

Physiklabor für Anfänger*innen
Ferienpraktikum im Wintersemester 2018/19

Versuch 81:
Bestimmung von h mit dem Photoeffekt

(durchgeführt am 04.03.2019)

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
1 Ziel des Versuchs	1
2 Versuchsaufbau und Durchführung	1
2.1 Aufbau	1
2.2 Durchführung	1
3 Physikalische Zusammenhänge	3
4 Auswertung und Fehleranalyse	3
4.1 Auswertung zu Teil 1 : Spektrum der Leuchtdioden	3
4.2 Auswertung zu Teil 2: Strom - Spannungs - Kennlinie bei konstanter Frequenz .	4
4.3 Auswertung zu Teil 3: Messdaten zum Photostrom bei unterschiedlichen Gegen- spannungen	5
4.4 Auswertung Teil 4: Bestimmung des plankschen Wirkungsquantums	7
5 Diskussion der Ergebnisse	9
5.1 Teil 2: Strom - Spannungs - Kennlinie bei konstanter Frequenz	9
5.2 Teil 3: Photostrom bei unterschiedlichen Gegenspannungen	9
5.3 Teil 4: Bestimmung des plankschen Wirkungsquantums	9
Abbildungsverzeichnis	11
Tabellenverzeichnis	11
Literatur	11
6 Anhang	12

1 Ziel des Versuchs

Mit Hilfe des photoelektrischen Effekts soll in diesem Versuch das planksche Wirkungsquantum h bestimmt werden. Ausserdem soll der Einfluss von Strahlungsintensität und Frequenz untersucht werden.

2 Versuchsaufbau und Durchführung

2.1 Aufbau

Der Versuch besteht aus einer Steckplatte, auf die verschiedene LED's eine Vakuum-Photozelle und Verbindungskabel aufgebracht werden können (vgl. Abb. 1). Außerdem steht ein fertiger Versuchsaufbau zum Messen der Wellenlänge zur Verfügung. Dieser besteht aus einer Steckplatte für die verschiedenen Leuchtdioden und einem Spektrometer, welches mit dem Programm OceanView verbunden ist.

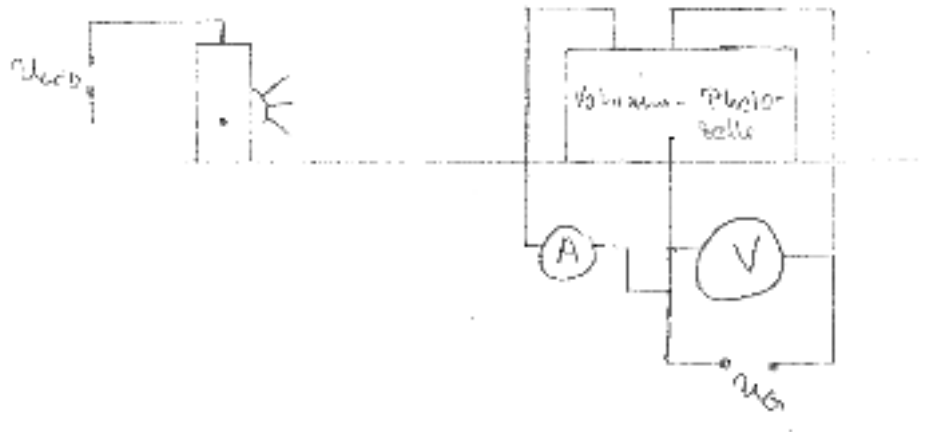


Abbildung 1: Versuchsaufbau zum Messen des Photostroms

2.2 Durchführung

Teil 1

Im ersten Teil des Versuchs wurden die verschiedenen LED's mit dem Spektrometer vermessen und die Wellenlänge mit Hilfe des Programms OceanView visuell ausgewertet. Dabei wurde sowohl das Maximum, als auch das FWHM (Full Width Half Maximum) notiert.

Teil 2

Sowohl in Teil 2, als auch in Teil 1 wurde die Stromfehlerschaltung nach dem Schaltplan aus Abb. 2 verwendet.

