

V500 Der Photoeffekt

Katharina Brägelmann Tobias Janßen
katharina.braegelmann@tu-dortmund.de
tobias2.janssen@tu-dortmund.de

Durchführung: 17. April 2018, Abgabe: 24. April 2018

Inhaltsverzeichnis

1	Theorie	3
2	Aufbau und Durchführung	4
3	Auswertung	6
3.1	Abhängigkeit der Energie der Elektronen von der Lichtfrequenz	6
3.2	Abhängigkeit des Elektronenstroms von der Gegenspannung	15
4	Diskussion	16

1 Theorie

Licht hat einen Teilchen- und einen Wellencharakter. Diese sind die Grenzfälle der Quantenelektrodynamik. Für den Photoeffekt ist nur die korpuskulare Betrachtungsweise von Bedeutung. Bei dieser Betrachtung wird die Energie in Form von Lichtquanten durch den Raum transportiert. Die Energie der Photonen tritt nur gequantelt auf. Wenn die Photonen auf ein Elektron treffen, so können diese ihre Energie an die Elektronen abgeben. Die Energie der Elektronen nach dem Stoß setzt sich wie folgt zusammen:

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

h ist dabei das Plancksche Wirkungsquantum und ν die Frequenz des Lichtes. A_k beschreibt die Austrittsarbeit eines Elektrons welche von Material zu Material unterschiedlich ist. Zusätzlich ist E_{kin} von der Energie abhängig welche die Elektronen im Material besaßen, dies kann jedoch vernachlässigt werden. Der Gleichung ist zu entnehmen, dass die Energie der Elektronen abhängig von der Frequenz ν ist. Es gibt eine Grenzfrequenz, wenn die Energie des Photons kleiner ist als die Austrittsarbeit, unter der keine Elektronen ausgelöst werden können. Die Intensität des eingestralten Lichtes hat nur einen Einfluss auf die Anzahl der ausgelösten Elektronen pro Zeit nicht aber auf die Energie. Mit der Fermi-Dirac-Statistik lässt sich eine Aussage über die Energieverteilung der Elektronen im Festkörper treffen. Die Energie der Elektronen kann demnach nur zwischen 0 und der Fermi-Energie liegen. Temperaturabhängig gibt es vereinzelt Elektronen deren Energie über der Fermi-Energie liegt.

Für den Photostrom gilt desweiteren:

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

A_A ist die Austrittsarbeit aus der Anode. Ist A_A größer als $h\nu + e_0 U_b$ so kann es, wie in Abbildung 1a zu sehen ist, zu einem negativen Strom kommen.

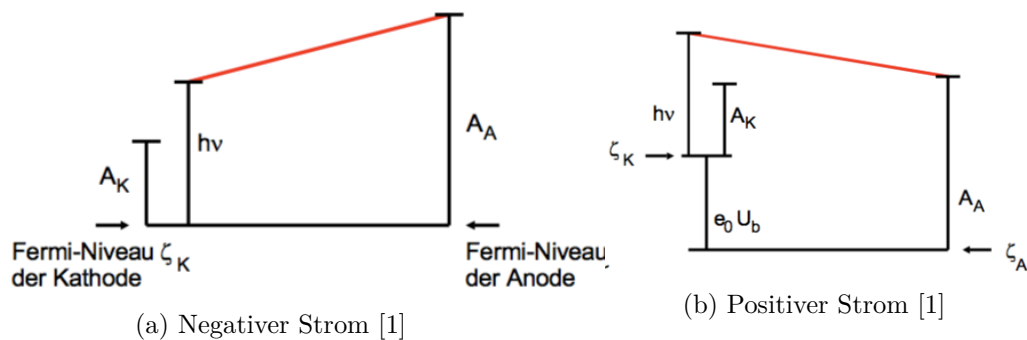


Abbildung 1: Potentialverhältniss zwischen Anode und Kathode

2 Aufbau und Durchführung

Eine Spektrallampe erzeugt Licht welches anschließend gebündelt wird und durch eine Spaltblende fällt. Hinter der Spaltblende wird das Licht abermals gebündelt und durch einen Geradsichtprisma geleitet. Der Prisma teilt das einfallende Licht in seine Spektrallinien auf. Mit einer schwenkbaren Photozelle kann fast monochromatisches Licht vermessen werden. Dieser Aufbau ist in der Abbildung 2 zu sehen.

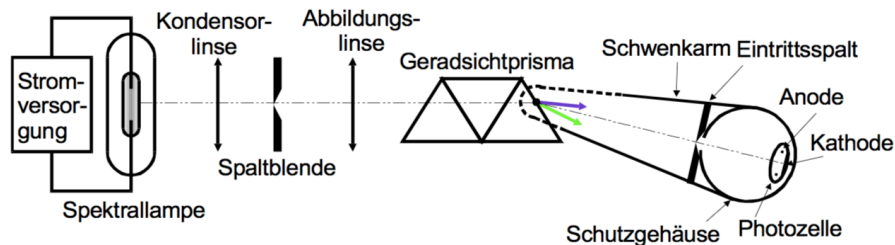


Abbildung 2: Aufbau des Versuches [1]

Die Photozelle ist in einem evakuierten Glaskolben, um Wechselwirkungen der Elektronen mit der Luft zu verhindern. Dieser besteht aus einer Photokathode, aus der nach Auftreffen von Photonen Elektronen ausgelöst werden können, und einer Auffängerelektrode welche für die Vermessung der Elektronen von Bedeutung ist. In Abbildung 3 ist der Aufbau der Photozelle schematisch dargestellt.

