

V500

# Der Photoeffekt

Christopher Breitfeld  
christopher.breitfeld@tu-dortmund.de

Henry Krämerkämper  
henry.kraemerkaemper@tu-dortmund.de

Durchführung: 22.06.2021

Abgabe: 30.06.2021

TU Dortmund – Fakultät Physik

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Theorie</b>	<b>3</b>
2.1	Die Phänomene und Erklärung des Photoeffektes . . . . .	3
2.2	Experimenteller Nachweis des Photoeffektes . . . . .	3
<b>3</b>	<b>Durchführung</b>	<b>5</b>
3.1	Versuchsaufbau . . . . .	5
3.2	Ausmessung des Photostroms . . . . .	6
<b>4</b>	<b>Auswertung</b>	<b>6</b>
4.1	Bestimmung der Grenzspannung . . . . .	8
4.2	Bestimmung der Austrittsarbeit sowie des Verhältnisses $h/e^0$ . . . . .	12
4.3	Untersuchung des Kurvenverlaufs der gelben Spektrallinie . . . . .	13
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>14</b>
	<b>Literatur</b>	<b>15</b>

# 1 Einleitung

In dem folgenden Versuch wird der Photoeffekt, also das Auslösen von Elektronen aus Metalloberflächen durch die Bestrahlung mit Licht, untersucht. Dazu wird der Zusammenhang zwischen der Wellenlänge des Lichts und der kinetischen Energie des ausgelösten Elektrons betrachtet.

## 2 Theorie

Auf Grund verschiedener experimenteller Befunde kann Licht nur durch die Quantenelektrodynamik widerspruchsfrei beschrieben werden. Für eine große Anzahl an Photonen kann Licht dabei als Welle genähert werden, wie es zum Beispiel in der Beugungsoptik geschieht. Wechselwirkt das Licht jedoch mit Materie, wie es bei dem Photoeffekt der Fall ist, können die auftretenden Phänomene mit dem Korpuskelmodell erklärt werden, in welcher die Quantelung des Lichts in einzelne Photonen angenommen wird. Im Folgenden soll das Licht nach dem Korpuskelmodell behandelt werden.

### 2.1 Die Phänomene und Erklärung des Photoeffektes

Wird eine Metalloberfläche mit Photonen der Energie

$$E_P = h\nu \quad (1)$$

bestrahlt, können durch diese Elektronen aus dem Metall herausgelöst werden. Dabei überträgt das Photon seine Energie dem im Metall befindlichen Elektron. Zum Verlassen des Metalls muss die spezifische Austrittsarbeit  $\Phi_K$  geleistet werden. Die restliche Energie wird in kinetische Energie  $E_{kin} \geq 0$  des Elektrons umgesetzt. Die Energiebilanz für ruhende Elektronen (vgl. Abschnitt 2.2 für bewegte Elektronen) lautet demnach

$$h\nu = \Phi_K + E_{kin} . \quad (2)$$

Die Energie  $E_{kin}$  der Elektronen nach dem Stoß ist also proportional zur Frequenz  $\nu$  des Lichts. Offensichtlich kann der Photoeffekt nur auftreten, wenn

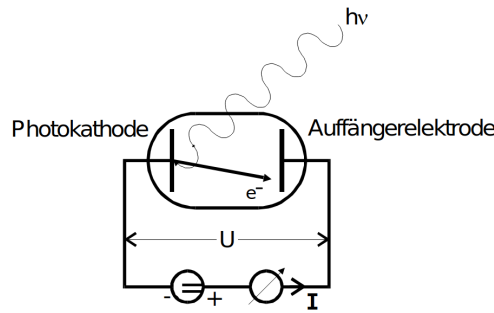
$$h\nu < \Phi_K$$

gilt. Es existiert also eine minimale Grenzfrequenz unterhalb derer keine Elektronen mehr aus dem Metall gelöst werden können. Des Weiteren ist zu beobachten, dass die Anzahl der ausgelösten Elektronen proportional zur Intensität des Lichtes ist.

