
Versuch 35

9. September 2021

Fotoeffekt

Physikalisches Anfängerpraktikum I

Juan Provencio

Betreuer: Yannik Dreher

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel des Versuches	2
2	Grundlagen	2
2.1	Elektrische Eigenschaften von Metallen	2
2.2	Fotozelle	3
2.3	Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantum	4
3	Versuchsaufbau	5
3.1	Materialien und Geräte	5
3.2	Aufbau	5
4	Messung und Auswertung	6
4.1	Messprotokoll	6
4.2	Auswertung	8
5	Zusammenfassung und Diskussion	11
5.1	Zusammenfassung	11
5.2	Diskussion	12
6	Quellen	12

1 Ziel des Versuches

Der Fotoeffekt stellt einer der wichtigsten Entdeckungen des 20. Jahrhunderts in der Physik. Interferenzexperimente und damalige Theorie hatten zu dem Zeitpunkt den Wellencharakter von Licht festgelegt, eine quantumphysikalische Interpretation des fotoelektrischen Effekts zeigte aber, dass Licht ebenfalls in kleinen, diskreten Paketen kommt. Somit ist die Darstellung von Licht als eine Welle und auch als ein Teilchen entstanden. Ziel dieses Versuchs ist das Experiment zu rekonstruieren und daraus die Planck-Konstante zu bestimmen.

2 Grundlagen

2.1 Elektrische Eigenschaften von Metallen

Metalle bestehen aus einer gitterförmigen Struktur, was durch die positiv geladenen Atomrümpfen entsteht und aus frei beweglichen Elektronen, sogenannte *Valenzelektronen*. Mithilfe dieser Elektronen werden Ladungen innerhalb des Metalls transportiert. Diese können sich nahezu frei bewegen, aber dürfen das Metall nicht einfach verlassen. Die Energie dieser Elektronen wird durch die Fermiverteilung dargestellt. Diese gibt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Elektron eine bestimmte Energie hat in Abhängigkeit von der Temperatur. Bei einer idealen Temperatur von 0 K sind alle Zustände von 0 bis zur Maximalenergie, die Fermienergie E_F besetzt. Allerdings ist bei höheren

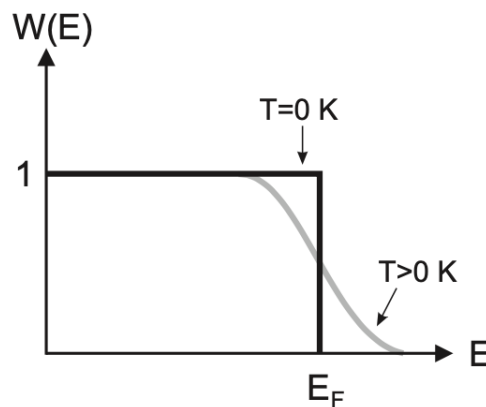


Abbildung 1: Energieverteilung der Elektronen eines Metalls

Temperaturen diese Kante nicht mehr so scharf definiert, und es gibt dann

Zustände höherer Energie besetzt, und Zustände niedriger Energie die nicht besetzt sind.

An einem Potentialtopf (Abb. 2) erkennt man das Verhältnis zwischen der Energie, die ein Photon aufbringen soll, um ein Elektron aus dem Metall herauszulösen. Wenn ein Photon auf ein Elektron trifft und dabei seine Energie

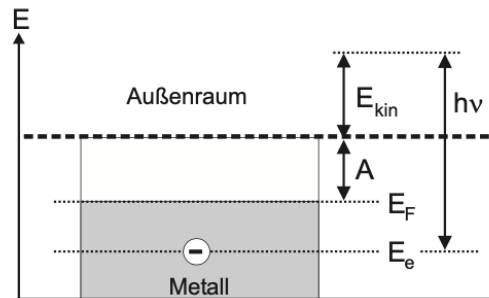


Abbildung 2: Potentialtopf

an ihn überträgt, dann wird diese Energie einerseits gebraucht um aus dem Metall zu kommen, und der Rest bleibt als kinetische Energie übrig. Um aus dem Metall herausgelöst zu werden muss die Austrittsarbeit A ab der Fermi-Energie geleistet werden. Das heißt, insgesamt muss das Elektron zuerst auf die Fermi-Energie kommen, und von dort muss noch eine zusätzliche Arbeit aufgebracht werden.