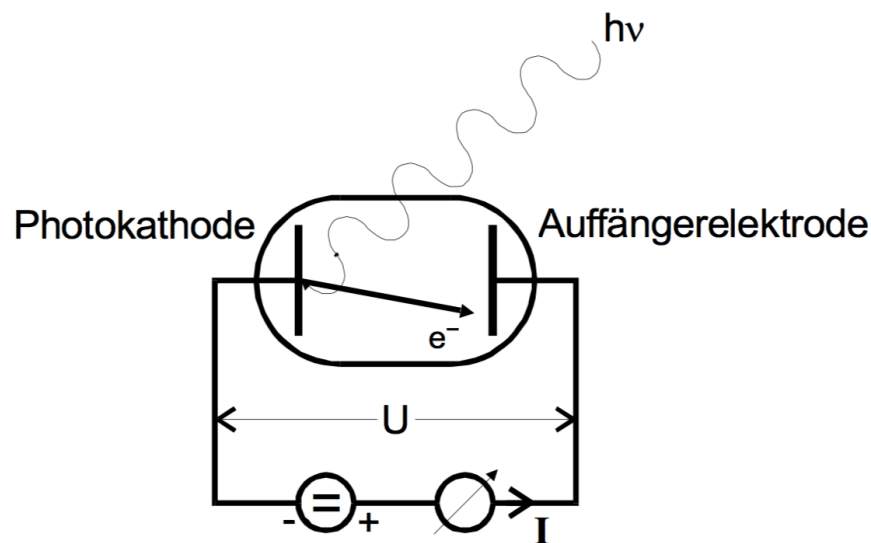


Abbildung 3: Aufbau der Photozelle [1]

Die Elektrode, welche mit einem Drahring nahe der Kathode realisiert ist, misst den

Stromfluss, der durch die auftreffenden Elektronen entsteht. Zusätzlich kann die Elektrode ein beschleunigendes oder abbremsendes Elektrisches-Feld erzeugen. Mit dem Elektrischen-Feld kann bestimmt werden welche kinetische Energie die Elektronen besitzen. Solange die Energie der Elektronen größer ist als die Bremsspannung $e_0 U_g$ erreichen die Elektronen die Anode. Zwischen Photostrom I_{Ph} und der Bremsspannung U herrscht ein parabolischer Zusammenhang.

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

Der Zusammenhang zwischen dem Photostrom I und der Bremsspannung ist in der Abbildung 4 aufgetragen.

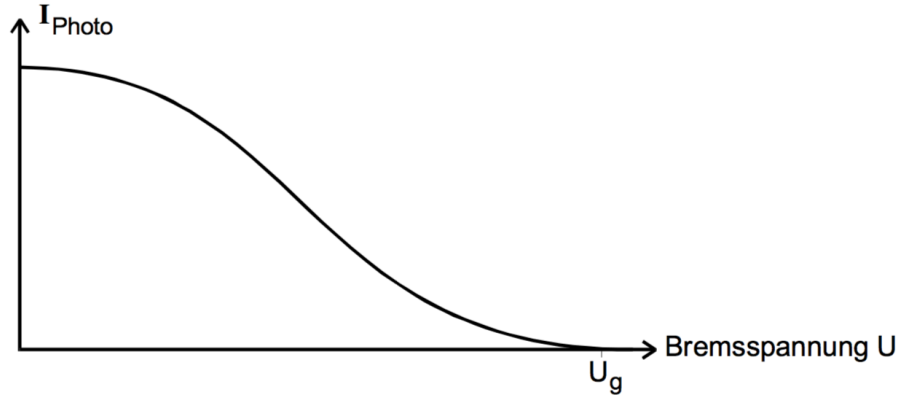


Abbildung 4: Photostrom in Abhängigkeit von der Bremsspannung [1]

Es kommen keine Elektronen mehr an, wenn gilt:

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

e_0 ist dabei die Elementarladung und m_0 die Masse eines Elektrons. v_{\max} ist die Geschwindigkeit der schnellsten Elektronen. Nach Gleichung 1 gilt für die diese demnach:

$$h\nu = e_0 U_g - A_k \quad (3)$$

3 Auswertung

3.1 Abhängigkeit der Energie der Elektronen von der Lichtfrequenz

Die Messwerte des Photostroms I und der Gegenspannung U sind in Tabelle 1, 2, 3, 4 und 5 notiert. \sqrt{I} ist in den Abbildungen 5, 6, 7, 8 und 9 für verschiedene Wellenlängen gegen U aufgetragen. Die lineare Regression der Form $y = ax + b$ wird jeweils mit Python erstellt. Die Grenzspannung $U_g = x$ wird als Nullstelle berechnet mit

$$0 = ax + b \Leftrightarrow x = -\frac{b}{a}.$$

Analog erfolgt die Rechnung für die weiteren Wellenlängen.

