

V500

## Der Photoeffekt

Philip Jaletzky  
philip.jaletzky@udo.edu

Matthias Maile  
matthias.maile@udo.edu

Durchführung: 27.04.2021

Abgabe: 04.05.2021

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Theorie</b>	<b>3</b>
1.1	Theoretische Betrachtung des Lichtes . . . . .	3
1.2	Der Photoeffekt und die Erklärung im Kontext der Korpuskulartheorie . .	3
<b>2</b>	<b>Durchführung</b>	<b>4</b>
2.1	Die Photozelle . . . . .	4
2.2	Energiemessung mit der Gegenfeldmethode . . . . .	5
2.3	Fehlerquelle: Fermi-Dirac-Statistik . . . . .	6
2.4	Fehlerquelle: Hohe Austittsarbeit der Anode . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Auswertung</b>	<b>7</b>
3.1	Bestimmung der Gegenspannung $U_g$ . . . . .	7
3.1.1	Gelbe Spektrallinie . . . . .	8
3.1.2	Grüne Spektrallinie . . . . .	10
3.1.3	Erste violette Spektrallinie . . . . .	12
3.1.4	Zweite violette Spektrallinie . . . . .	14
3.2	Bestimmung von $\frac{h}{e}$ und der Austrittsarbeit $A_k$ . . . . .	15
3.3	Kurvenverlauf . . . . .	16
<b>4</b>	<b>Diskussion</b>	<b>17</b>
	<b>Literatur</b>	<b>18</b>

## Zielsetzung

In diesem Versuch soll mit dem photoelektrischen Effekt die Natur des Lichtes im Hinblick auf seinen Teilchencharakter untersucht werden.

## 1 Theorie

### 1.1 Theoretische Betrachtung des Lichtes

Für die Deutung verschiedener Beobachtungen sind zwei verschiedene Theorien über die Natur des Lichtes entstanden: Während für Versuche wie die Compton-Streuung oder die Paarbildung das Licht als quantisierte, diskrete “Energiepakete” aufgefasst wird, können Phänomene wie Beugung und Interferenz nur mit einem Wellencharakter erklärt werden. Die beiden Modelle sind widersprüchlich; das folgt schon aus der mathematischen Beschreibung. Während für Streuprozesse die Newtonsche (bzw. relativistische) Punktmechanik verwendet wird, folgt die Wellenmechanik aus den Maxwellgleichung. Eine widerspruchsfreie Theorie, die beide Fälle vereint, ist die Quantenelektrodynamik, wobei dort Korpuskel- und Wellenmodell als Grenzfälle enthalten sind. Allgemein kann man sagen, dass wenn eine große Anzahl Photonen betrachtet wird (zum Beispiel bei der räumlichen Ausbreitung des Lichtes), die Wellentheorie ausreichend gute Ergebnisse erzielt. Bei Interaktion mit Materie, wie bei Emission und Absorption, stellt die Korpuskeltheorie eine gute Näherung dar.

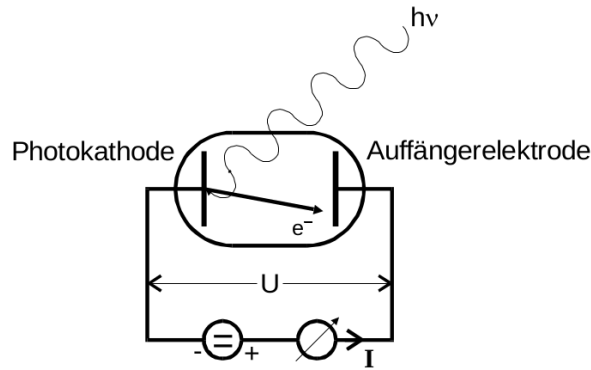
### 1.2 Der Photoeffekt und die Erklärung im Kontext der Korpuskulartheorie

Unter dem Photo- oder lichtelektrischen Effekt wird die Auslösung von Elektronen aus Metall bei Bestrahlung mit Licht verstanden. Die erste qualitative Erklärung kam von Einstein im Jahre 1905, diese beruhte auf der Korpuskulartheorie des Lichts, also der Betrachtung als diskrete Objekte.

Zur Untersuchung des Photoeffekts wird ein Aufbau wie in Abbildung 1 verwendet. In einem evakuierten Aufbau wird eine als Photokathode bezeichnete Metallfläche mit Licht bestrahlt und eine Auffängerelektrode elektrisch positiv (im Bezug auf die Kathode) aufgeladen. Die Photoelektronen sind dann als Strom zwischen den Elektroden messbar. Die experimentellen Ergebnisse lassen sich qualitativ zusammenfassen:

- Der Fotostrom ist proportional zur Intensität der Lichtstrahlung.
- Die Energie eines einzelnen Photoelektrons ist proportional zur Lichtfrequenz und unabhängig von der Intensität.
- Unterhalb einer Grenzfrequenz tritt der Photoeffekt nicht auf.