Im zweiten Teil des Versuchs wurde die 380 nm LED bei unterschiedlichen Intensitäten vermessen. Dazu wurde die LED bei gleicher Betriebsspannung in drei unterschiedliche Entfernungen zur Photozelle angeschlossen und der Photostrom bei einer Gegenspannung zwischen -4 V und 4 V aufgenommen. Da der Photostrom in diesem Intervall seine Größenordnung ändert musste das

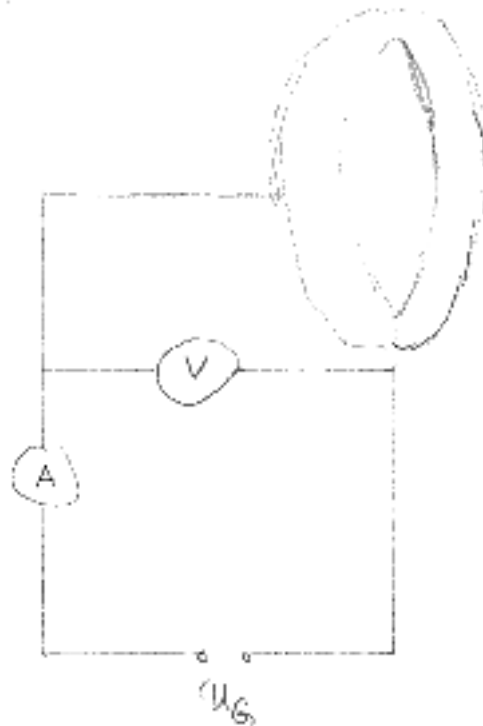


Abbildung 2: Zum Messen des Photostroms genutzte Schaltung

Amperemeter zwischendurch verstellt werden, der Wechsel wurde aber notiert und der jeweilige Fehler aufgeschrieben.

Teil 3

Im dritten Teil des Versuchs wurden alle fünf LED's vermessen. Es wurde jeweils der Photostrom für Spannungen zwischen 0 V und 2 V aufgenommen, wobei bei negativen Werten des Photostroms gestoppt wurde, da in der Auswertung die Wurzel des Photostroms genutzt werden sollte. Dabei wurde darauf geachtet, dass alle Messreihen bei einer minimalen Gegenspannung von ungefähr 0 V einen Photostrom im Bereich um $70 \mu\text{A}$ hatten. Für jede LED wurde eine Messreihe mit Gegenspannung und jeweiligem Photostrom aufgenommen.

Anmerkung zum Vorzeichen der Gegenspannung

Die im Messheft notierten Werte der Gegenspannung haben jeweils das andere Vorzeichen, da unsere Spannungsquelle andersherum gesteckt war. Um eine mit der Versuchsanleitung verträgliche und möglichst klare Auswertung anzufertigen, wurden im Folgenden die Vorzeichen gedreht und somit angepasst.

3 Physikalische Zusammenhänge

Um das Plancksche Wirkungsquantum h bestimmen zu können, muss zunächst die zu der jeweiligen Wellenlänge λ bzw. Frequenz ν zugehörige Grenzspannung $U_{G,\max}$ bestimmt werden. Dies gelingt in der Auswertung mit dem folgenden Zusammenhang.

$$I_{\text{Ph}} \propto (h \cdot \nu - \phi - e \cdot U_{G,\max})^2 \quad (1)$$

Um aus den gemessenen Grenzspannungen $U_{G,\max}$ und Wellenlängen λ das plancksche Wirkungsquantum zu bestimmen, verwenden wir

$$E_{\text{Kin},\max} = h \cdot \nu - \phi = e \cdot U_{G,\max} \quad (2)$$

In Gleichung (2) ist zu beachten, dass die maximale Gegenspannung $U_{G,\max}$ nicht von der Intensität sondern nur von der Frequenz ν abhängig ist. Diesen Zusammenhang werden wir im Versuchsteil 2 untersuchen.

4 Auswertung und Fehleranalyse

4.1 Auswertung zu Teil 1 : Spektrum der Leuchtdioden

Um das Plancksche Wirkungsquantum zu bestimmen wird die Frequenz ν benötigt, welche über $\nu = c/\lambda$ mit der Wellenlänge zusammenhängt. Mithilfe des Programms OceanView wurden die Wellenlängen und das FWHM (Full-Width-Half-Maximum) bestimmt.