Tabelle 1: Photostrom I in Abhängigkeit von der Bremsspannung U für $\lambda = 405 \text{ nm}$

U/V	I/nA	$\sqrt{I}/\sqrt{\text{nA}}$
0,001	0,40	0,633
0,142	0,35	0,592
0,100	0,30	0,548
0,223	0,27	0,520
0,355	0,20	0,447
0,354	0,14	0,374
0,444	0,10	0,316
0,691	0,07	0,265
0,686	0,05	0,224
0,905	0,03	0,173

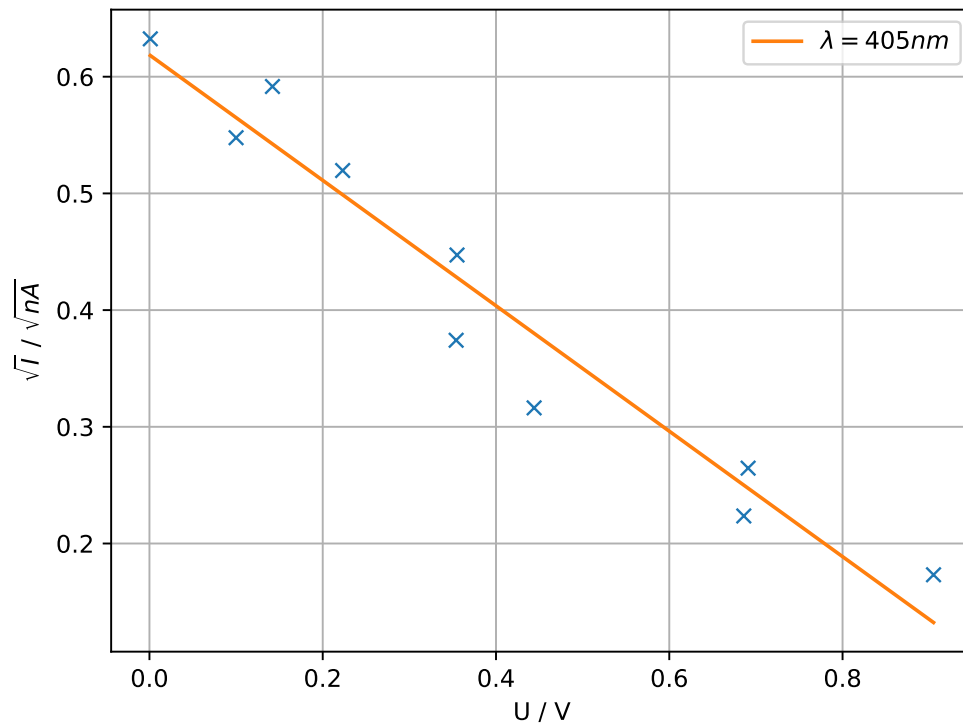


Abbildung 5: Photostrom I gegen Bremsspannung U für $\lambda = 405nm$ (Violett)

$$a = (-1,699 \pm 2,168 \cdot 10^{-7}) 10^{-5} \frac{\sqrt{A}}{V}$$

$$b = (1,956 \pm 4,976 \cdot 10^{-8}) 10^{-5} \sqrt{A}$$

$$-\frac{b}{a} = 1,151 \text{ V}$$

Tabelle 2: Photostrom I in Abhängigkeit von der Bremsspannung U für $\lambda = 436 \text{ nm}$

U/V	I/nA	\sqrt{I}/\sqrt{nA}
0,001	1,2	1,095
0,061	1,0	1,000
0,111	0,9	0,949
0,159	0,81	0,900
0,231	0,69	0,831
0,295	0,61	0,781
0,356	0,5	0,707
0,422	0,4	0,632
0,499	0,29	0,538
0,577	0,2	0,447
0,702	0,1	0,316