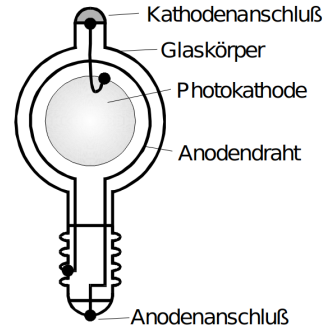
### 2.2 Experimenteller Nachweis des Photoeffektes

Für den Nachweis des Photoeffektes müssen die ausgelösten Elektronen gemessen werden. Dies geschieht durch eine positiv geladene Auffängeranode, die sich gegenüber der Photokathode befindet. Trifft nun ein Elektron auf die Auffängeranode, wird ein Strom gemessen. In Abbildung 1a ist dieses Prinzip veranschaulicht. In Abbildung 1b ist die

verwendete Photozelle skizziert, in welcher sich sowohl Anode als auch Kathode befinden. Die Kathode besteht dabei aus einer dünnen Metallschicht im Inneren der Photozelle. Die Anode ist durch einen Draht ring wenige Millimeter vor der Kathode realisiert. Das Innere des Glaskolbens, in welchem sich die Elektroden befinden, ist weitestgehend evakuiert, um Störeffekte mit Gasmolekülen zu vermeiden.

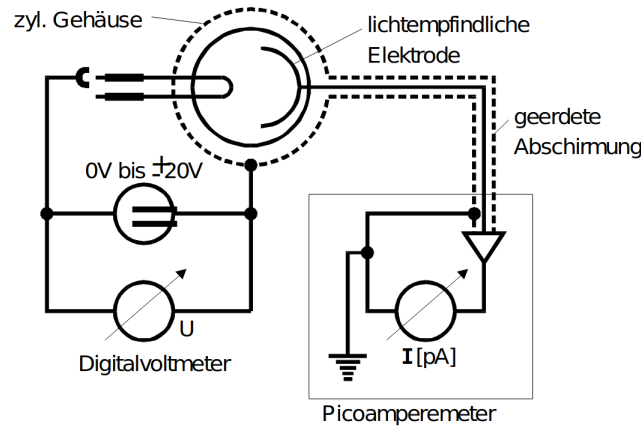


(a) Schematischer Versuchsaufbau. [3]



(b) Skizze der Photozelle. [3]

Zwischen Kathode und Anode wird ein elektrisches Bremsfeld erzeugt, indem eine variable Spannungsquelle angeschlossen wird. Zur Messung der ausgelösten Elektronen wird ein Picoamperemeter verwendet. Die elektrische Schaltung ist in Abbildung 2 dargestellt.



**Abbildung 2:** Elektrisches Schaltbild der Apparatur. [3]

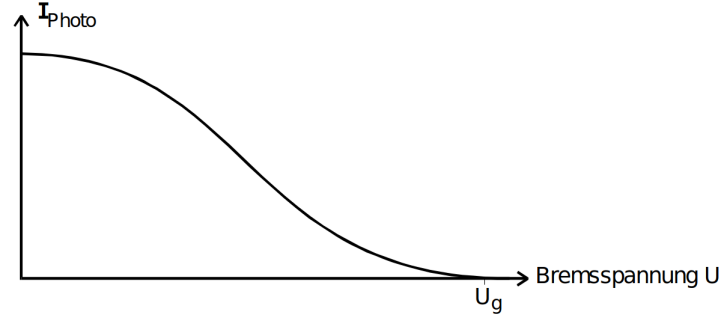
Durch das Bremsfeld mit der Spannung  $U_B$  können nur die Elektronen die Auffängeranode erreichen, deren Energie  $E_{kin} > e_0 U_B$  erfüllt. Für die Grenzspannung

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

verschwindet der gemessene Strom, da selbst die Energie der schnellsten Elektronen nicht ausreicht, um die Anode zu erreichen. Nach Gleichung (2) gilt für diese Elektronen

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

Die Elektronen, die eine Geschwindigkeit  $v < v_{max}$  besitzen, erreichen schon für eine Spannung  $U_B < U_g$  nicht mehr die Anode. Deswegen sinkt der gemessene Photostrom kontinuierlich ab, bis er bei  $U_g$  Null erreicht. Dies ist in Abbildung 3 in einem  $(U_B-I_P)$ -Diagramm dargestellt.



**Abbildung 3:** Photostrom  $I_P$  in Abhängigkeit der Bremsspannung  $U_B$ . [3]

Die unterschiedlichen Geschwindigkeiten der ausgelösten Elektronen resultieren aus der bereits im Metall vorhandenen kinetischen Energie der Elektronen, welche einer Fermi-Dirac-Verteilung folgt.

Unter bestimmten Voraussetzungen lässt sich zwischen dem gemessenen Strom  $I_P$  und der Bremsspannung  $U_B$  der Zusammenhang

$$I_P \propto U_g^2$$

zeigen.