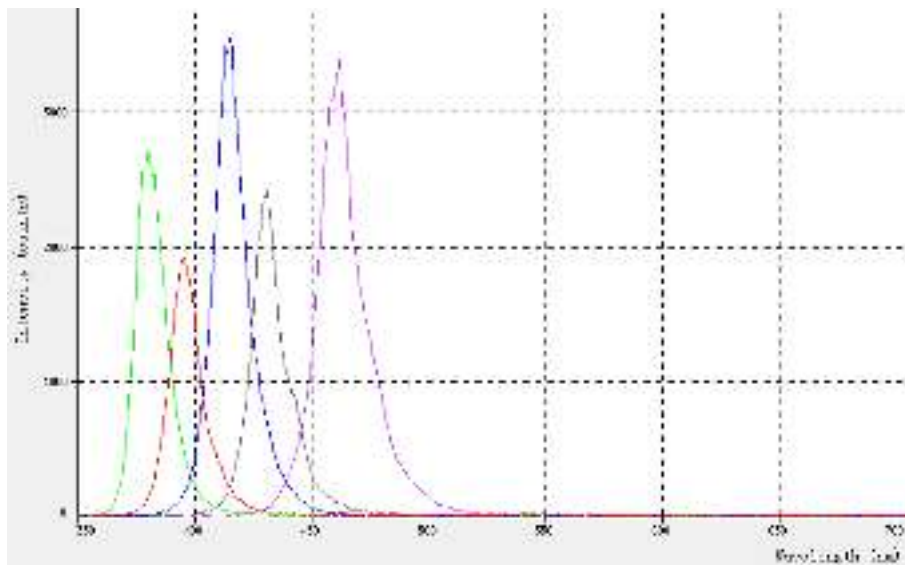


Abbildung 3: Bestimmung der durch die Leuchtdioden emittierten Wellenlängen

Wir erhielten die in Abb. 3 dargestellten Spektren für die einzelnen Dioden. Durch Ablesen erhielten wir die in Tabelle 1 aufgelisteten Werte.

Gegeben [nm]	Gemessen [nm]	Fehler [nm]
380	381	± 9
410	415	± 8
430	431	± 6
455	462	± 8
390	395	± 7

Tabelle 1: Messdaten: Spektrum

4.2 Auswertung zu Teil 2: Strom - Spannungs - Kennlinie bei konstanter Frequenz

Im zweiten Teil des Versuchs wurde bei konstanter Frequenz die Intensität verändert und dann die Kennlinie gemessen, wir erhielten bei unserer Messung die Daten aus Abb. 4, wobei Abstand 1 < Abstand 2 < Abstand 3.

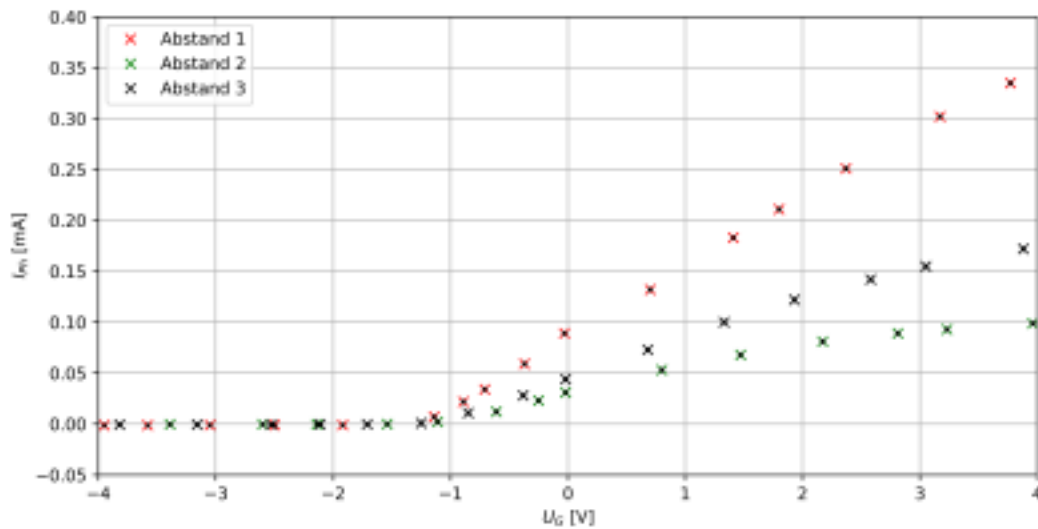


Abbildung 4: Messung der Kennlinie bei konstanter Frequenz

Als Fehler wurden die Werte aus Tabelle 2 angenommen. Die unterschiedlichen Fehler auf den Strom resultieren aus der veränderten Messkala des Amperemeters im Bereich $I_{Ph} < 0$ mA, da der Fehler als Schwankung der Nachfolgestelle der letzten, angezeigten Stelle angenommen wurde.

Strom [mA] bei $I_{Ph} > 0$ mA	Strom [mA] bei $I_{Ph} < 0$ mA	Spannung [V]
± 0.0005	± 0.00005	± 0.005

Tabelle 2: Fehler auf Strom & Spannung der Kennlinie

Außerdem wurde bei ausgeschaltener Diode der Photostrom $I_{Ph} = 0$ A gemessen, um mögliche Abweichungen durch das Umgebungslicht auszuschließen.