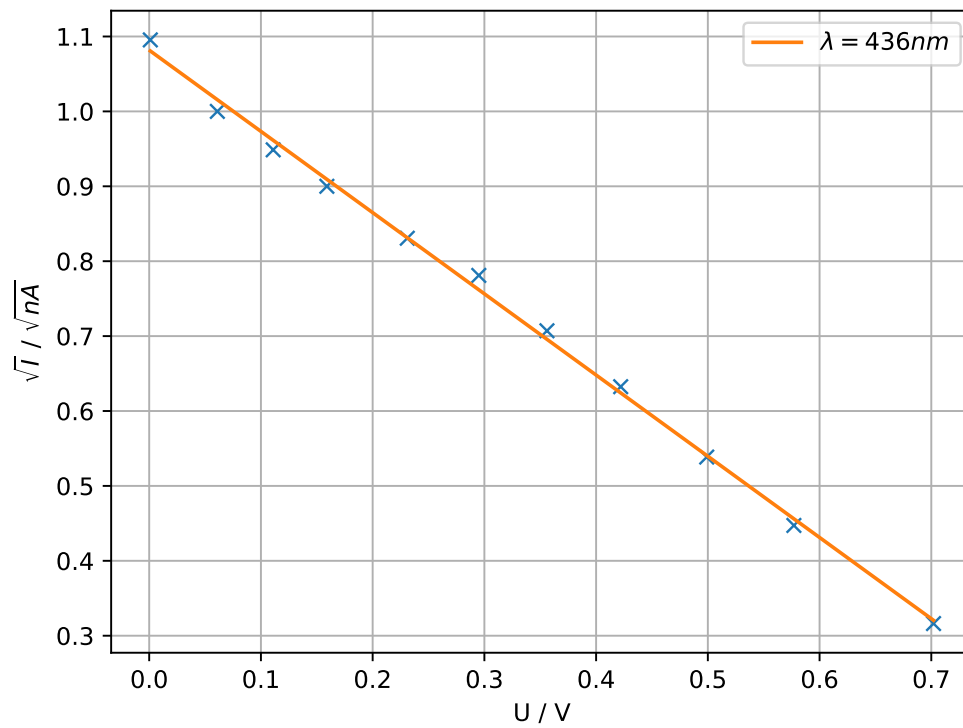


Abbildung 6: Photostrom I gegen Bremsspannung U für $\lambda = 436 \text{ nm}$ (Violett)

$$c = (-3,429 \pm 9,474 \cdot 10^{-9}) 10^{-5} \frac{\sqrt{A}}{V}$$

$$d = (3,421 \pm 4,333 \cdot 10^{-9}) 10^{-5} \sqrt{A}$$

$$-\frac{d}{c} = 0,998 \text{ V}$$

Tabelle 3: Photostrom I in Abhängigkeit von der Bremsspannung U für $\lambda = 492 \text{ nm}$

U/V	I/nA	\sqrt{I}/\sqrt{nA}
0,001	0,082	0,286
0,069	0,070	0,265
0,131	0,060	0,245
0,182	0,050	0,224
0,246	0,040	0,200
0,305	0,030	0,173
0,379	0,020	0,141
0,486	0,010	0,100
0,763	0,000	0,000

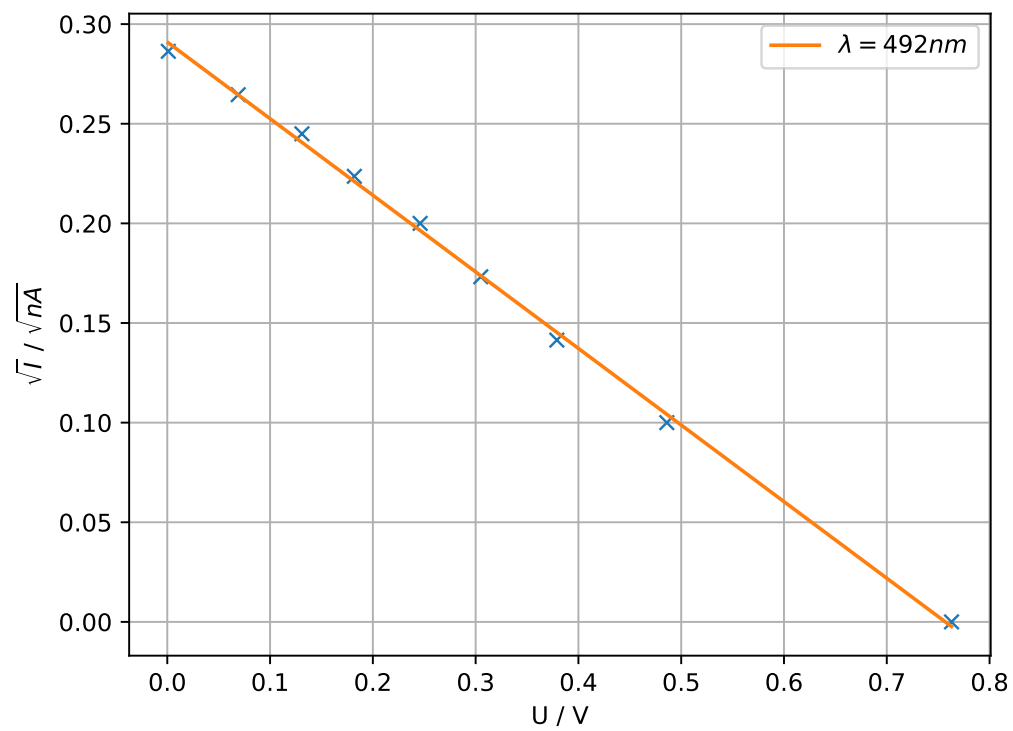


Abbildung 7: Photostrom I gegen Bremsspannung U für $\lambda = 492nm$ (Cyan)

$$e = (-1,216 \pm 3,049 \cdot 10^{-9})10^{-5} \frac{\sqrt{A}}{V}$$

$$f = (9,202 \pm 3,966 \cdot 10^{-9})10^{-6} \sqrt{A}$$

$$-\frac{f}{e} = 0,757 \text{ V}$$

Tabelle 4: Photostrom I in Abhängigkeit von der Bremsspannung U für $\lambda = 546 \text{ nm}$

U/V	I/nA	\sqrt{I}/\sqrt{nA}
0,001	0,61	0,781
0,113	0,50	0,707
0,195	0,40	0,632
0,275	0,30	0,548
0,353	0,20	0,447
0,443	0,10	0,316
0,458	0,08	0,283
0,490	0,06	0,245
0,529	0,04	0,200
0,590	0,02	0,141