Für den Fall, dass zwar  $\Phi_K < h\nu$  gilt, also Elektronen aus der Kathode gelöst werden, aber für die Austrittsarbeit der Anode  $\Phi_A > h\nu$  gilt, wird kein Strom an der Anode gemessen. Dies liegt an dem elektrischen Gegenfeld, welches durch die Differenz der Fermi-Niveaus entsteht und die Elektronen so stark abbremst, dass sie die Anode nicht mehr erreichen. Mit einem beschleunigenden Potential  $U_b$  kann jedoch wieder ein Strom gemessen werden, sobald

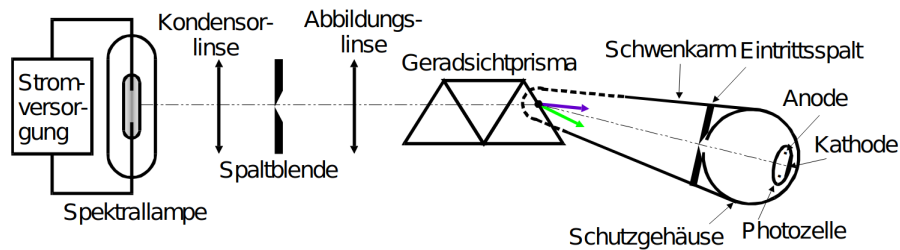
$$h\nu + e_0 U_b \geq \Phi_A \quad (5)$$

gilt.

## 3 Durchführung

### 3.1 Versuchsaufbau

Wie bereits in Kapitel 2.2 beschrieben, ist in dem Versuchsaufbau eine evakuierte Photozelle (vgl. Abb. 1b) mit einem Picoamperemeter und einer variablen Spannungsquelle verbunden (vgl. Abb. 2). Da das Licht, mit welchem die Kathode bestrahlt wird, aber eine feste Frequenz  $\nu$  besitzen soll, wird auch eine optische Konstruktion benötigt. Wie



**Abbildung 4:** Optische Konstruktion zur Gewinnung monochromatischen Lichts. [3]

in Abbildung 4 zu sehen, wird von einer Spektrallampe ausgesendetes polychromatisches Licht durch Linsen und einen Spalt fokussiert und dann mit einem Prisma in seine monochromatischen Spektrallinien zerlegt. Die Photozelle kann jetzt so auf einem Schwenkarm bewegt werden, dass immer nur eine Spektrallinie auf die Kathode fällt. Somit können für mehrere Lichtfrequenzen Messungen durchgeführt werden.

### 3.2 Ausmessung des Photostroms

Vor Beginn der Messung muss der Dunkelstrom gemessen werden, welcher das Picoamperemeter auch ohne Anschalten der Lampe anzeigt, da dieser die Messung sonst systematisch verfälschen würde. Erst dann wird die Spektrallampe angeschaltet.

Nach Ausrichten einer Spektrallinie auf die Photozelle wird die Spannung von 2 V bis  $-2$  V in 0,2 V-Schritten variiert. Dabei werden die gemessenen Spannungen abgelesen und notiert. Diese Messung erfolgt für die grüne ( $\lambda = 546$  nm), die blaugrüne ( $\lambda = 492$  nm) und die eine violette ( $\lambda = 405$  nm,  $\lambda = 435$  nm) Spektrallinie.

Für die gelbe Spektrallinie ( $\lambda = 577$  nm) wird die Spannung in einem Bereich von 20 V bis  $-2$  V variiert, wobei in dem Bereich von 20 V bis 2 V eine Schrittweite von 1 V gewählt wird.

## 4 Auswertung

Die gemessenen Werte sind in folgenden Tabellen dargestellt.

**Tabelle 1:** Messdaten des Versuches.

$U_g$	$I_{gruen}$	$I_{blaugruen}$	$I_{blau}$
2,0	2,1	0,15	0,8
1,8	2,0	0,135	0,7
1,6	1,8	0,125	0,6
1,4	1,5	0,11	0,5
1,2	1,2	0,1	0,52
1,0	1,0	0,085	0,44
0,8	0,8	0,073	0,36
0,6	0,6	0,06	0,28
0,4	0,35	0,043	0,2
0,2	0,24	0,028	0,16
0,01	0,1	0,015	0,105
-0,01	0,5	0,018	0,11
-0,2	0,2	0,01	0,045
-0,4	0,03	0,004	0,042
-0,6	0	0,001	0,024
-0,8	0	0	0,008
-1,0		0	0,002
-1,2			0
-1,4			0