4.3 Auswertung zu Teil 3: Messdaten zum Photostrom bei unterschiedlichen Gegenspannungen

Aus den im Versuch aufgenommenen Daten wurde die Wurzel des Photostroms bestimmt. Der jeweilige Fehler ergibt sich mit Gaußscher Fehlerfortpflanzung

$$s_{\sqrt{I}} = \frac{s_I}{2\sqrt{I}}$$

zu den in Abschnitt 6 dargestellten Werten. Trägt man dann die Wurzel des Photostroms gegen die zugehörige Gegenspannung auf, zu erhält man einen linearen Zusammenhang. Mit

$$a = \frac{\sum x_i^2 \sum y_i - \sum x_i \sum x_i y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

$$b = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

für $y = a + bx$

und

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n [y_i - (a + bx_i)]^2}$$

$$s_a = s \cdot \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}}$$

$$s_b = s \cdot \sqrt{\frac{n}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}}$$

erhält man dann einen besten linearen Fit. Dieser und die zwei Ausgleichsgeraden sind in Abb. 5 dargestellt. Es ergibt sich:

$$\text{Steigung} = b = (7,70 \pm 0,27) \mu\text{A/V}$$

$$\text{Achsenabschnitt} = a = (9,01 \pm 0,24) \mu\text{A}$$

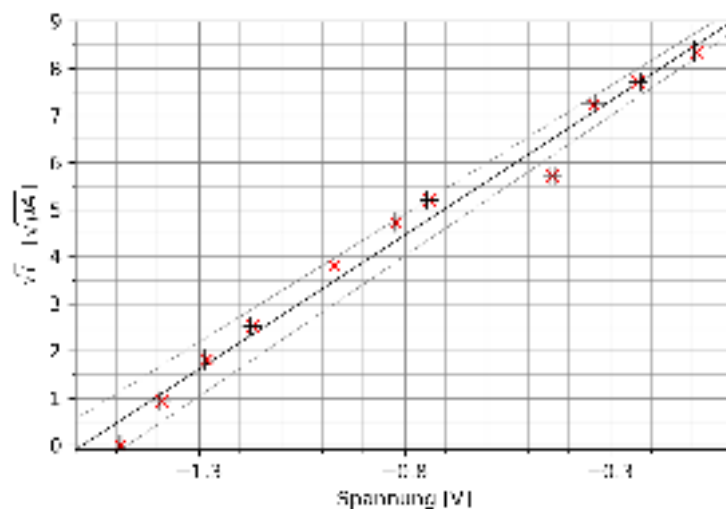


Abbildung 5: Lineare Regression zur Bestimmung der maximalen Gegenspannung

Um die maximale Gegenspannung zu bestimmen nutzt man nun den Schnittpunkt der linearen Ausgleichsgerade mit der x-Achse. Der Fehler auf diese maximale Spannung wurde mit Fehlerfortpflanzung nach folgender Formel berechnet:

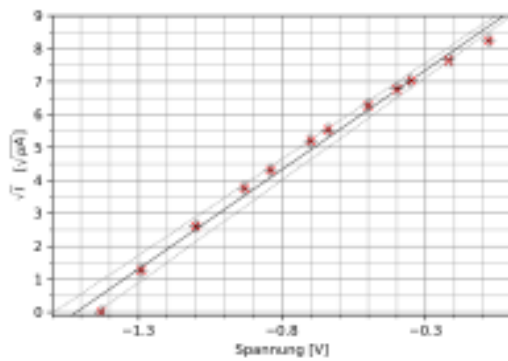
$$s_{U_{max}} = -U_G \sqrt{\left(\frac{s_a}{a}\right)^2 + \left(\frac{s_b}{b}\right)^2}$$

Für die ausführlich dargestellte Rechnung, bei der die LED mit 380 nm genutzt wurde, ergibt sich:

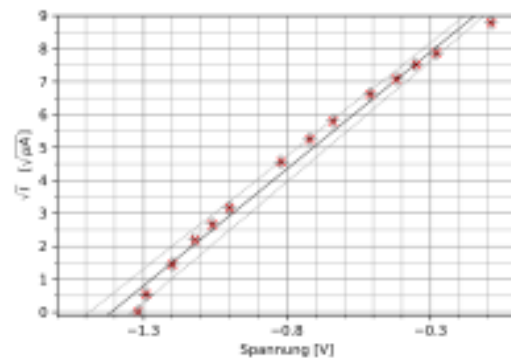
$$U_{max} = -\frac{\text{Achsenabschnitt}}{\text{Steigung}} = -1,58 \text{ V}$$

$$s_{U_{max}} = \pm 0,013 \text{ V}$$

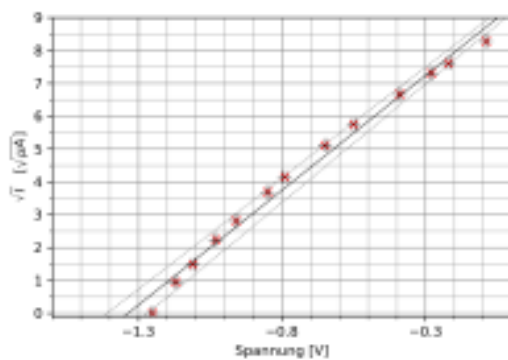
Die weiteren LED's wurden analog ausgewertet und die Maximalspannungen ergeben sich jeweils über die Schnittpunkte der Ausgleichsgerade aus der linearen Regression und die Fehler über Fehlerfortpflanzung. Die Graphen sind in Abb. 6 dargestellt und die Maximalspannungen, welche in der weiteren Auswertung genutzt werden in Tabelle 3 aufgeführt.



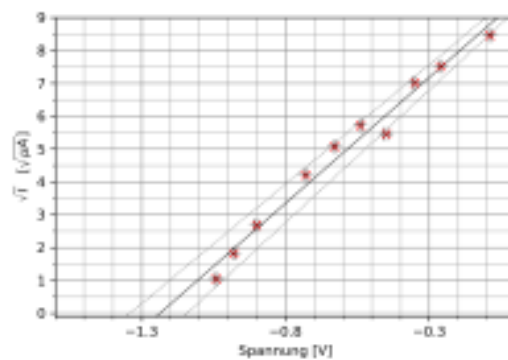
(a) 390 nm



(b) 410 nm



(c) 430 nm



(d) 455 nm

Abbildung 6: Analog ausgewertete Datensätze zu vier weiteren Wellenlängen

Wellenlänge [nm]	Maximale Gegenspannung [V]	Fehler auf Spannung [V]
380	-1.58	0.013
390	-1.52	0.009
410	-1.41	0.007
430	-1.34	0.007
455	-1.24	0.009

Tabelle 3: Maximale Gegenspannung bei unterschiedlichen Wellenlängen

4.4 Auswertung Teil 4: Bestimmung des plankschen Wirkungsquantums

Um das planksche Wirkungsquantum zu bestimmen wurde Gleichung (2) genutzt. Mit

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

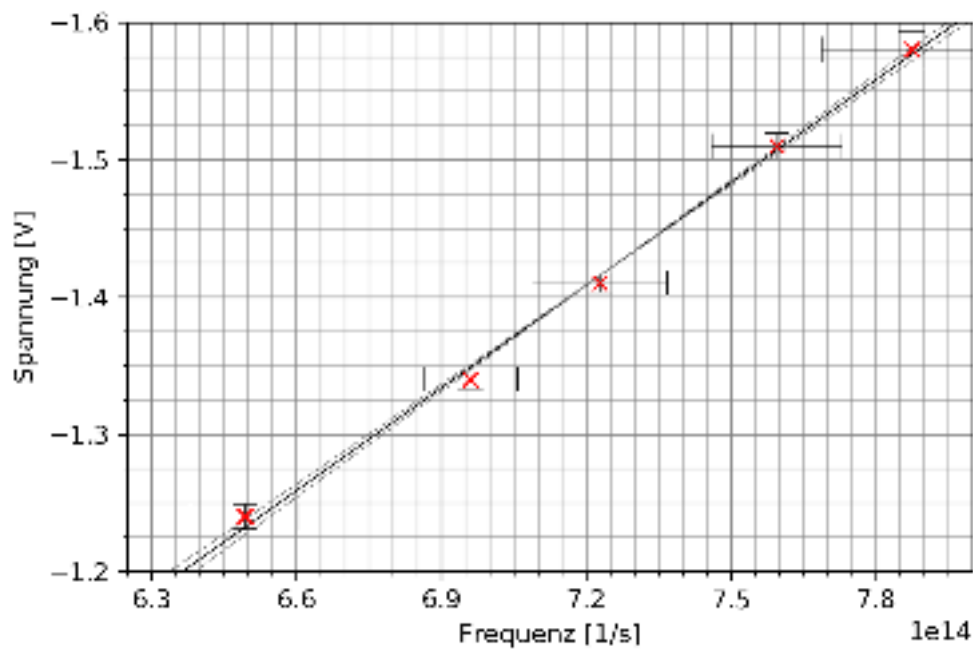
wurden die in Tabelle 4 dargestellten Frequenzen bestimmt. Der Fehler berechnet sich mit