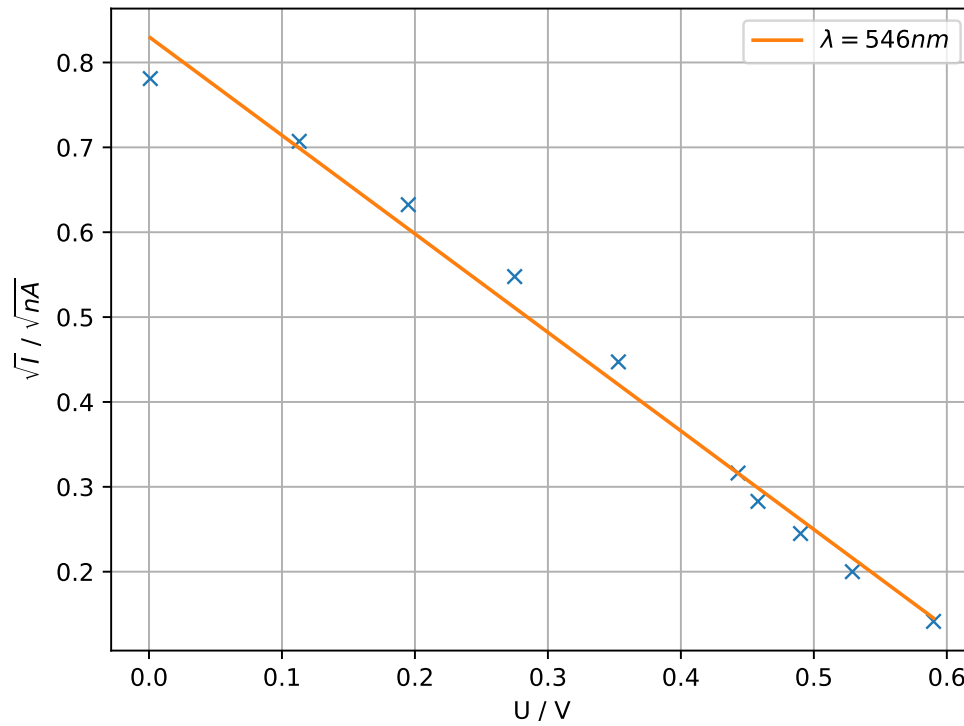


Abbildung 8: Photostrom I gegen Bremsspannung U für $\lambda = 546 \text{ nm}$ (Grün)

$$g = (-3,671 \pm 2,245 \cdot 10^{-7})10^{-5} \frac{\sqrt{A}}{V}$$

$$h = (2,626 \pm 3,423 \cdot 10^{-8})10^{-5} \sqrt{A}$$

$$-\frac{h}{g} = 0,715 \text{ V}$$

Tabelle 5: Photostrom I in Abhängigkeit von der Bremsspannung U für $\lambda = 578 \text{ nm}$

U/V	I/nA	\sqrt{I}/\sqrt{nA}
0,001	0,30	0,548
0,148	0,20	0,447
0,289	0,10	0,316
0,308	0,08	0,283
0,316	0,07	0,265
0,335	0,06	0,245
0,356	0,05	0,224
0,379	0,04	0,200
0,399	0,03	0,173
0,437	0,02	0,141
0,479	0,01	0,100
0,545	0,00	0,000

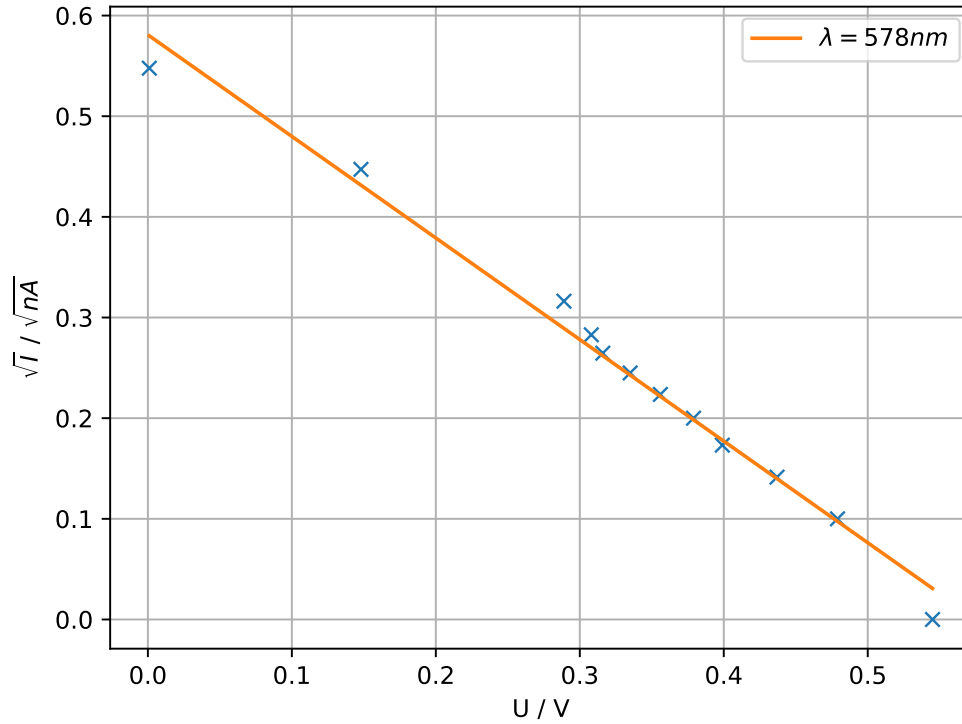


Abbildung 9: Photostrom I gegen Bremsspannung U für $\lambda = 578nm$ (Orange)