**Tabelle 2:** Messdaten des Versuches.

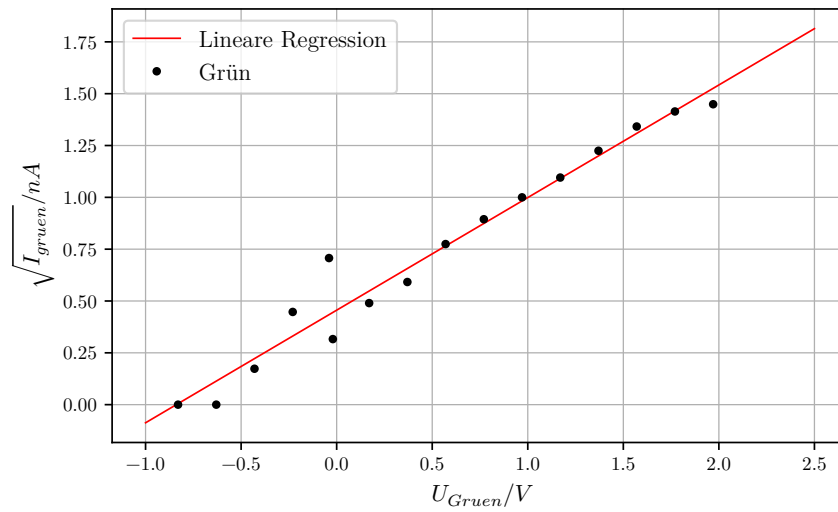
$U_g$	$I_{gelb}$
19	2,3
18	2,3
17	2,25
16	2,2
15	2,2
14	2,15
13	2,05
12	2,05
11	2,00
10	2,00
9	1,95
8	1,85
7	1,8
6	1,7
5	1,55
4	1,4
3	1,2
2	0,87
1,8	0,87
1,6	0,81
1,4	0,74
1,2	0,68
1,0	0,60
0,8	0,53
0,6	0,43
0,4	0,32
0,2	0,20
0,01	0,10
-0,01	0
-0,2	0

Es wird ein Dunkelstrom von  $I_{Dunkel} = 0.03\text{nA}$  gemessen. Dieser wird vor weiteren Rechnungen von allen gemessenen Strömen abgezogen.

#### 4.1 Bestimmung der Grenzspannung

Für die grüne Spektrallinie mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 546\text{nm}$  ist in folgender Abbildung die Wurzel des gemessenen Photostroms gegen die Bremsspannung aufgetragen.





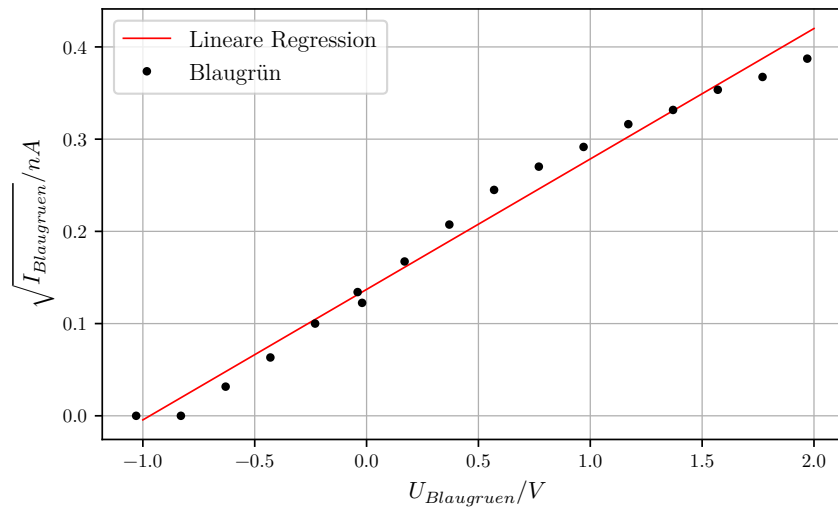
**Abbildung 5:** Die Messwerte der grünen Spektrallinie sowie ein linearer Fit.