Die Ergebnisse widersprechen den Erwartungen bei einem Wellencharakter: Unter der Annahme, dass die Elektronen durch einfallende Photonen zu Schwingungen angeregt werden, würden die Elektronen aus der Metallfläche heraustreten sobald die eigene Schwingungsamplitude groß genug wäre. Dann müsste der Effekt aber auch bei intensiver,



**Abbildung 1:** Prinzipielle Anordnung zur Untersuchung des Photoeffektes [1].

langwelliger Strahlung beobachtbar sein, was aber nach dem dritten Punkt nicht der Fall ist. Dadrüber hinaus würden bei einem Wellenmodell bei bestimmte Frequenzen Resonanzphänomene auftreten und einen besonders starken Photoeffekt hervorrufen, was im Experiment nicht beobachtet wird.

Die Beobachtungen lassen sich jedoch erklären, wenn man Licht nicht als gleichmäßige Welle, sondern als diskrete Energiepakete (Photonen oder Lichtquanten) interpretiert. Monochromatisches Licht sind in diesem Modell Photonen, die jeweils die Energie  $h\nu$  besitzen und sich mit Lichtgeschwindigkeit gradlinig durch den Raum bewegen.

Trifft das Photon auf ein Elektron in der Metalloberfläche, überträgt es seine Energie auf das Elektron. Ein Teil der Energie wird als Austrittsarbeit  $A_k$  dafür benötigt, dass Elektron aus der Atom herauszubefördern, der Rest bleibt als kinetische Energie erhalten. Die Energiegleichung lautet somit

$$h\nu = E_{\text{kin}} + A_k. \quad (1)$$

Offensichtlich kann der Photoeffekt nur auftreten, wenn

$$h\nu > A_k, \quad (2)$$

wodurch sich auch die Grenzfrequenz erklären lässt. Außerdem folgt mit Gleichung 1 auch die Proportionalität zwischen Frequenz und Elektronenenergie. Da in dem hier beschriebenen Modell das Photon mit genau einem Elektron reagiert, ist auch der Zusammenhang zwischen Lichtintensität und Photostrom geklärt.

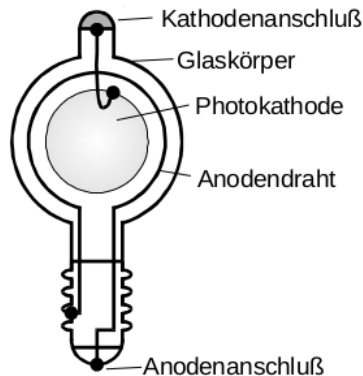
## 2 Durchführung

Im folgenden Teil soll die experimentelle Untersuchung der Photoeffektes beschrieben werden.

### 2.1 Die Photozelle

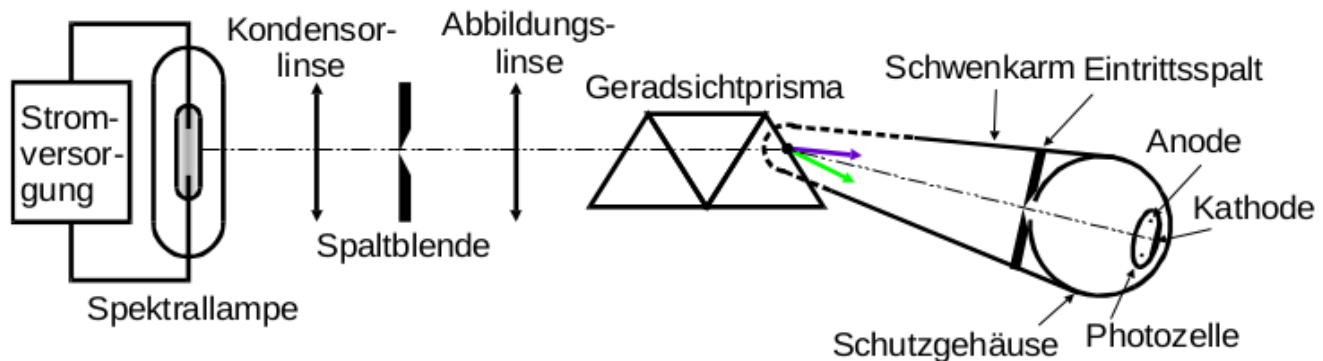
Im Mittelpunkt steht hier die Photozelle, in ihr findet der Photoeffekt statt. Die Photozelle ist ein evakuiert Glaskolben mit zwei Elektroden. Eine davon, die Photokathode,

aus einer Metall- oder Legierungsschicht, die mit Licht bestrahlt werden kann. Die Anode ist ein kreisförmiger Drahtring, der in einigen Millimetern Abstand parallel zur Kathodenoberfläche angebracht ist. Der Aufbau ist in Abbildung 2 dargestellt.



