} \text{ nA}$	
-0,66	4,4	
-0,65	5,2	
-0,60	6	
-0,02	$\overline{1,35} \cdot \frac{3}{3} \text{ nA}$	
1,00	2,6	
3,00	$\overline{5,8} \cdot \frac{70}{70} \text{ nA}$	
<hr/>		
10 = 0,1		
2 = $\frac{0,1}{10} \cdot 2$		

6,00	<u>9,2</u>	
9,00	<u>1,1</u>	$\cdot \frac{0,03}{3} \mu A$
12,00	<u>1,25</u>	
15,00	<u>1,4</u>	
18,00	<u>1,5</u>	
19 <del>1,00</del>	<u>1,5</u>	
halbe Intensität:		$19 V \quad 0,75 \cdot \frac{0,03}{3} \mu A$
<del>48 ✓</del>		
Spannung [V]		
18	$0,75 \cdot \frac{0,03}{3} \mu A$	
15	0,70	
12	0,55 <del>15</del>	
9	0,55	
6	0,45	
3	0,25	
1	$\frac{0,1}{7} \frac{1}{10} nA$	
0,02	$\frac{0,1}{7} \frac{1}{10} nA$	
-0,15	$\frac{0,1}{7} \frac{1}{10} nA$	
-1	$\frac{0,1}{7} \frac{1}{10} nA$	
-1,05	0	

## Grüne Linie

Spannung [V]	Ström
-0,6	0
-0,58	0 $\cdot \frac{0,1}{10} \text{ uA}$
-0,56	0,2
-0,54	0,2
-0,52	0,4
-0,50	0,4
-0,48	0,5
-0,46	0,6
-0,44	0,8
-0,42	0,9
-0,40	1,1
-0,38	1,3

## Orange Linie

Spannung [V]	Ström
-0,54	0
-0,52	0
-0,50	0
-0,48	0,1 $\cdot \frac{0,1}{10} \text{ uA}$
-0,46	0,1
-0,44	0,2
-0,42	0,2
-0,40	0,3
-0,38	0,4
-0,36	0,4
-0,34	0,6
-0,32	0,6
-0,30	0,8

Viollette - Linie

Spannung [V]

-1,10

-1,08

-1,06

-1,04

-1,02

-1,00

-0,98

-0,96

-0,94

-0,92

-0,90

-0,88

-0,86

-0,84

-0,82

-0,80

Spannung

0

0,1  $\cdot \frac{0,1}{10}$  und

0,2

0,2

0,2

0,3

0,3

0,4

0,4

0,5

0,6

0,6

0,7

0,8

ML