$$h\nu = E_{\text{kin}} + A + (E_f - E_e) \quad (1)$$

Hier ist h das Plancksche Wirkungsquantum und ν die Frequenz des Photons. Unter Annahme, dass sich ein Elektron bereits bei der Fermienergie befindet, so tritt es aus dem Metall mit der maximalen kinetischen Energie raus:

$$E_{\text{kin,max}} = h\nu - A \quad (2)$$

2.2 Fotozelle

Eine Fotozelle wird aus zwei Elektroden gebaut. Die Kathode ist das Metall, woraus Elektronen herausgeworfen sein sollen. Verschiedene Metalle besitzen unterschiedliche Austrittsarbeiten, dies ändert aber wie wir in Gleichung (2) sehen können nur den Schnittpunkt mit der Ordinate. Für die Anode benutzt man in der Regel ein Drahting außerhalb der Trajektorie des Lichtes und fängt die herausgelösten Elektronen auf und dadurch fließt ein Strom. Zwischen beiden Elektroden wird eine Spannung U angelegt. In Abhängigkeit

dieser Spannung bedürft es den Elektronen mehr Energie die Anode zu erreichen. Als der Fotostrom bei der Sperrspannung U_s verschwindet, so haben selbst die höchstenergetischen Elektronen nicht mehr genug Energie um auf die Anode zu gelangen. Wenn wir die Spannung gegen den Fotostrom plottieren so erhalten wir einen Abschnitt, in welchem sich der Graph einer Gerade annähert. An den Rändern in der Nähe der Sperrspannung kommt es nach den Messdaten zu einem asymptotischen Verlauf gegen die 0. Das liegt daran, dass bei höheren Temperaturen als 0 K einige Elektronen eine höhere Energie als die Fermienergie besitzen.

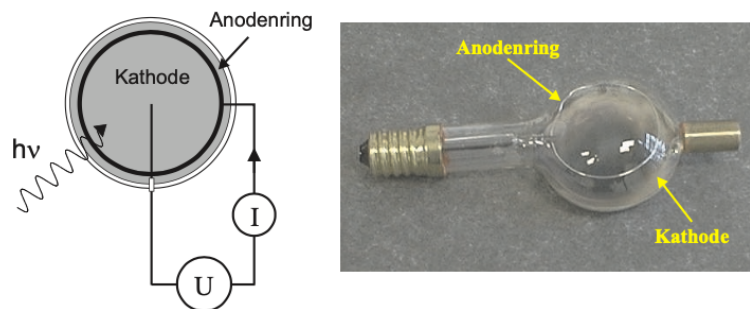


Abbildung 3: Fotozelle

2.3 Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantum

Aufgrund der Anordnung und der Geometrie der Elektroden ist der Strom proportional zum Quadrat der Spannung. Für die Bestimmung der Planck-Konstante tragen wir auf verschiedene Diagramme den Strom \sqrt{I} gegen die Vorspannung U auf und zeichnen die Kennlinie, als ob der Versuch bei 0 K durchgeführt gewesen wäre. Das entspricht, dass wir uns nur den linearen Anteil der Messdaten angucken und dadurch eine Gerade zeichnen. Bei der Messung wurde allerdings nicht der Strom, sondern der "Fotostrom" U_I gemessen. Aufgrund des Ohmschen Gesetzes sind diese beiden Größen in der Anordnung zueinander proportional und wir können die eine indirekt mit der anderen messen.