**Abbildung 2:** Schematische Darstellung der verwendeten Photozelle [1].

Für den Versuch wird ein optischer Aufbau, wie in Abbildung 3 dargestellt, verwendet. Das Licht einer Spektrallampe wird gebündelt und durch ein Prisma räumlich in die einzelnen Spektrallinien aufgeteilt. Durch den Schwenkarm kann die Spektrallinie und damit die Frequenz des Lichts ausgewählt werden, was aber immer monochromatisch ist.

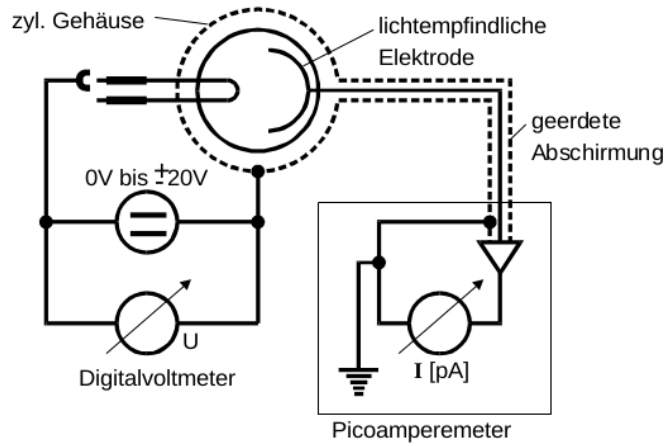


**Abbildung 3:** Optischer Teil des Versuchsaufbaus [1].

## 2.2 Energiemessung mit der Gegenfeldmethode

Um die Energie der einzelnen Photoelektronen zu bestimmen, wird hier mit der Gegenfeldmethode gearbeitet. Dazu wird zwischen den Elektroden eine Spannung  $U$  angelegt, um ein abbremzendes Feld zu erzeugen. Der trotz jenem Feld fließende Strom zwischen den Elektroden wird mit einem Picoamperemeter gemessen. Der elektrische Aufbau ist in Abbildung 4 gezeigt.

Die Elektronen müssen nun auch das Potential des E-Feldes überwinden, aus der Ener-



**Abbildung 4:** Elektrisches Schaltbild der Messapparatur [1].

gieerhaltung folgt, dass der Strom verschwindet, wenn

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

mit  $v_{\max}$  für die Geschwindigkeit der schnellsten Elektronen. Zusammen mit Gleichung 1 folgt

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

Aus den Ergebnissen einer Messreihe “Bremsspannung  $U$  in Abhängigkeit von  $\nu$ “ lässt sich dann das Verhältnis  $\frac{h}{e_0}$  bestimmen.

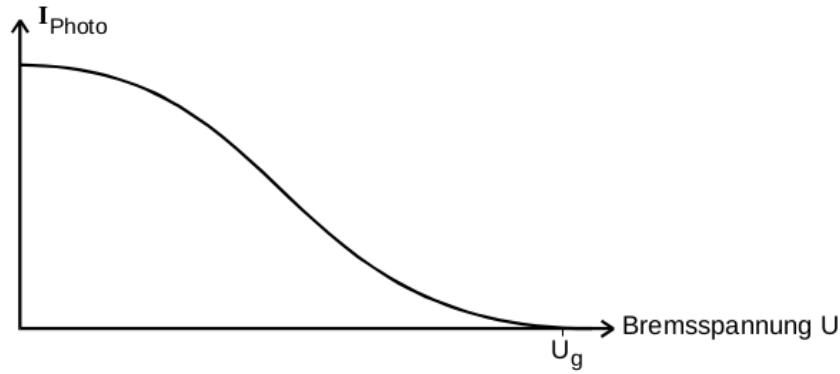
### 2.3 Fehlerquelle: Fermi-Dirac-Statistik

Ein großes Problem bei der in Unterabschnitt 2.2 beschriebenen Methode ist, dass der Photostrom nicht bei einer bestimmten Gegenspannung  $U_g$  verschwindet, sondern schon vorher ( $U < U_g$ ) stark sinkt. Der tatsächliche Verlauf  $I(U)$  entspricht qualitativ dem in Abbildung 5 gezeigten.

