

500

## **Der Photoeffekt**

Fabian Koch  
fabian3.koch@udo.edu

Tom Rosenstein  
tom.rosenstein@udo.edu

Durchführung: 22.05.18

Abgabe: 29.05.18

## **Inhaltsverzeichnis**

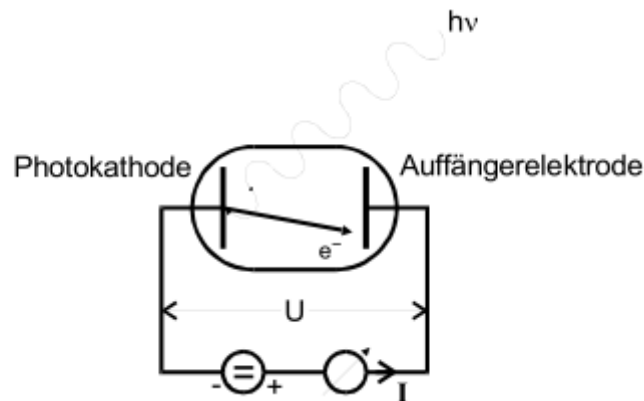
<b>1 Zielsetzung</b>	<b>3</b>
<b>2 Theorie</b>	<b>3</b>
<b>3 Durchführung</b>	<b>5</b>
<b>4 Auswertung</b>	<b>7</b>
<b>5 Diskussion</b>	<b>13</b>
<b>Literatur</b>	<b>13</b>

## 1 Zielsetzung

Bei diesem Versuch wird der Photoeffekt durch Nutzen einer Photozelle untersucht. Dabei wird der Zusammenhang zwischen der Wellenlänge des Lichtes und der Maximalenergie der emittierten Elektronen, sowie die Abhängigkeit des Elektronenstroms in Abhängigkeit der an der Photozelle angelegten Spannung betrachtet.

## 2 Theorie

Der Photoeffekt beschreibt das Austreten von Elektronen aus einem Metall, welches mit Licht bestrahlt wird. Dabei treten Effekte auf, welche sich mit der Wellencharakteristik des Lichtes nicht erklären lassen. So ist die maximale Kinetische Energie der Elektronen nicht etwa von der Intensität des bestrahlenden Lichtes, sondern nur von der Wellenlänge beziehungsweise der Frequenz des Lichtes abhängig. Des Weiteren tritt der Photoeffekt erst ab einer Grenzfrequenz auf. Dies lässt sich durch Einführung der Photonen, aus welchen das Licht besteht, erklären. Der prinzipielle Aufbau des Photoeffektes ist in Abbildung 1 zu sehen. Die quantitative Beschreibung des Photoeffektes folgt aus der



**Abbildung 1:** Prinzipieller Aufbau des Photoeffektes [1, S. 73].

Energieerhaltung:

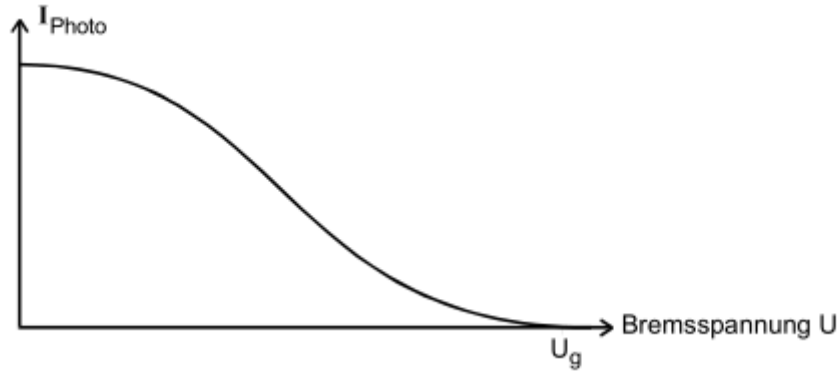
$$h\nu = E_{\text{kin}} + A_k. \quad (1)$$