$$s_f = \frac{c}{\lambda^2} s_\lambda \quad .$$

Wellenlänge [nm] (angegeben)	Wellenlänge [nm] (gemessen)	Frequenz [s^{-1}]
380	381 ± 9	$(78.7 \pm 1.8) 10^{14}$
390	395 ± 7	$(75.9 \pm 1.3) 10^{14}$
410	415 ± 8	$(72.3 \pm 1.4) 10^{14}$
430	431 ± 6	$(69.6 \pm 0.9) 10^{14}$
455	462 ± 8	$(64.94 \pm 1.12) 10^{14}$

Tabelle 4: Frequenzen zu den gemessenen Wellenlängen

Dabei wurde die von uns gemessene Wellenlänge verwendet, damit die Frequenz gegen die maximale Gegenspannung aufgetragen werden kann. Führt man dann eine lineare Regression durch, so kann man aus der Steigung das Planksche Wirkungsquantum und aus dem Achsenabschnitt die Austrittsarbeit berechnen. Die lineare Regression aus Abb. 7 ergibt $(-2,49 \pm 0,07) \cdot 10^{-15} \text{ Vs}$ als Steigung und einen Achsenabschnitt von $(0,38 \pm 0,05) \text{ V}$.

Abbildung 7: Lineare Regression zur Bestimmung von h

Das Plancksche Wirkungsquantum ergibt sich dann mit

$$h = b \cdot -e = 2,49 \cdot 10^{-15} \text{ Vs} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} = (3,99 \pm 0,11) \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

und die Austrittsarbeit ist in unserem Fall

$$W_A = \phi = a \cdot e = (6,1 \pm 0,8) \cdot 10^{-20} \text{ J} = (0,38 \pm 0,05) \text{ eV} \quad .$$

Hierbei wurden die Fehler jeweil über Gaußsche Fehlerfortpflanzung mit den Fehlern aus der linearen Regression bestimmt und die Elementarladung als exakt angenommen.

5 Diskussion der Ergebnisse

5.1 Teil 2: Strom - Spannungs - Kennlinie bei konstanter Frequenz

Wie aus der theoretischen Vorhersage von Gleichung (2) hervorgeht, kann man in Abb. 4 sehr schön sehen, dass die Grenzspannung $U_{G,max}$ von der Intensität unabhängig ist. Der Verlauf von U_G , bei $I_{Ph} < 0$ A, ist der theoretischen Vorhersage für die verwendete Stromfehler entsprechend linear fallend, was in der Abbildung auf Grunde der sehr geringen Steigung nicht zu sehen ist. Auch dass der Photostrom mit geringer werdender Intensität geringer wird ist der Abb. 4 zu entnehmen. Trotzdem verifiziert dieser Teil des Versuches die Annahme, dass die restlichen durchgeführten Messungen unabhängig von der Intensität sind und diese dahern nicht genauer betrachtet werden muss.

5.2 Teil 3: Photostrom bei unterschiedlichen Gegenspannungen

Die Messung der maximalen Gegenspannung entsprach nicht dem erwarteten theoretischen Verlauf, was daran liegen könnte, dass die statistische Schwankung der Messung größer war als der durch den bei $T > 0$ auftretende Effekt der unscharfen Fermi - Kante.

Eine weitere Möglichkeit ist, dass der Stromfehler die Messung derart beeinflusst, als dass die Kennlinie bei $U \rightarrow U_{max}$ nicht gemessen werden konnte. Da aber die Ergebnisse aus Teil 2 nicht weiter ausgewertet werden sollten und unsere Messung zum Photostrom bei ausgeschalteter LED Null ergeben hat, konnten wir diesen möglichen Fehler nicht weiter einbinden.

Eine mögliche Lösung für das Problem wäre eventuell das Messen des Photostroms bei ausgeschalteter LED für alle später genutzten Gegenspannungen. Somit könnte man den so gemessenen Photostrom von den späteren abziehen und den Fehler verringern. Während des Versuchs war uns diese Möglichkeit nicht bewusst, es wäre aber auch sehr schwierig umzusetzen, da die Einstellung der Gegenspannung nicht sehr fein reagiert, aber exakt gleiche Spannungswerte für eine spätere Subtraktion notwendig sind.