Als man an die Sperrspannung gelangt, am Schnittpunkt mit der x -Achse, dann ist $E_{\text{pot}} = E_{\text{kin}}$, und wir wissen zusätzlich, dass wir die Potentialenergie mittels der Spannung darstellen können. Dann gilt:

$$E_{\text{pot}} = e \cdot U_s = h\nu - A = E_{\text{kin}} \quad (3)$$

Die Steigung dieser Gerade, multipliziert mit der Elementarladung e entspricht der Planck-Konstante

$$h = \frac{\Delta U_s}{\Delta \nu} \cdot e \quad (4)$$

3 Versuchsaufbau

3.1 Materialien und Geräte

- Spektrometernaufbau mit zwei Prismen und eingebauter Vakuumfotозelle
- Hg-Spektrallampe mit Netzteil
- Multimeter

3.2 Aufbau

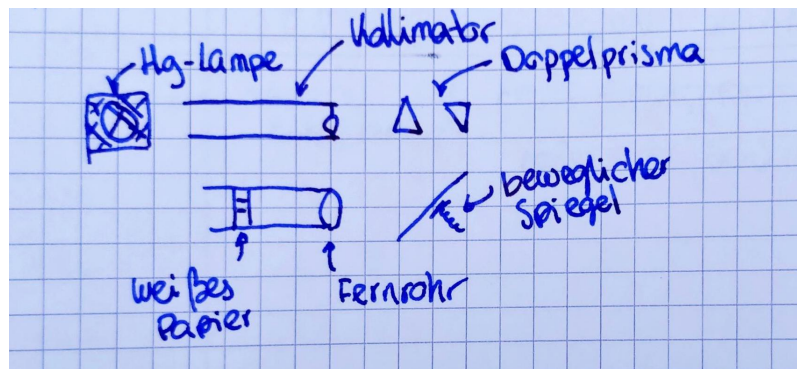


Abbildung 4: Aufbau zum Versuch

4 Messung und Auswertung

4.1 Messprotokoll

Messprotokoll V35 Fotoeffekt
09.09.2021
Mike Brandt
Juan Provencio

Teilaufgabe 2:

Mit Vorspannung $V_0 = (0,00 \pm 0,01) \text{ V}$ messen wir ~~den~~ ~~angezeigten~~ die angezeigte Spannung auf dem Multi-
meter.

Tabelle 1: Spannung bei ultraviolettem Licht

Vorspannung $V_0 [\text{V}]$	Fotostrom $I_f [\text{V}]$
$0 \pm 0,01$	$6,95 \pm 0,02$
$-0,10 \pm 0,01$	$6,36 \pm 0,02$
$-0,20 \pm 0,01$	$5,85 \pm 0,02$
$-0,30 \pm 0,01$	$5,29 \pm 0,02$
$-0,40 \pm 0,01$	$4,76 \pm 0,02$
$-0,50 \pm 0,01$	$4,28 \pm 0,02$
$-0,60 \pm 0,01$	$3,76 \pm 0,02$
$-0,70 \pm 0,01$	$3,25 \pm 0,02$
$-0,80 \pm 0,01$	$2,77 \pm 0,01$
$-0,90 \pm 0,01$	$2,30 \pm 0,01$
$-1,00 \pm 0,01$	$1,87 \pm 0,01$
$-1,10 \pm 0,01$	$1,43 \pm 0,01$
$-1,20 \pm 0,01$	$1,05 \pm 0,01$
$-1,30 \pm 0,01$	$0,75 \pm 0,01$
$-1,40 \pm 0,01$	$0,46 \pm 0,01$
$-1,50 \pm 0,01$	$0,23 \pm 0,01$
$-1,60 \pm 0,01$	$0,15 \pm 0,01$
$-1,70 \pm 0,01$	$0,061 \pm 0,001$
$-1,80 \pm 0,01$	$0,014 \pm 0,001$
$-1,75 \pm 0,01$	$0,032 \pm 0,001$
$-4,00 \pm 0,01$	$-0,062 \pm 0,001$