Grund für dieses Verhalten ist, dass die Elektronen vor Ausstoßung verschiedene Energien besitzen, die sich im Intervall von 0 bis  $\frac{1}{2} m_0 v_{\max}^2$  befinden. Die Energie der Photoelektronen hängt dann davon ab, welche Energie sie vorher im Festkörper besessen haben. Diese Energieverteilung wird durch die Fermi-Dirac-Statistik beschrieben. Nach dieser Statistik haben die außen liegenden Elektronen eine Energie zwischen 0 und der Fermi-Energie  $\zeta$ , eine geringe Anzahl kann sogar noch mehr Energie haben. Damit lässt sich auch zeigen, dass unter bestimmten Voraussetzungen ein parabolischer Zusammenhang

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

zwischen Photostrom und Bremsspannung  $U$  besteht.



**Abbildung 5:** Photostrom in Abhängigkeit von der Bremsspannung in einer mit monochromatischem Licht bestrahlten Photozelle [1].

## 2.4 Fehlerquelle: Hohe Austrittsarbeit der Anode

Durch eine hohe Austrittsarbeit  $A_A$  an der Anode kann ein Auftreten des Photostroms erschwert werden. Gilt  $A_K < h\nu < A_A$ , so würde nach der linken Ungleichung ein Photostrom auftreten, wegen der rechten müssen die Elektronen aber gegen ein Gegenfeld anlauf. In diesem Fall ist erst mit einer beschleunigenden Spannung  $U_b$ , sodass

$$h\nu + e_0 U_b \geq A_A$$

erfüllt ist. Mit der Photozelle in diesem Versuch sind bei niedrigen Spannungen sogar negative Photoströme möglich, die die Bestimmung von  $U_g$  weiter erschweren.

## 3 Auswertung

### 3.1 Bestimmung der Gegenspannung $U_g$

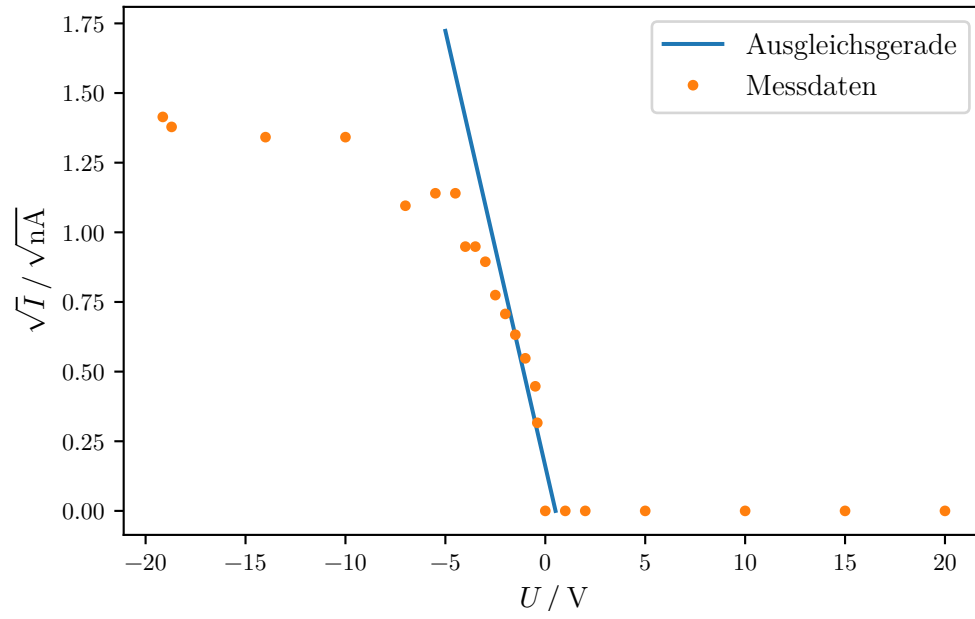
Im ersten Teil der Auswertung des Versuchs wird die Gegenspannung mit einer linearen Ausgleichsrechnung zu den gemessenen Strömen und Brems- bzw. Beschleunigungsspannungen bestimmt. In den einzelnen Unterabschnitten sind zu den 4 vermessenen Spektrallinien die Messdaten und die zugehörige Ausgleichsgerade in einer Tabelle sowie einem Diagramm dargestellt. Aus den Parametern der Ausgleichsgeraden werden dann nach  $U_g = -b/a$  die Gegenspannungen als die Nullstellen der Ausgleichsgeraden (Form  $y = ax + b$ ) berechnet.