$$i = (-3,191 \pm 1,373 \cdot 10^{-7}) 10^{-5} \frac{\sqrt{A}}{V}$$

$$j = (1,837 \pm 1,785 \cdot 10^{-8}) 10^{-5} \sqrt{A}$$

$$-\frac{j}{i} = 0,576 \text{ V}$$

Die Frequenz des Lichtes berechnet sich aus der Wellenlänge λ und der Lichtgeschwindigkeit c :

$$f = \frac{c}{\lambda}.$$

Die Grenzspannungen U_g werden gegen die Lichtfrequenz aufgetragen (Tab. 6, Abb. 10). Die lineare Ausgleichsrechnung der Form $y = kx + l$ wird mit Python gemacht. Um die Größe h/e_0 zu bestimmen wird die kinetische Energie der Elektronen wie folgt umgestellt:

$$hf = e_0 U_g + A_K \Leftrightarrow U_g = \frac{h}{e_0} f - \frac{A_K}{e_0}.$$

Tabelle 6: Bremsspannung U_g in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ bzw. der Frequenz f

λ nm	f 10^{15}Hz	U_g V
405	0,7402	1,151
436	0,6876	0,998
492	0,6093	0,757
546	0,5491	0,715
578	0,5187	0,576

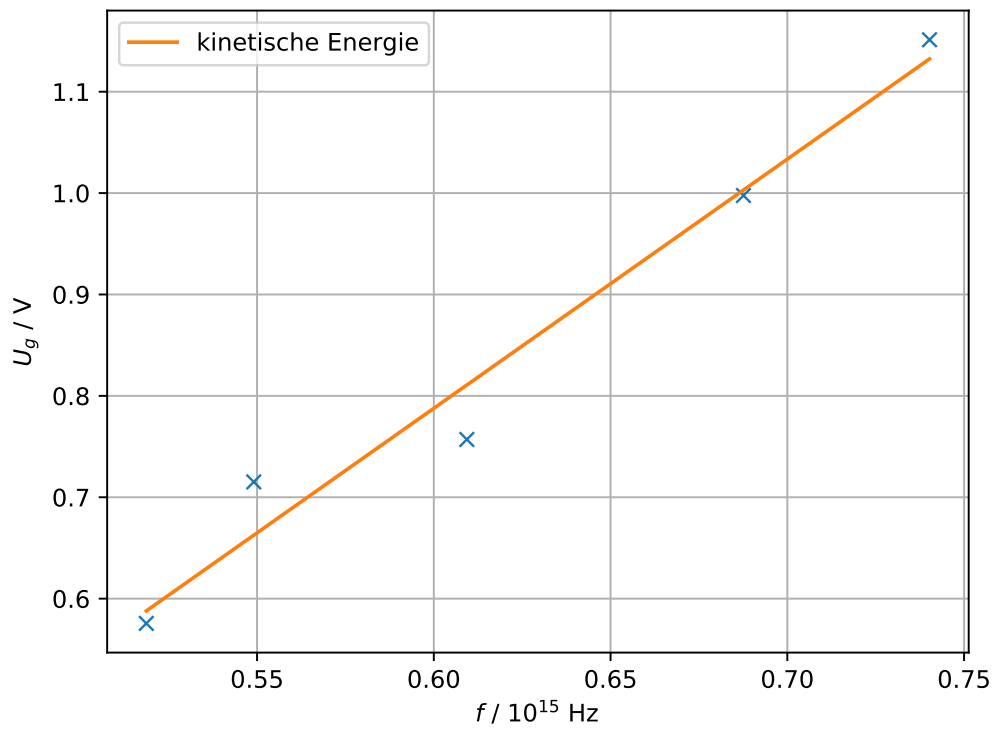


Abbildung 10: Grenzspannung gegen Lichtfrequenz

Die Steigung k des Graphen in Abbildung 10 entspricht der Größe h/e_0 , der Y-Achsenabschnitt

l entspricht der Größe $-A_K/e_0$:

$$\begin{aligned}\frac{h}{e_0} = k &= (2,457 \pm 0,060) 10^{-15} \frac{\text{A}}{\text{V}} \\ \frac{A_K}{e_0} = l &= (-0,687 \pm 0,024) \text{ V}\end{aligned}$$

l mit der Elektronenladung [2] multipliziert ergibt die Austrittsarbeit A_K :

$$A_K = (1,1002 \pm 0,0038) 10^{-19} \text{ J} = (0,687 \pm 0,024) \text{ eV}$$

3.2 Abhängigkeit des Elektronenstroms von der Gegenspannung

Die Messwerte des Photostrom und der Gegenspannung sind in Tabelle 7 notiert. Die Abbildung 11 zeigt den Stromverlauf in Abhängigkeit der Gegenspannung.