Tabelle 2: Spannung bei ~~ultraviolettem~~ violettem Licht

Vorspannung $V_0 [\text{V}]$	$\sigma_{U_0} [\text{V}]$	Fotostrom $I_f [\text{V}]$	$\sigma_{U_f} [\text{V}]$
$0,30$		$6,58$	$0,02$
$0,20$		$6,58$	
$0,10$		$6,04$	
$0,00$		$5,47$	
$-0,10$		$4,90$	$0,01$
$-0,20$		$4,35$	
$-0,30$		$3,82$	
$-0,40$		$2,34$	
$-0,50$		$2,79$	
$-0,60$	$0,01$	$2,60$	
$-0,70$		$1,837$	$1,84$
$-0,80$		$1,39$	
$-0,90$		$1,02$	
$-1,00$		$0,683$	$0,081$
$-1,10$		$0,420$	
$-1,20$		$0,236$	

Abbildung 5: Messprotokoll

Fortsetzung Tabelle 1:

U_0 [V]	σ_{U_0} [V]	U_I [V]	σ_{U_I} [V]
-1,50	0,01	0,113	0,001
-1,40		0,036	
-4,00		-0,061	

Tabelle 3: Spannung bei blauem Licht

U_0 [V]	σ_{U_0} [V]	U_I [V]	σ_{U_I} [V]
0,80		8,17	0,02
0,20		7,47	
0,10		6,76	
0,00		6,06	
-0,10		5,27	0,01
-0,20		4,63	
-0,30	0,01	3,95	
-0,40		3,27	
-0,50		2,64	
-0,60		2,07	
-0,70		1,53	0,001
-0,80		1,068	0,001
-0,90		0,673	
-1,00		0,383	
-1,10		0,175	
-1,20		0,055	
-1,30		0,015	
-4,00		-0,095	

Tabelle 4: Spannung bei grünem Licht

U_0 [V]	σ_{U_0} [V]	U_I [V]	σ_{U_I} [V]
0,30	5,30	5,30	0,01
0,20		4,51	
0,10		3,80	
0,00		3,05	
-0,10		2,32	
-0,20		1,66	
-0,30	0,01	1,07	
-0,40		0,658	
-0,50		0,302	0,001
-0,60		0,100	
-0,70		0,008	
* -0,65		0,042	
-4,00		-0,046	

Tabelle 6: Spannung bei gelbem Licht

U_0 [V]	σ_{U_0} [V]	U_I [V]	σ_{U_I} [V]
0,30		3,67	
0,20		3,03	0,01
0,10	0,01	2,39	
0,00		1,81	
-0,10		1,20	
-0,20		0,735	0,001

Abbildung 6: Fortsetzung Messprotokoll

Fortsetzung Tabelle 5:

U_0 [V]	σ_{U_0} [V]	U_I [V]	σ_{U_I} [V]
-0,80	0,01	0,384	0,001
-0,90		0,147	
-0,80		0,052	
-0,55		0,025	
-4,00		-0,034	

g.g.zi
y Deh

Abbildung 7: Fortsetzung Messprotokoll

4.2 Auswertung

In den Messungen wurde der Fehler des Multimeters gegenüber des Ablesefehlers und "Schwenkungsfehlers" vernachlässigt. Per die Bedienungsanleitung aus Benning (2010) beträgt dieser Fehler bei den gemessenen Größen 0,08%, was Größenordnungen kleiner ist als der abgeschätzte Fehler.

Nun wollen wir aus dem bereits erwähnten Verhältnis $I \propto U^2$ die relevanten Diagramme zeichnen. Dabei wissen wir, dass der Fotostrom $I \propto U_I - U_{I_0}$ ist. U_{I_0} ist der Untergrundstrom, gemessen bei -4 V. Dafür müssen wir also zuerst in die obigen Tabelle zwei zusätzliche Einträge machen. Wir wollen zu jedem Wert wissen, was $\sqrt{U_I - U_{I_0}}$ und was sein Fehler sind. Dafür geben wir die Messdaten in Excel ein und übertragen daraus die einzelnen Rechnungen auf diese Ausarbeitung. Für Übersichtlichkeit definieren wir $U_A = U_I - U_{I_0}$. Die bereits erwähnten Tabellen befinden sich im 6. Für die Berechnung des Fehlers wurde per dem Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetz

$$\sigma_{U_A} = \sqrt{(\sigma_{U_I})^2 + (\sigma_{U_{I_0}})^2} \quad (5)$$

und

$$\sigma_{\sqrt{U_A}} = \frac{\sigma_{U_A}}{2\sqrt{U_A}} \quad (6)$$

verwendet.