An die Messwerte ist eine lineare Funktion der Form  $mx + b$  gefittet. Es ergeben sich die Parameter

$$m = 0.543 \pm 0.029$$

$$b = 0.456 \pm 0.029.$$

Die Grenzspannung  $U_g$  ergibt sich hier zu  $U_g = -0.84 \pm 0.07$  nA.  
Für die blaugrüne Spektrallinie mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 492\text{nm}$  ist in folgender Abbildung die Wurzel des gemessenen Photostroms gegen die Bremsspannung aufgetragen.



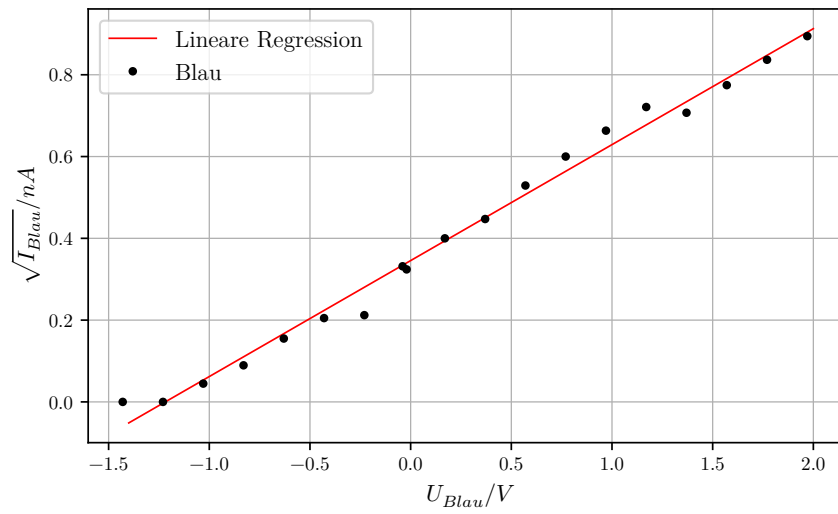
**Abbildung 6:** Die Messwerte der blaugrünen Spektrallinie sowie ein linearer Fit.

An die Messwerte ist eine lineare Funktion der Form  $mx + b$  gefittet. Es ergeben sich die Parameter

$$m = 0.141 \pm 0.005$$

$$b = 0.137 \pm 0.005.$$

Die Grenzspannung  $U_g$  ergibt sich hier zu  $U_g = -0.97 \pm 0.05$  nA. Für die blaue Spektrallinie mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 435\text{nm}$  [1] ist in folgender Abbildung die Wurzel des gemessenen Photostroms gegen die Bremsspannung aufgetragen.



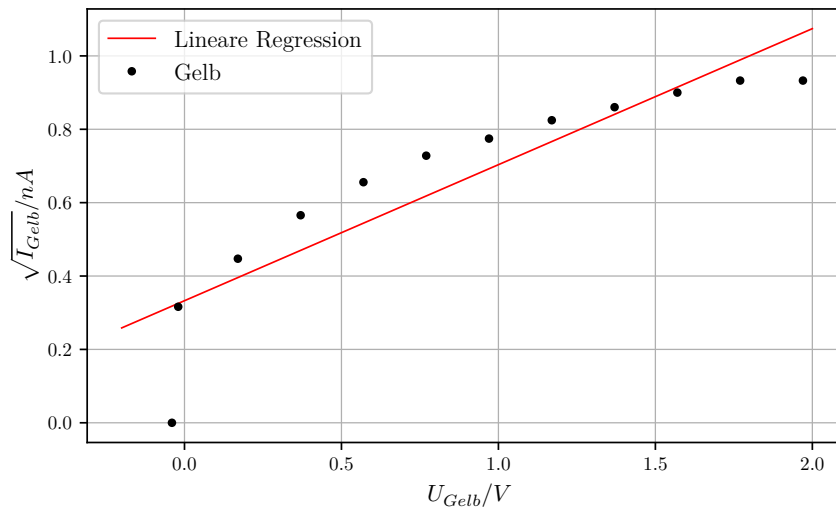
**Abbildung 7:** Die Messwerte der blauen Spektrallinie sowie ein linearer Fit.

An die Messwerte ist eine lineare Funktion der Form  $mx + b$  gefittet. Es ergeben sich die Parameter

$$m = 0.284 \pm 0.007$$

$$b = 0.346 \pm 0.007.$$

Die Grenzspannung  $U_g$  ergibt sich hier zu  $U_g = -1.22 \pm 0.04$  nA. Für die gelbe Spektrallinie mit einer Wellenlänge von  $\lambda = 577\text{nm}$  ist in folgender Abbildung die Wurzel des gemessenen Photostroms gegen die Bremsspannung aufgetragen.