Dabei ist  $h$  das Plancksche Wirkungsquantum,  $\nu$  die Frequenz des Lichtes,  $E_{\text{kin}}$  die kinetische Energie des herausgelösten Elektrons und  $A_k$  die Austrittsarbeit, die verrichtet werden muss, um das Elektron aus dem Festkörper zu lösen. Anhand dieser Energiebilanz werden die zuvor geschilderten Phänomene wie die Abhängigkeit der kinetischen Energie von der Frequenz und die Grenzfrequenz für das Auftreten des Photoeffektes eindeutig beschrieben. Da, wie im Folgenden Abschnitt 3 beschrieben, mit einer Gegenspannung, welche den durch Auftreffen der Elektronen auf die Anode entstehenden Strom ausgleicht, gearbeitet wird, muss die Energiebilanz angepasst werden. Unter den Annahmen, dass die Energie der Bremsspannung gleich der der schnellsten Elektronen ist, und dass die

Elektronen ihre Energie nur durch die Photonen erhalten haben, lässt sich folgende Gleichung aufstellen:

$$h\nu = e_0 U_g + A_k. \quad (2)$$

Dabei ist  $U_g$  die Bremsspannung und  $e_0$  die Elementarladung der Elektronen. Da die Elektronen im Festkörper jedoch eine nicht monoenergetische Energieverteilung besitzen, welche durch die Fermi-Dirac-Statistik beschrieben wird, verliert Gleichung (2) in der Praxis ihre Gültigkeit im Bezug auf die Bremsspannung  $U_g$ . Die Elektronen besitzen im Festkörper Energien zwischen 0 und der Fermi-Energie  $\zeta$ . Dadurch sieht der Verlauf des Stromes in Abhängigkeit von der Spannung aus wie in Abbildung 2. Abhilfe verschafft



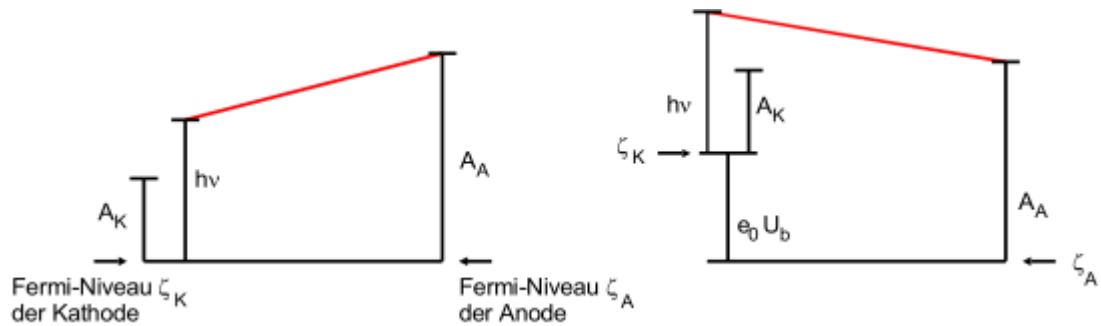
**Abbildung 2:** Photostrom in Abhängigkeit der Spannung bei monochromatischem Licht [1, S. 77].

die unter bestimmten Voraussetzungen geltende Beziehung

$$I_{\text{Ph}} \sim U^2. \quad (3)$$

Besitzt die Anode jedoch eine sehr hohe Austrittsarbeit  $A_A$  kann es sein, dass weitere Probleme bei der Untersuchung des Photoeffektes auftreten. Da die Kathode und Anode elektrisch leitend miteinander verbunden werden, stellen sich ihre Fermi-Energien auf das selbe Niveau ein, wodurch teilweise eine Beschleunigungsspannung angelegt werden muss, um einen Photostrom zu messen. Dies ist anschaulich in Abbildung 3 dargestellt und wird durch folgende Energiebilanz beschrieben:

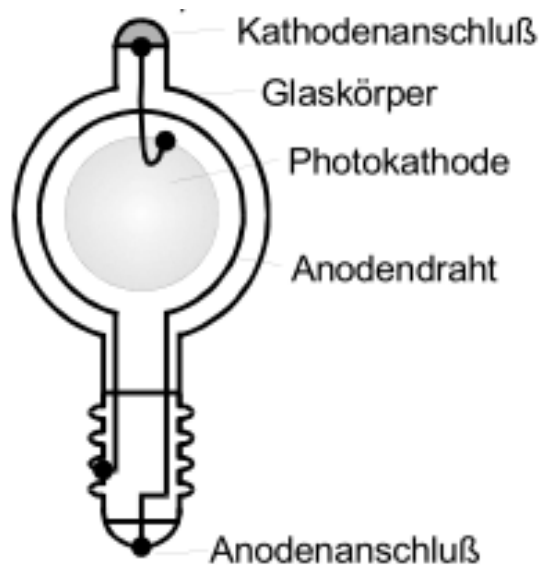
$$h\nu + e_0 U_b \geq A_A \quad (4)$$



**Abbildung 3:** Beeinträchtigung des Photoeffekts durch hohe Austrittsarbeit der Anode [1, S. 78].

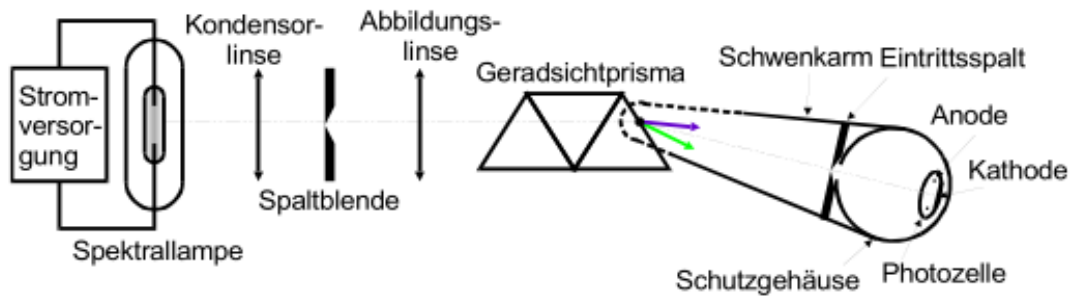
### 3 Durchführung

Um den Photoeffekt untersuchen zu können, wird eine Photozelle genutzt. Diese besteht aus einem evakuierten Glaskolben. Auf diesen ist die sogenannte Photokathode aufgedampft. Diese wird mit Licht bestrahlt, so dass aufgrund des Photoeffektes Elektronen herausgeschlagen werden. Diese Elektronen werden von der Anode aufgenommen, welche aus einem dünnen Draht besteht und kreisförmig um die Photokathode konstruiert ist. Der Aufbau der Photozelle ist in Abbildung 4 und der der optischen Anordnung in Abbildung 5 dargestellt.

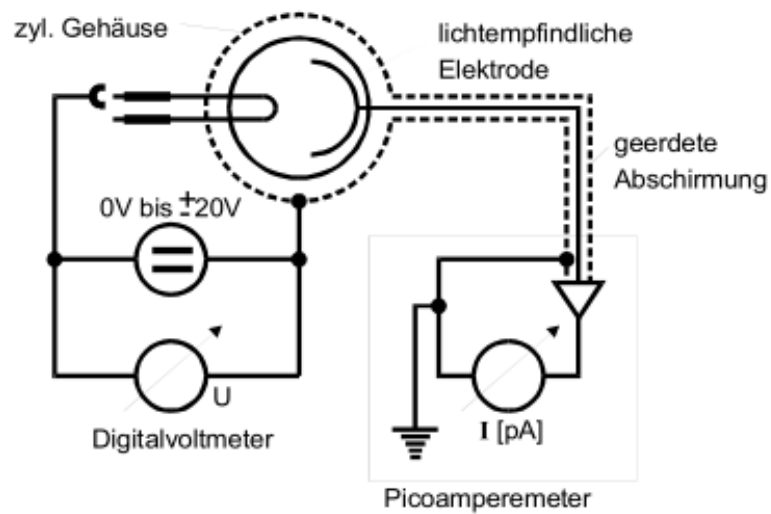


**Abbildung 4:** Der Aufbau einer Photozelle, entnommen der Versuchsanleitung [1, S. 75].

Die Kondensorlinse bündelt das Licht der Spektrallampe. Die Abbildungslinse erzeugt ein Bild der Spaltblende auf den Eintrittsspalt der Photozelle. Das Geradsichtprisma dient