Da alle aufgenommenen Werte also einem linearen Trend folgen, wurde die maximale Gegenspannung also durch eine lineare Regression durch alle Werte bestimmt, was in diesem Falle das am wenigsten verfälschte Ergebnis liefern sollte.

5.3 Teil 4: Bestimmung des plankschen Wirkungsquantums

Von uns wurde für das Planksche Wirkungsquantum der Wert

$$h = (3,99 \pm 0,11) \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

berechnet. Der Literaturwert liegt bei $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ [Quelle 1], damit liegt der Literaturwert in 24 Standardabweichungen unseres Wertes.

Um die starke Abweichung des gemessenen Wertes erklären zu können, verglichen wir den von uns bestimmten Wert mit denen aus verschiedenen Altprotokollen und von anderen Versuchsteilnehmer. Wir halten diese Werte für vergleichbar, da sie unter sehr ähnlichen Bedingungen gemessen wurden. Wie stellten fest, dass alle gemessenen Werte unter dem tatsächlichen Wert liegen und vermuten daher einen systematischen Fehler der mit dem Messaufbau verbunden ist. Da sich jedoch die Qualität der einzelnen Messelemente unserer Kenntnis entzieht, ist es für uns

schwer abzuschätzen an welcher Stelle der systematische Fehler zu Stande kam.

Für die Austrittsarbeit erhielten wir den Wert

$$\boxed{\phi = (0,38 \pm 0,05) \text{ eV}} \quad .$$

Auch dieser Wert liegt ausserhalb des Wertebereichs für verschiedene Metalle und ist daher vermutlich auch einem zusätzlichen systematischen Fehler unterlegen. Möglicherweise ist die Photozelle nicht ausreichend vakuumiert was zusätzliches Entschleunigen der Elektronen zur Folge hätte und somit die maximale Gegenspannung systematisch shiften würde.

Abbildungsverzeichnis

1	Versuchsaufbau zum Messen des Photostroms	1
2	Zum Messen des Photostroms genutzte Schaltung	2
3	Bestimmung der durch die Leuchtdioden emittierten Wellenlängen	3
4	Messung der Kennlinie bei konstanter Frequenz	4
5	Lineare Regression zur Bestimmung der maximalen Gegenspannung	5
6	Analog ausgewertete Datensätze zu vier weiteren Wellenlängen	6
7	Lineare Regression zur Bestimmung von h	8

Tabellenverzeichnis

1	Messdaten: Spektrum	4
2	Fehler auf Strom & Spannung der Kennlinie	4
3	Maximale Gegenspannung bei unterschiedlichen Wellenlängen	7
4	Frequenzen zu den gemessenen Wellenlängen	7
5	Messwerte zur Auswertung Teil 3	14

Literatur

- [Quelle 1] *P.Tipler, G. Mosca: Physik für Wissenschaftler und Ingenieure. 7. Auflage. 2008. Berlin,Heidelberg*
- [Quelle 2] *"Versuchsanleitungen zum Physikkabor für Anfänger*innen, Teil 2"* Stand 02/2019.

6 Anhang

Werte der linearen Regression aus Teil 3

380nm

Lineare Regression ohne Gewichtung(x,y):

Achsenabschnitt: 9.010730428379587

Steigung: 5.696011552437244

Streuung: 0.396512674557

Fehler auf den Achsenabschnitts: 0.240619444986

Fehler auf die Steigung: 0.256360865734

$U_{Gmax} = -1.5819368246407473$

$U_U = 0.013$

390nm

Lineare Regression ohne Gewichtung(x,y):

Achsenabschnitt: 9.15855886242766

Steigung: 6.0453082846446895

Streuung: 0.275445824491

Fehler auf den Achsenabschnitts: 0.159438350429

Fehler auf die Steigung: 0.195559965988

$U_{Gmax} = -1.514986239112196$

$U_U = 0.009$

455nm

Lineare Regression ohne Gewichtung(x,y):

Achsenabschnitt: 9.478640667165413

Steigung: 7.671198806677954

Streuung: 0.379594727301

Fehler auf den Achsenabschnitts: 0.266164378538

Fehler auf die Steigung: 0.397921210355

$U_{Gmax} = -1.2356140032394989$

$U_U = 0.009$

430nm

Lineare Regression ohne Gewichtung(x,y):