**Abbildung 8:** Die Messwerte der gelben Spektrallinie sowie ein linearer Fit.

An die Messwerte ist eine lineare Funktion der Form  $mx + b$  gefittet. Es ergeben sich die Parameter

$$m = 0.37 \pm 0.06$$

$$b = 0.33 \pm 0.06.$$

Die Grenzspannung  $U_g$  ergibt sich hier zu  $U_g = -0.90 \pm 0.22$  nA.

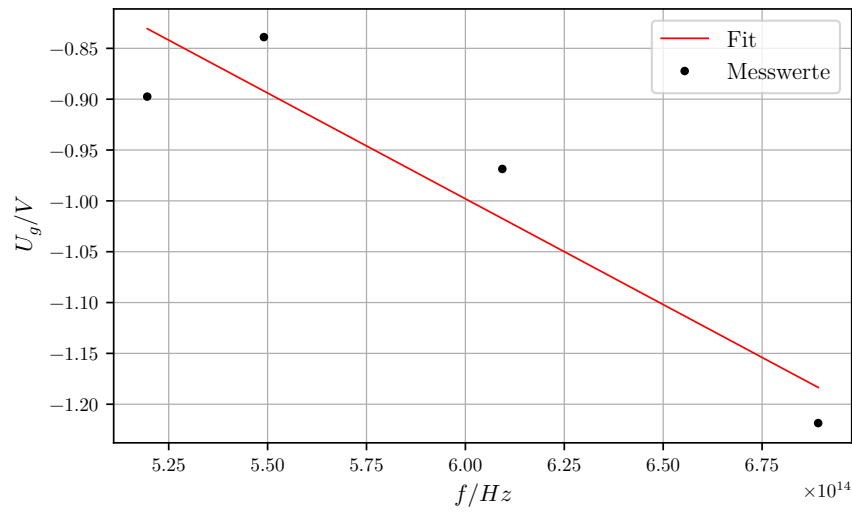
## 4.2 Bestimmung der Austrittsarbeit sowie des Verhältnisses $h/e^0$

Das Verhältnis  $\frac{h}{e_0}$  sowie die Austrittsarbeit  $A_k$  lässt sich durch eine lineare Ausgleichsrechnung an  $U_g$  aufgetragen gegen die Frequenz  $f = \frac{c}{\lambda}$  nach der Gleichung (5) bestimmen. Die Daten, an denen die Ausgleichsrechnung durchgeführt wurde, sind folgender Tabelle 3 zu entnehmen. An diesen Werten wurde ein linearer Fit durchgeführt. Dieser ist in

**Tabelle 3:** Die Wellenlänge sowie die zugehörige Grenzspannung einiger Spektrallinien.

$U_g[V]$	$\lambda[nm]$
-0,84	546
-0,97	492
-1,22	435
-0,9	577

Abbildung 9 dargestellt.



**Abbildung 9:** Die Werte für Grenzspannungen und Frequenzen sowie ein linearer Fit.

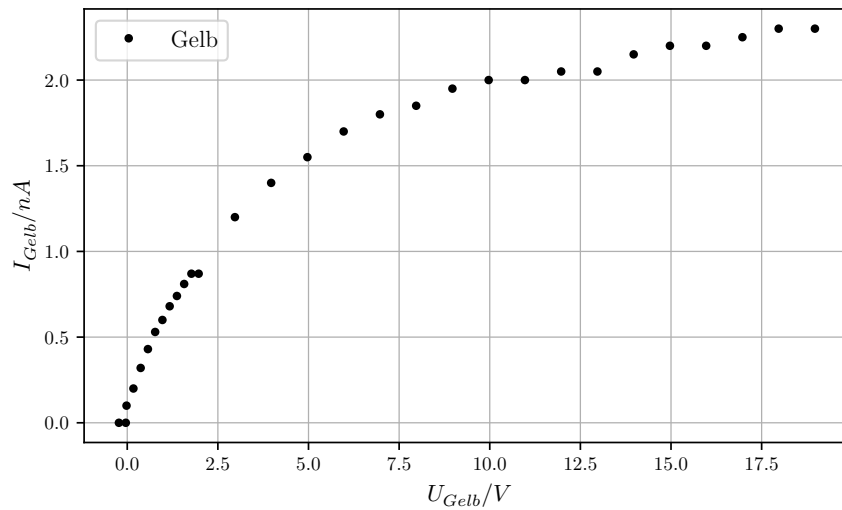
Der in obiger Abbildung 9 dargestellte Fit wurde unter Verwendung der Werte in Tabelle 3 durchgeführt. Es ergeben sich folgende Parameter