**Abbildung 5:** Die optische Anordnung, entnommen der Versuchsanleitung [1, S. 75].



**Abbildung 6:** Die Messvorrichtung für die Bremsspannung und den Elektronenstrom, entnommen der Versuchsanleitung [1, S. 76].

der räumlichen Auftrennung des Lichtes, so dass die einzelnen Spektrallinien der Lampe auf die Photozelle gerichtet werden können. Die Photozelle ist dafür schwenkbar gelagert. Mithilfe eines Mattschirmes können die Einstellungen der Linsen überprüft werden. Die Spektrallinien sollen scharf erkennbar sein.

Um die Energie der vom Photoeffekt ausgelösten Elektronen messen zu können, wird die Gegenfeldmethode verwendet. Hierfür wird an die Anode eine variable Spannung angelegt. Dies erzeugt ein Elektronen abbremssendes Feld. Es ist nun möglich für verschiedene Spannungen den Elektronenstrom zu messen. Der Aufbau der Schaltung ist in Abbildung 6 dargestellt.

Die einzelnen Spektrallinien werden jeweils auf die Photozelle ausgerichtet. Es wird ein Bereich von Bremsspannung abgeschätzt, für den sich genügend Messwerte nehmen lassen. Für jede Bremsspannung wird der Elektronenstrom aufgenommen. Dies wird für jede Spektrallinie wiederholt. Besondere Beachtung wird der Wellenlänge  $\lambda = 578 \text{ nm}$  geschenkt. Für diese werden die Bremsspannungswerte von  $(-20 \text{ V} \leq U \leq 20 \text{ V})$  aufgenommen.

## 4 Auswertung

Um  $U_g$  zu bestimmen, wird für die einzelnen Lichtwellenlängen  $\sqrt{I} / \sqrt{100 \text{ pA}}$  gegen  $U / \text{V}$  in einem Diagramm aufgetragen. Die entsprechenden Messwerte sind in Tabelle 1 zu finden. Die so entstehenden Plots wurden in Abbildung 7 zusammengetragen. Es ergeben sich für die verschiedenen Ausgleichsgeraden der entsprechenden Lichtwellenlängen folgende Werte, hierbei entspricht  $a_x$  der Steigung und  $b_x$  dem Y-Achsenabschnitt der entsprechenden Lichtwellenlänge:

$$a_{\text{gelb}} = -2.85 \pm 0.11 \frac{\sqrt{100 \text{ pA}}}{\text{V}}$$

$$b_{\text{gelb}} = 1.75 \pm 0.04 \sqrt{100 \text{ pA}}$$

$$a_{\text{rot}} = -0.62 \pm 0.05 \frac{\sqrt{100 \text{ pA}}}{\text{V}}$$

$$b_{\text{rot}} = 0.66 \pm 0.04 \sqrt{100 \text{ pA}}$$

$$a_{\text{grün}} = -3.99 \pm 0.17 \frac{\sqrt{100 \text{ pA}}}{\text{V}}$$

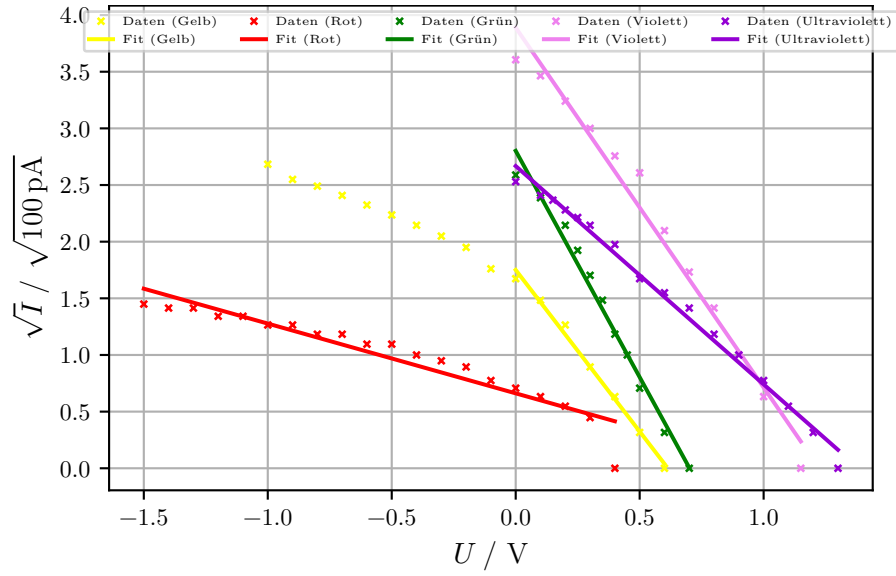
$$b_{\text{grün}} = 2.80 \pm 0.07 \sqrt{100 \text{ pA}}$$

$$a_{\text{violett}} = -3.18 \pm 0.14 \frac{\sqrt{100 \text{ pA}}}{\text{V}}$$

$$b_{\text{violett}} = 3.89 \pm 0.09 \sqrt{100 \text{ pA}}$$

$$a_{\text{ultraviolett}} = -1.93 \pm 0.05 \frac{\sqrt{100 \text{ pA}}}{\text{V}}$$

$$b_{\text{ultraviolett}} = 2.67 \pm 0.03 \sqrt{100 \text{ pA}}$$



**Abbildung 7:** Lineare Regressionen für die verschiedenen Spektrallinien.

Die Berechnung erfolgt mit SciPy, die Fehlerrechnung mittels uncertainties. Aus diesen Parametern wird die Nullstelle der Funktionen und damit  $U_g$  bestimmt. Es ergibt sich folglich für die Nullstellen  $N_x = U_{g, x}$ :

$$\begin{aligned}
 N_{\text{gelb}} &= (0,61 \pm 0,03) \text{ V} \\
 N_{\text{rot}} &= (1,07 \pm 0,10) \text{ V} \\
 N_{\text{grün}} &= (0,70 \pm 0,03) \text{ V} \\
 N_{\text{violett}} &= (1,22 \pm 0,06) \text{ V} \\
 N_{\text{ultraviolett}} &= (1,38 \pm 0,04) \text{ V}
 \end{aligned}$$



**Tabelle 1:** Messwerte für die verschiedenen Spektrallinien.

$U / \text{V}$	$I_{\text{Gelb}} / 100 \text{ pA}$	$I_{\text{Rot}} / 100 \text{ pA}$	$I_{\text{Grün}} / 100 \text{ pA}$	$I_{\text{Violett}} / 100 \text{ pA}$	$I_{\text{Ultraviolett}} / 100 \text{ pA}$
-1.50		2.1			
-1.40		2.0			
-1.30		2.0			
-1.20		1.8			
-1.10		1.8			
-1.00	7.2	1.6			
-0.90	6.5	1.6			
-0.80	6.2	1.4			
-0.70	5.8	1.4			
-0.60	5.4	1.2			
-0.50	5.0	1.2			
-0.40	4.6	1.0			
-0.30	4.2	0.9			
-0.20	3.8	0.8			
-0.10	3.1	0.6			
0.00	2.8	0.5	6.7	13.0	6.4
0.10	2.2	0.4	5.7	12.0	5.8
0.15					5.6
0.20	1.6	0.3	4.6	10.5	5.2
0.25			3.7		4.9
0.30	0.8	0.2	2.9	9.0	4.6
0.35			2.2		
0.40	0.4	0.0	1.4	7.6	3.9
0.45			1.0		
0.50	0.1		0.5	6.8	2.8
0.60	0.0		0.1	4.4	2.4
0.70			0.0	3.0	2.0
0.80				2.0	1.4
0.90				1.0	1.0
1.00				0.4	0.6
1.10					0.3
1.15				0.0	
1.20					0.1
1.30					0.0