Achsenabschnitt: 9.331975147368071

Steigung: 6.989801365361644

Streuung: 0.308126130145

Fehler auf den Achsenabschnitts: 0.186059606105

Fehler auf die Steigung: 0.230036540316

$U_{Gmax} = -1.3350844551339045$

$U_U = 0.007$

410nm

Lineare Regression ohne Gewichtung(x,y):

Achsenabschnitt: 10.030219114668066

Steigung: 7.108866573340292

Streuung: 0.341736628817

Fehler auf den Achsenabschnitts: 0.20354714586

Fehler auf die Steigung: 0.235367989836

$U_{Gmax} = -1.410944911005004$

$U_U = 0.007$

$\sqrt{I}$ 380nm	$s_{\sqrt{I}}$	$\sqrt{I}$ 390nm	$s_{\sqrt{I}}$	$\sqrt{I}$ 410nm	$s_{\sqrt{I}}$	$\sqrt{I}$ 430nm	$s_{\sqrt{I}}$	$\sqrt{I}$ 455nm	$s_{\sqrt{I}}$	
8.3606	0.0008	8.2462	0.0009	8.7920	0.0008	8.2765	0.0009	8.4558	0.0009	
7.7136	0.0009	7.642	0.0009	7.8677	0.0009	7.6158	0.0009	7.5166	0.0009	
7.2388	0.0009	7.0285	0.0009	7.5166	0.0009	7.3007	0.0009	7.0143	0.0009	
5.727	0.001	6.7749	0.0009	7.0851	0.0009	6.671	0.0010	5.4589	0.0010	
5.206	0.001	6.269	0.0010	6.618	0.0010	5.7446	0.001	5.718	0.001	
4.7329	0.0011	5.532	0.0010	5.797	0.0010	5.1089	0.0011	5.0695	0.0011	
3.8079	0.0013	5.2058	0.0011	5.2536	0.0011	4.1473	0.0012	4.2071	0.0012	
2.530	0.0020	4.3128	0.0012	4.5607	0.0012	3.6878	0.0013	2.6833	0.0015	
1.8166	0.0018	3.7550	0.0013	3.1623	0.0014	2.8107	0.0015	1.817	0.0020	
0.949	0.003	2.6077	0.0015	2.665	0.0020	2.236	0.0020	1.049	0.0020	
0.0	0.0	1.2649	0.0022	2.19089	0.0020	1.4832	0.0021	-	-	
-	-	0.0	0.0	1.4491	0.0021	0.949	0.003	-	-	
-	-	-	-	0.548	0.003	0.0	0.0	-	-	
-	-	-	-	0.0	0.0	-	-	-	-	

Tabelle 5: Messwerte zur Auswertung Teil 3

Versuchs 81 - Photoelektrischer Effekt

04.03.19

Teil 1	gegeben	gelesen	Fehler (FWHM)
	380 nm	381 nm	± 9 nm
	410 nm	415 nm	± 8 nm
	430 nm	431 nm	± 6 nm
	455 nm	462 nm	± 8 nm
	390 nm 740 nm	395 nm	± 7 nm

Teil 3

Größenordnung $\sim 67 \mu A$

380 nm

$U_{\text{a}} = V$

($\pm 0,005$)

$I_{\text{ph}} = \mu A$

($\pm 0,05$)

0,09	69,9
0,23	54,5
0,34	52,4
0,44	45,5
0,64	32,8
0,74	27,1
0,82	22,4
0,97	14,5
1,17	6,4
1,28	3,3
1,39	0,9
1,49	0

390 nm

0,08	61,0
0,21	58,4
0,35	48,4
0,40	45,9
0,50	40 39,3
0,64	30,6
0,70	27,1
0,84	18,6
0,93	14,1
1,10	6,9
1,29	1,6
1,43	0

455 nm

0,09	71,5
0,26	56,5
0,35	49,2
0,45	34,8
0,54	32,7
0,63	25,7
0,73	17,7
0,90	7,2
0,98	3,3
1,04	1,1
1,10	-0,3

430 nm

0,09	68,5
0,22	58,0
0,28	53,3
0,39	44,5
0,55	33,0
0,65	26,1
0,79	17,2
0,85	13,6
0,96	7,9
1,03	5 5,0
1,11	2,2
1,17	0,9
1,25	0

	u_{in} V	I_{ph} in μA
410nm	0,09	77,3
	0,28	61,9
	0,35	56,5
	0,42	50,2
	0,51	43,8
	0,64	33,6
	0,72	27,6
	0,82	20,5
	1,00	10,0
	1,06	7,1
	1,12	4,8
	1,20	2,1
	1,28	0,3
	1,32	0

VT Diego Román
6.03.2019