Tabelle 7: Photostrom I in Abhängigkeit von der Bremsspannung U für $\lambda = 578 \text{ nm}$

U/V	I/nA	U/V	I/nA
0,001	0,30	-1,236	0,70
0,148	0,20	-1,600	0,80
0,289	0,10	-1,855	0,90
0,308	0,08	-2,32	1,00
0,316	0,07	-3,67	1,20
0,335	0,06	-3,67	1,40
0,356	0,05	-3,94	1,50
0,379	0,04	-4,24	1,60
0,399	0,03	-6,31	1,70
0,437	0,02	-8,05	1,80
0,479	0,01	-9,75	1,90
0,545	0,00	-7,41	2,00
-0,001	0,28	-10,50	2,20
-0,272	0,40	-12,98	2,40
-0,554	0,50	-19,16	2,50
-0,898	0,60	-16,33	2,60

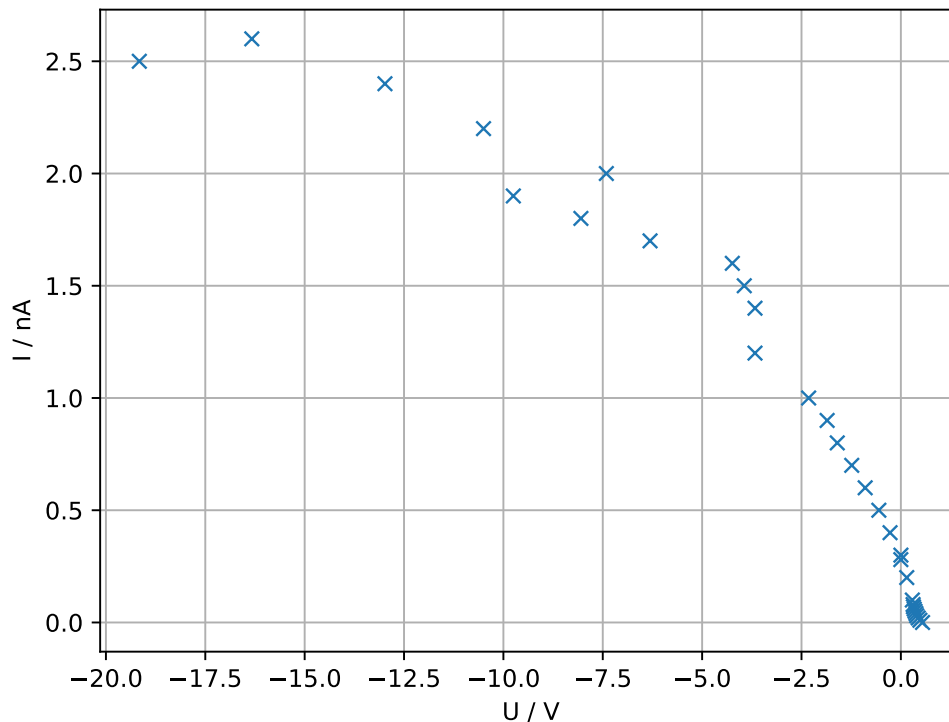


Abbildung 11: Photostrom gegen Gegenspannung

4 Diskussion

Initial lässt sich sagen, dass sich das Aufnehmen der Messwerte schwierig gestaltet. Die Fehlerquellen sind so zum Beispiel defekte Kabel an der Anode und Kathode und starke Schwankungen des Photostroms ohne Veränderung der Parameter. In der ersten Messreihe wird schnell festgestellt, dass sich bei der niederenergetischen orangenen Wellenlänge $\lambda = 578 \text{ nm}$ ohne Gegenspannung gar kein Photostrom einstellt. Nach dem Wechseln der Messapparatur wird klar, dass die Intensität der ersten Spektrallampe nicht stark genug war, um einen Photostrom auszulösen. Die Messung wird erneut gestartet.

Auch mit der zweiten Messapparatur kommen Probleme auf. Bei den höherenergetischen Wellenlängen $\lambda = 405 \text{ nm}$ und $\lambda = 436 \text{ nm}$ (Violett) lassen sich die Messwerte ganz gut ablesen. Dennoch lässt sich eine gewisse Schwankung des Messzeigers des Amperemeters ausmachen. Besonders bei den niederenergetischeren Wellenlängen schwankt das Amperemeter beträchtlich, ohne dass die Parameter geändert werden. Für das cyanfabene Licht ($\lambda = 492 \text{ nm}$) sind die Schwankungen besonders stark. So fällt das Amperemeter in der Messung von etwa $I = 0,040 \text{ nA}$ ohne Änderung der Parameter auf $I = 0,020 \text{ nA}$ um dann auf $I = 0,060 \text{ nA}$ zu steigen. Die Graphen zu den schwierig messbaren niederenergetischen

Wellenlängen $\lambda = 578 \text{ nm}$ (Abb. 9), $\lambda = 546 \text{ nm}$ (Abb. 8) und $\lambda = 492 \text{ nm}$ (Abb. 7) haben dennoch den erwarteten linearen Verlauf. Auch der Graph zur Wellenlänge $\lambda = 436 \text{ nm}$ (Abb. 5) liegt im erwarteten linearen Rahmen.