Um nun das Verhältnis  $h/e_0$  und die Austrittsarbeit  $A_k$  bestimmen zu können, werden die zuvor berechneten  $N_x / U_{g, x}$  gegen die Lichtfrequenz  $\nu$  aufgetragen und linear gefittet. Die Lichtwellenlänge werden der Versuchsanleitung[1, S. 80] entnommen. Die Werte sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Der entsprechende Plot wurde in Abbildung 8 dargestellt. Die so bestimmten Parameter sind:

$$a = (2,60 \pm 0,09) \cdot 10^{-3} \frac{\text{V}}{\text{THz}}$$

$$b = (-0,73 \pm 0,06) \text{ V}.$$

Durch Vergleich mit Gleichung (2) werden folgende Zusammenhänge zwischen den Parametern und dem gesuchten Verhältnis  $h/e_0$  sowie der Austrittsarbeit  $A_k$  in eV hergeleitet:

$$\frac{h}{e_0} = a$$

$$A_k = -b \cdot [C].$$

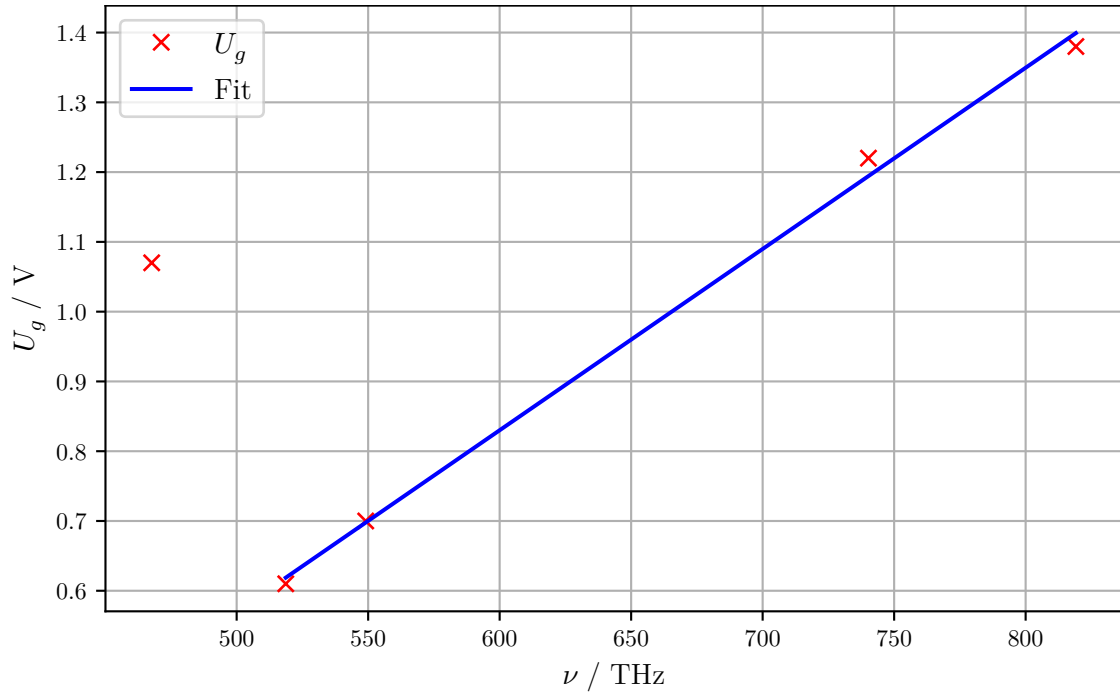
Somit wurden folgende Werte bestimmt:

$$\frac{h}{e_0} = (2,60 \pm 0,09) \cdot 10^{-15} \frac{\text{J s}}{\text{C}}$$

$$A_k = (0,73 \pm 0,06) \text{ eV}.$$

**Tabelle 2:** Die untersuchten Spektrallinien des Lichtes.

$\lambda$ / nm	$\nu$ / THz	$U_g$ / V	Farbe
671	467.69	$1.07 \pm 0.10$	rot
578	518.67	$0.61 \pm 0.03$	gelb
546	549.07	$0.70 \pm 0.03$	grün
405	740.23	$1.22 \pm 0.06$	violett
366	819.11	$1.38 \pm 0.04$	ultraviolett