Aus den im Anhang abgebildeten Diagramme lesen wir bei den verschiedenen Wellenlängen die Sperrspannung und tragen sie in Tabelle 1 ein. Dadurch, dass die berechneten Fehlern zu klein für eine sinnvolle Skalierung einer Fehlergerade waren, haben wir stattdessen den linearen Bereich erweitert um mehr Messpunkte in die Zeichnung der Gerade mitzuberechnen.

Mathematisch kann man die Steigung der Fehlergerade auch bestimmen, und davon können wir den Schnittpunkt mit der Spannungsachse bestimmen um die Sperrspannung zu erhalten. Dafür schätzen wir den obersten Wert des linearen Bereiches hoch und den niedrigsten Wert runter und bilden daraus die Steigung a_{UV} . Dies machen wir am Beispiel von Ultraviolett vor:

$$a_{UV} = \frac{(1,955 + 0,006)\sqrt{V} - (0,722 - 0,010)\sqrt{V}}{(-0,60 + 0,01)V - (-1,40 - 0,01)V} \quad (7)$$

$$= 1,523 \text{ V}^{-1} \quad (8)$$

Mit dieser Steigung erhalten wir eine Gerade der Form:

$$\sqrt{U_A}(U_0) = a_{UV} \cdot U_0 + \sqrt{U_{A0}} \quad (9)$$

Wir interpolieren leicht den Schnittpunkt mit der $\sqrt{U_A}$ -Achse durch Eingabe der Werte $U_0 = -0,60$ und $\sqrt{U_A} = 1,955$ und Auflösen nach $\sqrt{U_{A0}}$. Dies ergibt

$$\sqrt{U_{A0}} = 2,87\sqrt{V} \quad (10)$$

Damit ist der Schnittpunkt mit der U_0 -Achse

$$U_s = \frac{\sqrt{U_{A0}}}{a_{UV}} = 1,88 \text{ V} \quad (11)$$

Das ergibt einen deutlich kleineren Fehler ($\sigma_{U_s} = 0,01 \text{ V}$) als mit der alternativen Methode. Um den Fehler hochzuschätzen, dadurch dass der "Lineare Bereich" auch kleiner oder größer als abgeschätzt sein könnte werden die folgenden Fehlergeraden durch eine Erweiterung dieses Bereiches statt durch den mathematischen Weg bestimmt.

Die Differenz des Schnittpunktes bei der Ausgleichsgerade und bei der Fehlergerade entspricht dem Fehler in der angegebenen Sperrspannung. Zusätzlich haben wir den Messwert für gelbes Licht aus der Ausgleichsgerade weggelassen, weil er signifikant von der Gerade der anderen vier Messungen abweicht. Dafür haben wir ihn in einer Fehlergerade mitgezählt. Aus der Versuchsanleitung sind uns die Wellenlängen des Lichtes bekannt.

Daraus erstellen wir ein neues Diagramm um die Spannung in Abhängigkeit der Frequenz zu setzen.