### 3.1.1 Gelbe Spektrallinie

**Tabelle 1:** Messdaten zur gelben Spektrallinie,  $\lambda = 578nm$

U [V]	I [nA]
20	0
15	0
10	0
5	0
2	0
1	0
0	0
-0.4	0.1
-0.5	0.2
-1	0.3
-1.5	0.4
-2	0.5
-2.5	0.6
-3	0.8
-3.5	0.9
-4	0.9
-4.5	1.3
-5.5	1.3
-7	1.2
-10	1.8
-14	1.8
-18.7	1.9
-19.14	2





**Abbildung 6:** Messdaten und Ausgleichsgerade zur gelben Spektrallinie, Wurzel des Photostroms in Abhängigkeit von der Bremsspannung

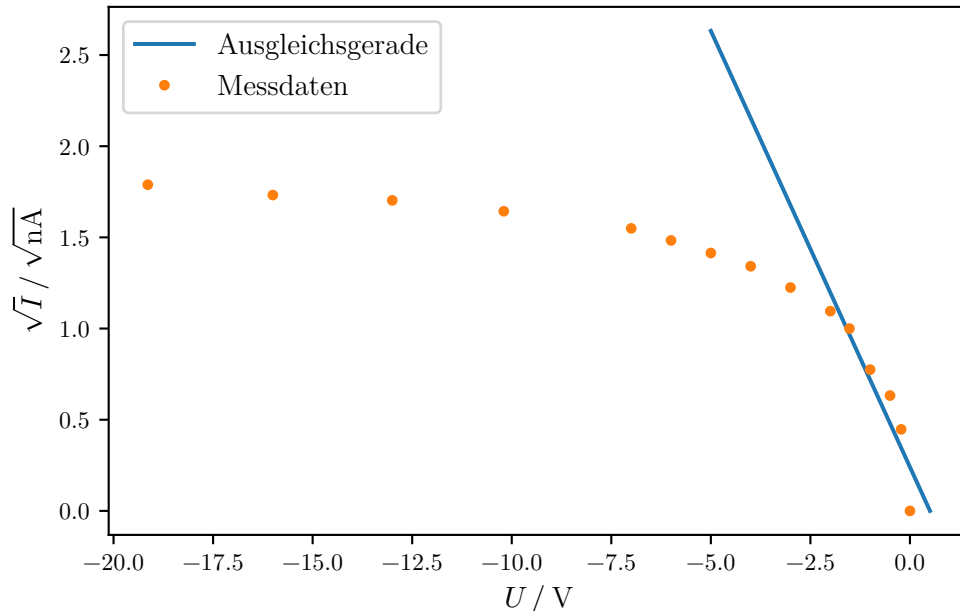
**Tabelle 2:** Parameter der Ausgleichsgeraden und Gegenspannung zur gelben Spektrallinie

$a[\sqrt{\text{nA}}/\text{V}]$	$b[\sqrt{\text{nA}}]$	$U_g[\text{V}]$
$-0.31 \pm 0.07$	$0.16 \pm 0.08$	$0.51 \pm 0.28$

### 3.1.2 Grüne Spektrallinie

**Tabelle 3:** Messdaten zur grünen Spektrallinie,  $\lambda = 546nm$

U [V]	I [nA]
0	0
-0.22	0.2
-0.5	0.4
-1	0.6
-1.52	1
-2	1.2
-3	1.5
-4	1.8
-5	2
-6	2.2
-7	2.4
-10.2	2.7
-13	2.9
-16	3
-19.14	3.2



**Abbildung 7:** Messdaten und Ausgleichsgerade zur grünen Spektrallinie, Wurzel des Photostroms in Abhängigkeit von der Bremsspannung