Im Gegensatz dazu scheint der Graph zur Wellenlänge $\lambda = 405 \text{ nm}$ (Abb. 6) ungenau. Die Größe h/e_0 wird zu

$$\frac{h}{e_0} = (2,457 \pm 0,060) 10^{-15} \frac{\text{A}}{\text{V}}$$

berechnet. Der Literaturwert wird aus den Größen h und e_0 berechnet [2]:

$$\frac{h}{e_0} = 4,136 \cdot 10^{-15} \text{ Js}$$

Die relative Abweichung f berechnet sich durch:

$$f = \frac{x_{exp} - x_{theo}}{x_{theo}}$$

und beträgt $f = 40,58 \%$. Die Austrittsarbeit des Kathodenmaterials wird als

$$A_K = (0,687 \pm 0,024) \text{ eV}$$

bestimmt.

In der zweiten Messreihe wird der Photostromverlauf über eine breitere Gegenspannung abgemessen (Abb. 11). Auffällig ist, dass bei sehr niedrigen Gegenspannungen ein Sättigungsstrom auftritt. Dieser ist dadurch zu erklären, dass der Strom abhängig von der Intensität ist. Da die Intensität der Spektrallampe konstant ist, kann nur ein maximaler Strom auftreten. Ein Sättigungsstrom bei niedrigen Gegenspannungen ließe sich zum Beispiel durch eine geringere Intensität des Lichtes erzeugen. Eine weitere Möglichkeit ist, bei gleicher Frequenz des Lichtes und gleicher Bremsspannung die Austrittsarbeit des Materials zu erhöhen, dies ist aber schwer zu realisieren. Damit sind die Elektronen nach Austritt aus dem Material langsamer und der Strom wird kleiner.

Außerdem ist dem Graphen zu entnehmen, dass der Photostrom auch schon bei Gegenspannungen von $U > U_g$ sehr klein wird. Rückblickend lässt sich sagen, dass weitere Messwerte im Bereich der Gegenspannungen von $U = 0V$ bis $U = 1V$ dieses Phänomen besser gezeigt hätten.

Desweiteren kommt auch ein negativer Photostrom zustande. Diesem Phänomen liegt die niedrige Siedetemperatur des Kathodenmaterials zugrunde. Bei Raumtemperatur verdampft bereits ein geringer Teil des Kathodenmaterials und lagert sich auf der Anode ab. Durch Reflexionen gelangt auch Licht auf die Anode und Elektronen werden aus dem Anodenmaterial ausgeschlagen.

Der negative Photostrom bei niederenergetischen Wellenlängen lässt sich durch die niedrige Austrittsarbeit des Anodenmaterials erklären.

Literatur

- [1] TU Dortmund. In: *Versuchsanleitung V500*.
- [2] Casio Taschenrechner. In: *fx-991ES*.

V500 Photoeffekt				17/04/18			
Orange		UV_1^2		$UV_{1/2}$		Cyan	
I	U	I	U	I	U	I	U
nA	V	nA	V	nA	V	nA	V
0,31	0,001	1,2	0,001	0,46	0,001	0,035	0,001
0,3	0,021	1	0,061	0,3	0,100	0,082	0,001
0,24	0,044	0,9	0,111	0,2	0,355	0,08	0,054
0,2	0,069	0,81	0,159	0,14	0,354	0,07	0,069
0,14	0,103	0,78	0,231	0,1	0,444	0,06	0,131
0,1	0,140	0,61	0,295	0,05	0,686	0,05	0,182
		0,5	0,356	0,27	0,233	0,04	0,246
		0,4	0,422	0,35	0,142	0,03	0,305
		0,28	0,499	0,35	0,142	0,02	0,379
		0,2	0,577	0,07	0,691	0,01	0,486
		0,1	0,702	0,03	0,905	0	0,763

Grün		Orange		2. Messung			
I	U	I	U	I	U	I	U
nA	V	nA	V	nA	V	nA	V
0,61	0,001	0,3	0,001	0,28	-0,001	1,2	-3,67
0,5	0,113	0,2	0,148	0,4	-0,272	1,4	-3,67
0,4	0,195	0,1	0,289	0,5	-0,554	1,6	-4,24
0,3	0,275	0,08	0,308	0,6	-0,858	1,8	-8,05
0,2	0,353	0,07	0,316	0,7	-1,236	2,2	-10,50
0,1	0,443	0,06	0,335	0,8	-1,600	2,4	-12,98
0,08	0,458	0,05	0,356	0,9	-1,855	2,6	-16,33
0,06	0,480	0,04	0,379	1	-2,32	1,5	-3,94
0,04	0,525	0,03	0,395	2	-7,41	1,7	-6,31
0,02	0,590	0,02	0,437	2,5	-19,16	1,9	-9,75
		0,01	0,479				

Abbildung 12: Originale Messdaten