$$\frac{h}{e_0} = (-2.1 \pm 0.6) \cdot 10^{-15} \quad (6)$$

$$A_k = (-4 \pm 5) \cdot 10^{-20}. \quad (7)$$

### 4.3 Untersuchung des Kurvenverlaufs der gelben Spektrallinie

In folgender Abbildung 10 ist der Photostrom für  $\lambda = 577 \text{ nm}$  in Abhängigkeit zu der angelegten Spannung dargestellt. Die dargestellten Werte finden sich in Tabelle 2.



**Abbildung 10:** Der Photostrom aufgetragen gegen die angelegte Spannung für  $\lambda = 577\text{nm}$ .

Hier ist erkennbar, dass die Kurve für hohe Spannungen einen Sättigungswert erreicht, sie nähert sich asymptotisch einem Grenzwert an. Dies kann dadurch erklärt werden, dass ab einer gewissen Spannung der Maximalwert der emittierten Elektronen die Anode erreicht. Die Anzahl der emittierten Elektronen ist von der Intensität des eingestrahlten Lichtes abhängig und kann sich daher bei konstanter Lichtstrahlung nur an einen endlichen Wert annähern. Die asymptotische Annäherung entsteht durch die ungleiche Verteilung der kinetischen Energie der Elektronen. Aufgrund der geringen Größe der Anode können manche Elektronen mit hoher kinetischen Energie die Anode verfehlen, was das Erreichen des Grenzwertes verhindert. Dies müsste auch für die Grenzspannung  $U_g$  gelten, diese ist jedoch nicht innerhalb des Messbereiches und daher in Abbildung 10 nicht zu erkennen. Elektronen mit hoher kinetischer Energie können auch ohne eine angelegte Spannung die Anode erreichen, daher kann auch in diesem Fall ein Strom gemessen werden.

## 5 Diskussion

Verglichen mit dem Literaturwert  $\frac{h}{e_0 lit} = 4.136 \cdot 10^{-15} \text{kg m}^2 \text{A/s}^2$  [2] ergibt sich eine Abweichung von 150 %. Dies ist sehr hoch, die Werte liegen aber in derselben Größenordnung ( $10^{-15}$ ). Die hohen Abweichungen sowie die negativen Werte für die Grenzspannung, das Verhältnis  $\frac{h}{e_0}$  und die Austrittsarbeit lassen auf einen systematischen Fehler schließen, der jede Messung leicht verfälscht hat. Dies hat vermutlich einen besonders hohen Einfluss auf den Fit an Tabelle 3, aufgrund der geringen Anzahl der Werte, an die gefittet wird. Zusätzlich fiel bereits während der Messung auf, dass Faktoren wie das Öffnen und Schließen des Vorhangs und Bewegungen einer anderen experimentierenden Gruppe einen hohen Einfluss auf die gemessenen Werte hatten. Außerdem ist der Versuchsaufbau sehr

anfällig gegenüber Stößen an den Tisch, was ebenfalls die Messwerte verfälscht haben könnte.

## Literatur

- [1] *Atomspektren: Das Quecksilberatom*. 2021. URL: <http://hydrogen.physik.uni-wuppertal.de/hyperphysics/hyperphysics/hbase/quantum/atspect2.html> (besucht am 28.06.2021).
- [2] *Planck constant per elementary charge*. Wolfram Research. 2021. URL: <https://www.wolframalpha.com/input/?i=h%2Fe&assumption=%7B%22MC%22%2C+%22h%2Fe%22%7D+-%3E+%7B%22Unit%22%7D&assumption=%22UnitClash%22+-%3E+%7B%22h%22%2C+%7B%22PlanckConstant%22%7D%7D> (besucht am 30.06.2021).
- [3] *Versuchsanleitung zu Versuch Nr. 500 Der Photoeffekt*. Fakultät Physik, TU Dortmund. 2021. URL: [https://moodle.tu-dortmund.de/pluginfile.php/1493257/mod\\_resource/content/2/V500.pdf](https://moodle.tu-dortmund.de/pluginfile.php/1493257/mod_resource/content/2/V500.pdf).