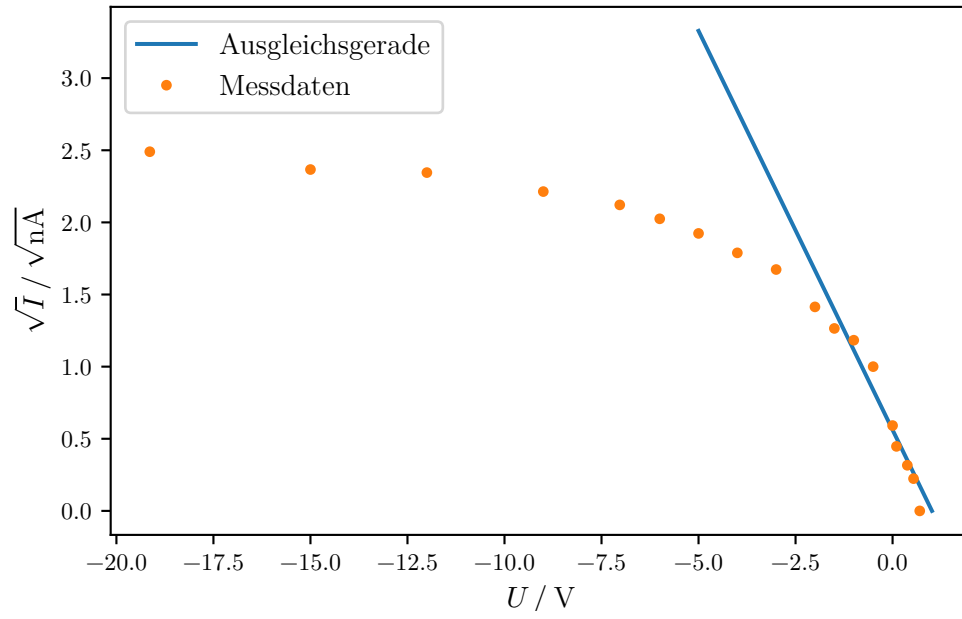
**Tabelle 4:** Parameter der Ausgleichsgeraden und Gegenspannung zur grünen Spektrallinie

$a[\sqrt{\text{nA}}/\text{V}]$	$b[\sqrt{\text{nA}}]$	$U_g[\text{V}]$
$-0.48 \pm 0.09$	$0.24 \pm 0.11$	$0.50 \pm 0.24$

### 3.1.3 Erste violette Spektrallinie

**Tabelle 5:** Messdaten zur ersten violetten Spektrallinie,  $\lambda = 435nm$

U [V]	I [nA]
0.7	0
0.54	0.05
0.38	0.1
0.1	0.2
0	0.35
-0.5	1
-1	1.4
-1.5	1.6
-2	2
-3	2.8
-4	3.2
-5	3.7
-6	4.1
-7.03	4.5
-9	4.9
-12	5.5
-15	5.6
-19.14	6.2



**Abbildung 8:** Messdaten und Ausgleichsgerade zur ersten violetten Spektrallinie, Wurzel des Photostroms in Abhängigkeit von der Bremsspannung

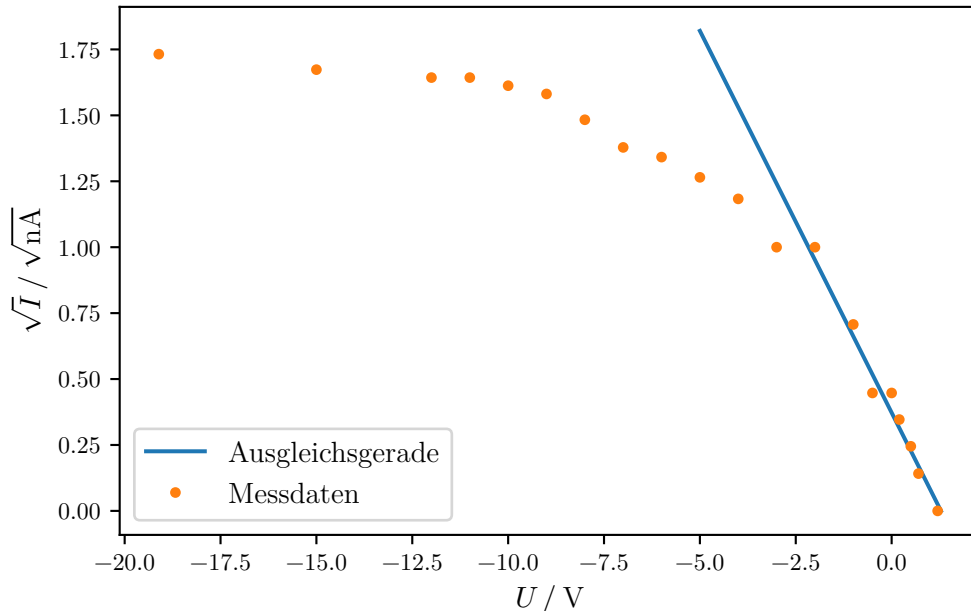
**Tabelle 6:** Parameter der Ausgleichsgeraden und Gegenspannung zur ersten violetten Spektrallinie