Aus der Steigung des Diagramms 6 ist uns mit Formel (4) bekannt, dass wir das Plancksche Wirkungsquantum h angeben können als

$$h = \frac{\Delta U_s}{\Delta \nu} \cdot e \quad (12)$$

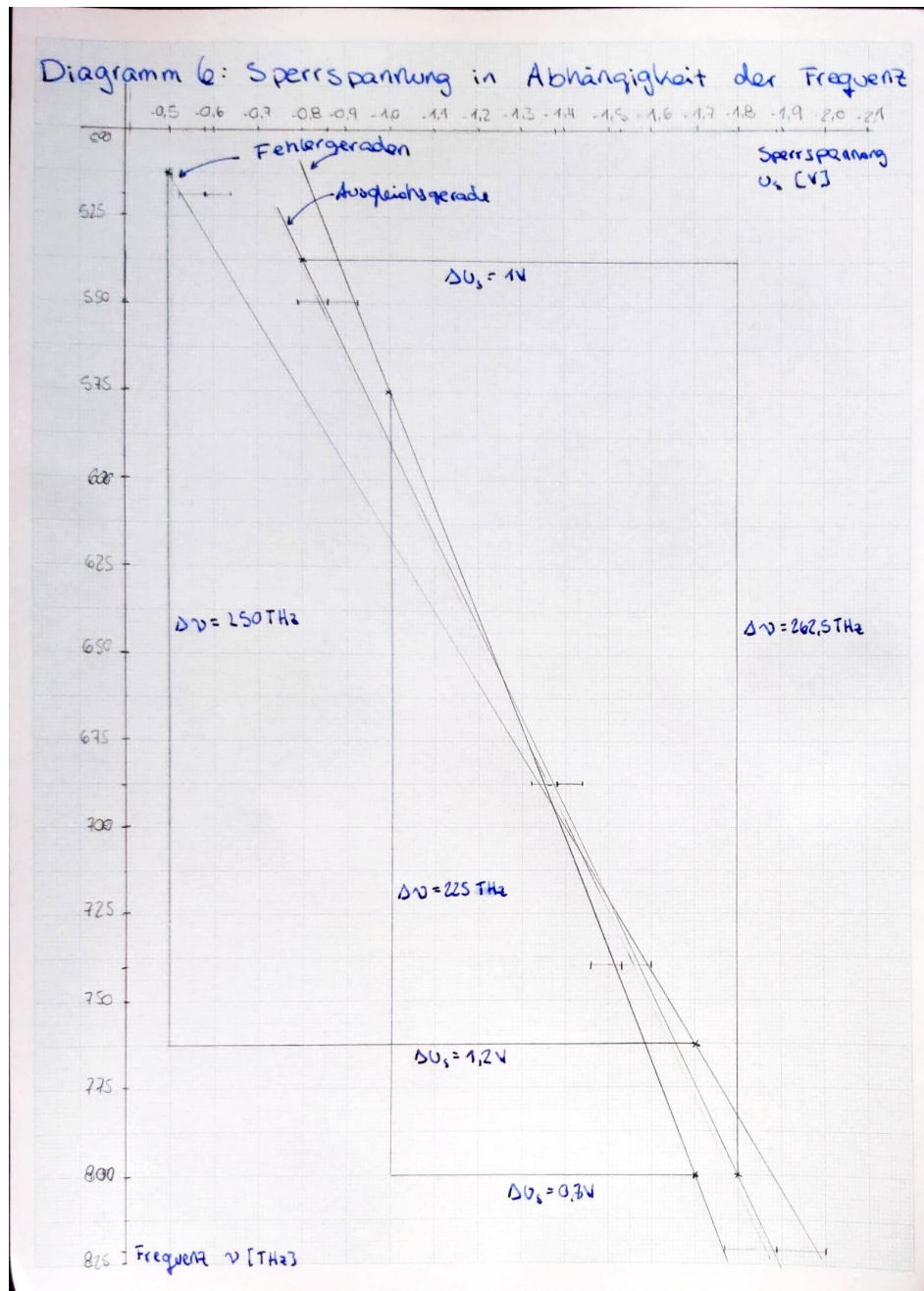


Diagramm 6: Sperrspannung in Abhängigkeit der Frequenz

Tabelle 1: Spannungen bei ultraviolettem Licht

Farbe	Wellenlänge λ [nm]	Frequenz ν [THz]	Sperrspannung U_s [V]
gelb	578	518,7	$-0,58 \pm 0,06$
grün	546,1	549,0	$-0,86 \pm 0,07$
blau	435,8	687,9	$-1,38 \pm 0,06$
violett	405	740,2	$-1,53 \pm 0,07$
UV	365,0	821,3	$-1,89 \pm 0,11$