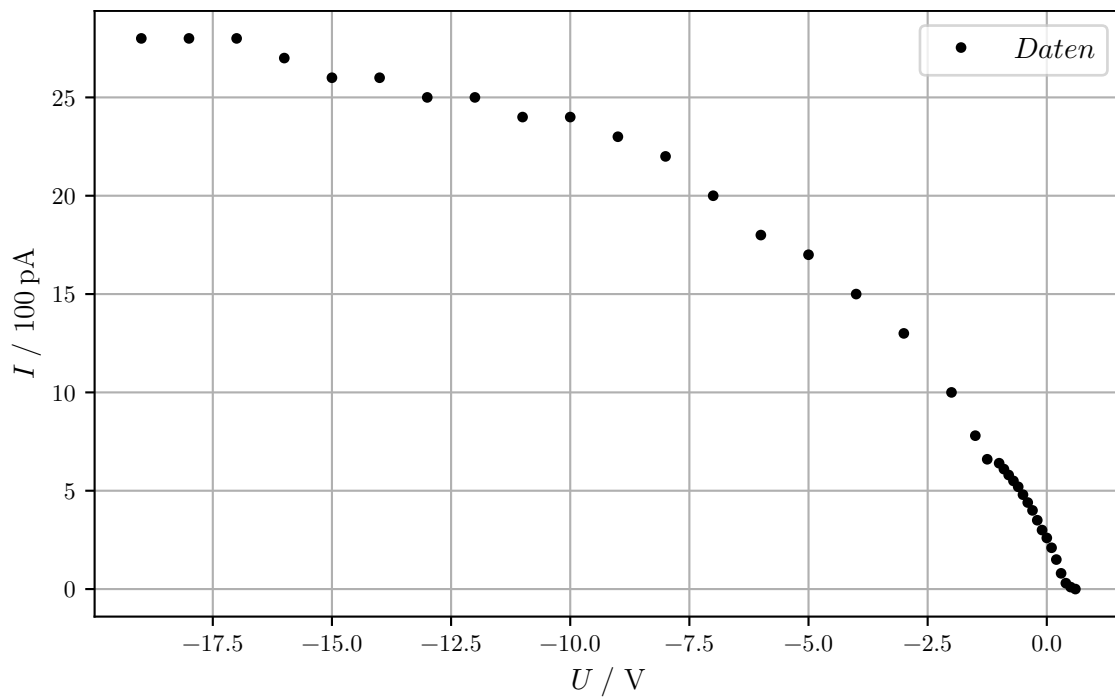


**Abbildung 8:** Lineare Regressionen der einzelnen  $U_g$  gegen die Lichtwellenlänge  $\nu$ .

Bei der zweiten Messreihe wurden die in Tabelle 3 befindlichen Daten aufgenommen. Nun wird  $I$  gegen  $U$  in einem Diagramm aufgetragen. Dies ist in Abbildung 9 zu sehen. Zur Deutung des Kurvenverlaufes müssen verschiedene Fregestellungen geklärt werden. So zum Einen, dass sich der Photostrom bei steigender Beschleunigungsspannung einem Sättigungswert annähert. Dies geht darauf zurück, dass der maximale Photostrom von der Intensität des Lichtes abhängt. Ist die Beschleunigungsspannung groß genug um alle herausgelösten Elektronen zur Anode zu bewegen, lässt sich der Strom nicht mehr vergrößern. Das asymptotische Annähern an den Sättigungswert ist dabei unter anderem der Energieverteilung der Elektronen im Festkörper zuzuschreiben, wodurch manche Elektronen mit einer sehr geringen Energie austreten und deshalb erst bei großen Beschleunigungsspannungen die Anode erreichen. Analog dazu wird das Absinken des Photostromes schon vor Erreichen der Bremsspannung  $U_g$  darauf zurück geführt, dass die Elektronen unterschiedliche Energien im Festkörper besitzen. Außerdem kann unter Umständen ein negativer Strom auftreten. Dieser geht darauf zurück, dass das Kathodenmaterial bereits bei  $T = 20^\circ\text{C}$  verdampfen kann, und somit Elektronen frei werden. Diese lagern sich an der Kathode an und werden dann von der Bremsspannung zur Kathode beschleunigt. Da es sich hierbei jedoch um eine sehr geringe Anzahl an Elektronen handelt, wird sehr schnell ein Sättigungswert erreicht. Da solche negativen Ströme auch bei energiearmen Licht auftreten, kann geschlussfolgert werden, dass die Anode eine Austrittsarbeit besitzt, welche der der Kathode ähnelt.