$a[\sqrt{\text{nA}}/\text{V}]$	$b[\sqrt{\text{nA}}]$	$U_g[\text{V}]$
$-0.55 \pm 0.06$	$0.56 \pm 0.04$	$1.02 \pm 0.13$

### 3.1.4 Zweite violette Spektrallinie

**Tabelle 7:** Messdaten zur zweiten violetten Spektrallinie,  $\lambda = 405nm$

U [V]	I [nA]
1.2	0
0.7	0.02
0.5	0.06
0.2	0.12
0	0.2
-0.5	0.2
-1	0.5
-2	1
-3	1
-4	1.4
-5	1.6
-6	1.8
-7	1.9
-8	2.2
-9	2.5
-10	2.6
-11	2.7
-12	2.7
-15	2.8
-19.11	3



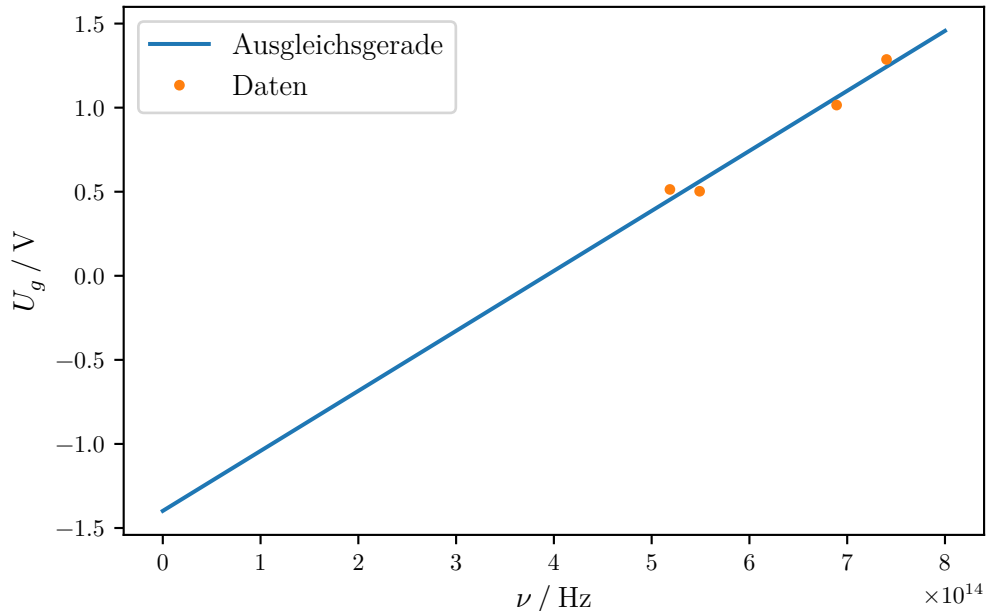
**Abbildung 9:** Messdaten und Ausgleichsgerade zur zweiten violetten Spektrallinie, Wurzel des Photostroms in Abhängigkeit von der Bremsspannung

**Tabelle 8:** Parameter der Ausgleichsgeraden und Gegenspannung zur zweiten violetten Spektrallinie

$a[\sqrt{\text{nA}}/\text{V}]$	$b[\sqrt{\text{nA}}]$	$U_g[\text{V}]$
$-0.29 \pm 0.04$	$0.373 \pm 0.028$	$1.29 \pm 0.22$

### 3.2 Bestimmung von $\frac{h}{e}$ und der Austrittsarbeit $A_k$

Das Verhältnis  $\frac{h}{e}$  und die Austrittsarbeit  $A_k$  lassen sich mit einer linearen Ausgleichsrechnung zu den bereits ermittelten Gegenspannungen und den entsprechenden Lichtfrequenzen bestimmen.



**Abbildung 10:** Daten und Ausgleichsgerade zu den Gegenspannungen und den entsprechenden Frequenzen des Lichts

Die Steigung der Ausgleichsgeraden entspricht dabei dem Koeffizienten  $h/e$  und der y-Achsenabschnitt entspricht der negativen Austrittsarbeit in  $eV$ . Auf diese Weise erhält man:

$$\frac{h}{e_0} = (3.6 \pm 0.4) * 10^{-15} Vs \quad (5)$$

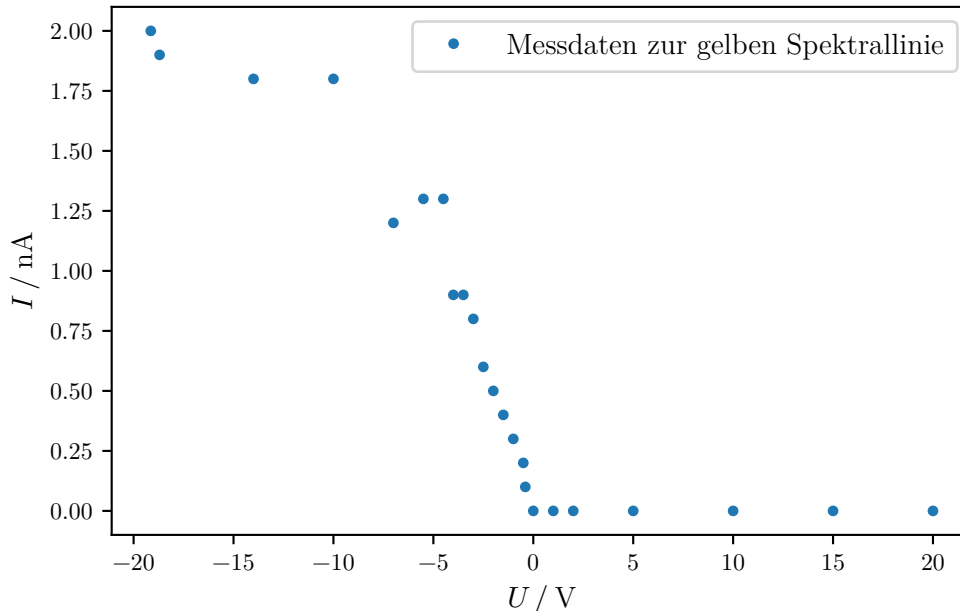
$$A_k = (1.40 \pm 0.25)eV \quad (6)$$

$$(7)$$

### 3.3 Kurvenverlauf

In Abbildung 11 wurde für die gelbe Spektrallinie ( $\lambda = 578nm$ ) der Photostrom in Abhängigkeit der anliegenden Spannung für den gesamten vermessenen Spannungsbereich ( $-20V$  bis  $+20V$ ) dargestellt.





**Abbildung 11:** Photostrom in Abhängigkeit der anliegenden Spannung für die gelbe Spektrallinie ( $\lambda = 578nm$ )

Die zu sehende Kurve entspricht dem erwarteten Kurvenverlauf. So nähert sich der Photostrom für hohe Beschleunigungsspannungen asymptotisch einem Sättigungswert an, geht dann in einen linear fallenden Bereich über und fällt gegen 0 für Spannungen, die sich der Gegenspannung  $U_g$  annähern. Das Phänomen, dass sich der Photostrom einem Sättigungswert annähert ist damit zu erklären, dass die Lichtintensität konstant gehalten wurde. Aufgrund der konstanten Lichtintensität ist die Menge der durch den Photoeffekt ausgelösten Elektronen begrenzt. Die Beobachtung, dass sich der Photostrom bereits für  $U < U_g$  dem Wert 0 annähert hängt damit zusammen, dass die Photoelektronen nicht monoenergetisch verteilt sind, sondern eine Energieverteilung aufweisen.

## 4 Diskussion

Im ersten Teil der Auswertung konnten realistische Werte für die Gegenspannungen im Bereich von knapp über 0V bis circa 1.5V ermittelt werden. Die geringen Abweichungen der Kurven von der erwarteten Form können neben obligatorischen Messunsicherheiten mit widrigen Umständen bei der Messung begründet werden. So konnte mit dem genutzten Versuchsaufbau keine optimale Abschirmung der Photozelle erreicht werden. Das Licht der Tischlampe kann beispielsweise bereits einen Einfluss auf die Messwerte haben.

Im Weiteren wurde über den Zusammenhang der ermittelten Gegenspannungen zu den jeweiligen Lichtfrequenzen ein Wert für  $h/e_0$  berechnet. Der Theoriewert für den Quotienten  $h/e_0$  beträgt gerundet  $4.14 \cdot 10^{-15}Vs$ . In Unterabschnitt 3.2 wurde der

Quotient zu

$$\frac{h}{e_0} = (3.6 \pm 0.4) * 10^{-15} Vs$$

berechnet. Somit weicht der berechnete Wert um gerundet 13 % von dem Theoriewert ab. Diese Abweichung ist relativ gering und das berechnete Konfidenzintervall von  $[3.2, 4.0]Vs$  liegt noch näher am Theoriewert. Die geringe verbleibende Abweichung kann mit den bereits beschriebenen Einflüssen auf die Messgenauigkeit erklärt werden.

## Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuchsanleitung: Versuch Nr. 500, Der Photoeffekt.*