$$= \frac{1 \text{ V}}{262,5 \text{ THz}} \cdot 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19} \text{ C} \quad (13)$$

$$= 6,10353 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \quad (14)$$

Dazu ziehen wir den Fehler in Betracht, welchen wir durch die abweichenden Geraden erhalten. Aus der Differenz zwischen der Steigung der Ausgleichsgerade und den Fehlergeraden erhalten wir unseren Fehler:

$$\sigma_{h_1} = \left| h - \frac{\Delta U_{sF_1}}{\Delta \nu_{F_1}} \cdot e \right| \quad (15)$$

$$= \left| \frac{1,2 \text{ V}}{250 \text{ THz}} \cdot 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19} \text{ C} \right| \quad (16)$$

$$= 1,6 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \quad (17)$$

$$\sigma_{h_2} = \left| h - \frac{\Delta U_{sF_2}}{\Delta \nu_{F_2}} \cdot e \right| \quad (18)$$

$$= \left| h - \frac{0,7 \text{ V}}{225 \text{ THz}} \cdot 1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19} \text{ C} \right| \quad (19)$$

$$= 1,12 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \quad (20)$$

Wir erhalten somit großzügigerweise einen Fehler von $\sigma_h = 1,6 \cdot 10^{-34}$ und eine Planckkonstante von

$$h = (6,1 \pm 1,6) \cdot 10^{-34} \text{ J s} \quad (21)$$

5 Zusammenfassung und Diskussion

5.1 Zusammenfassung

Wir haben mit einer Anordnung von Prismen das Licht von einer Quecksilberdampfampe in seinem jeweiligen Linienspektrum getrennt. Aus diesem

Linienpektrum sind uns die Wellenlängen bzw. die Frequenzen bekannt. An den sichtbaren Streifen haben wir dann mehrere Messungen in Abschnitten von 0,1 V gemessen, bis der Fotostrom klein genug war. Diese Werte haben wir dann auf Diagramme übertragen, aus welchen wir den Schnittpunkt mit der x -Achse, entsprechend der Sperrspannung extrapolieren konnten. Diese Werte sind frequenzabhängig und wenn wir im nächsten Abschnitt gegen diese übertragen haben, ergab sich ein lineares Verhältnis. Aus diesem linearen Verhältnis ließ sich anschließend das Plancksche Wirkungsquantum h bestimmen.

5.2 Diskussion

Nun wollen wir das Ergebnis genauer untersuchen. Dazu erwähnen wir zuerst wichtige Fehlerquellen in der Durchführung des Versuchs. Die Bestimmung der Sperrspannung bei gelbem Licht scheint sich den anderen Messdaten nicht richtig angepasst zu haben. Es war unsere Entscheidung diesen Messpunkt aus der Ausgleichsgerade zu nehmen. Allerdings, wie es sich beobachten lässt, hätte die Inklusion dieses Messpunktes zu einem nur leicht größeren Wert für die Planck-Konstante geführt. Im Nachhinein wäre damit unser Ergebnis näher an den Literaturwert (D.B. Newell, et. al., 2018) $h_{\text{Lit}} = (6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34} \pm 0,000\,000\,01) \text{ Js}$. Verglichen mit dem Literaturwert, unser Ergebnis weist eine Abweichung von

$$\frac{|h - h_{\text{Lit}}|}{\sqrt{(\sigma_h)^2 + (\sigma_{h_{\text{Lit}}})^2}} = 0,33 \quad (22)$$

Das ist eine sehr akzeptable Abweichung. Allerdings hätte man durch andere Methoden außer der graphischen Bestimmung der Steigung wahrscheinlich einen genaueren Wert bekommen. Da wird vieles zum Urteil des Durchführers überlassen. Andere mögliche Fehlerquellen sind natürlich die Versuchsbedingungen, zum Beispiel dass die Spannung nicht exakt am Intensitätsmaximum gemessen wurde. Trotzdem ist die Bestimmung einer so spezifischen und kleinen Zahl mit dieser Methode erstaunlich gut gelungen. Insbesondere wenn man sich vorstellt, dass man diesen Versuch mit relativ rudimentären Werkzeugen vor Hundert Jahren durchführen konnte.