**Tabelle 3:** Messwerte für die gelbe Spektrallinie bei 278 nm

$U / \text{V}$	$I_{\text{Gelb}} / 100 \text{ pA}$	$U / \text{V}$	$I_{\text{Gelb}} / 100 \text{ pA}$
-19.0	28	-1.25	6.6
-18.0	28	-1.00	6.4
-17.0	28	-0.90	6.1
-16.0	27	-0.80	5.8
-15.0	26	-0.70	5.5
-14.0	26	-0.60	5.2
-13.0	25	-0.50	4.8
-12.0	25	-0.40	4.4
-11.0	24	-0.30	4.0
-10.0	24	-0.20	3.5
-9.00	23	-0.10	3.0
-8.00	22	0.00	2.6
-7.00	20	0.10	2.1
-6.00	18	0.20	1.5
-5.00	17	0.30	0.8
-4.00	15	0.40	0.3
-3.00	13	0.50	0.1
-2.00	10	0.60	0.0
-1.50	7.8		



**Abbildung 9:** Verlauf von  $I$  gegen  $U$  für die gelbe Spektrallinie bei 278 nm.

## 5 Diskussion

Betrachtet man die Daten der roten und gelben Spektrallinien in Abbildung 7 so sieht es so aus, als würde ein anderer Zusammenhang, als ein linearer bestehen. So müssen bei der gelben Spektrallinie einige Messwerte aus dem Fit genommen werden, um eine vernünftige Ausgleichsrechnung durchführen zu können. Hier hätte man einen kleineren Messbereich nutzen sollen. Der Fit der roten Daten hingegen ist im Vergleich zu den restlichen Ausgleichsgeraden sehr flach. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass die rote Spektrallinie auf dem Schirm nicht, wie in der Anleitung dargestellt, stark sichtbar war, sondern eher schwach. Dieser Umstand hat auch Auswirkungen auf die Bestimmung der  $h/e_0$ . Wie in Abbildung 8 erkennbar ist, passt der bestimmte Wert für  $U_g$  nicht zu der gegebenen Lichtwellenlänge des roten Lichtes. Sie müssen daher für eine bessere Regression ignoriert werden. Es wird nun der bestimmte Wert für  $h/e_0$  mit einem aus den Literaturwerten für  $h$ [3] und  $e_0$ [2] errechneten Verhältnis verglichen.

$$\begin{aligned}h &= 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \\e_0 &= 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C} \\ \frac{h}{e_0} &= 4,14 \cdot 10^{-15} \frac{\text{J s}}{\text{C}} \\ \left(\frac{h}{e_0}\right)_{\text{gemessen}} &= (2,60 \pm 0,09) \cdot 10^{-15} \frac{\text{J s}}{\text{C}}\end{aligned}$$

Dies ergibt eine Abweichung von 37,12 % zwischen dem experimentell bestimmten Wert und dem Wert, der sich aus den Literaturwerten ergibt.

## Literatur

- [1] TU Dortmund. *Anleitung zum Versuch V500: Der Photoeffekt*. 2018.
- [2] *elementary charge*. URL: <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?e> (besucht am 27.05.2018).
- [3] *Planck constant*. URL: <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?h> (besucht am 27.05.2018).