6 Quellen

Benning. (2010). Benning MM 7.1: *Bedienungsanleitung*. Deutschland, Bocholt: Autor

D. B. Newell, et. al. (2018), The CODATA 2017 values of h , e , k , and N_A for the revision of the SI. *Metrologia* 55 L13, <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aa950a>

Wagner, J., Universität Heidelberg (2021). Physikalisches Praktikum PAP1 für Studierende der Physik B.Sc., 109-114.

Anhang

Tabelle 2: Spannungen bei ultraviolettem Licht

U_0 [V]	σ_{U_0} [V]	U_I [V]	σ_{U_I} [V]	U_A [V]	σ_{U_A} [V]	$\sqrt{U_A}$ [\sqrt{V}]	$\sigma_{\sqrt{U_A}}$ [\sqrt{V}]
0.00	0.01	6.95	0.02	7.012	0.022	2.648	0.004
-0.10	0.01	6.36	0.02	6.422	0.022	2.534	0.004
-0.20	0.01	5.85	0.02	5.912	0.022	2.431	0.005
-0.30	0.01	5.29	0.02	5.352	0.022	2.313	0.005
-0.40	0.01	4.76	0.02	4.822	0.022	2.196	0.005
-0.50	0.01	4.28	0.02	4.342	0.022	2.084	0.005
-0.60	0.01	3.76	0.02	3.822	0.022	1.955	0.006
-0.70	0.01	3.25	0.02	3.312	0.022	1.820	0.006
-0.80	0.01	2.77	0.01	2.832	0.014	1.683	0.004
-0.90	0.01	2.30	0.01	2.362	0.014	1.537	0.005
-1.00	0.01	1.87	0.01	1.932	0.014	1.390	0.005
-1.10	0.01	1.43	0.01	1.492	0.014	1.221	0.006
-1.20	0.01	1.03	0.01	1.092	0.014	1.045	0.007
-1.30	0.01	0.75	0.01	0.812	0.014	0.901	0.008
-1.40	0.01	0.46	0.01	0.522	0.014	0.722	0.010
-1.50	0.01	0.27	0.01	0.332	0.014	0.576	0.012
-1.60	0.01	0.15	0.01	0.212	0.014	0.460	0.015
-1.70	0.01	0.061	0.001	0.123	0.010	0.351	0.014
-1.75	0.01	0.032	0.001	0.094	0.010	0.307	0.016
-1.80	0.01	0.014	0.001	0.076	0.010	0.276	0.018
-4.00	0.01	-0.062	0.001	0.000	0.010	0.000	0.000

Tabelle 3: Spannungen bei violetterm Licht

U_0 [V]	σ_{U_0} [V]	U_I [V]	σ_{U_I} [V]	U_A [V]	σ_{U_A} [V]	$\sqrt{U_A}$ [\sqrt{V}]	$\sigma_{\sqrt{U_A}}$ [\sqrt{V}]
0.30	0.01	7.13	0.02	7.191	0.022	2.682	0.004
0.20	0.01	6.58	0.02	6.641	0.022	2.577	0.004
0.10	0.01	6.04	0.02	6.101	0.022	2.470	0.005
0.00	0.01	5.47	0.02	5.531	0.022	2.352	0.005
-0.10	0.01	4.90	0.01	4.961	0.014	2.227	0.003
-0.20	0.01	4.35	0.01	4.411	0.014	2.100	0.003
-0.30	0.01	3.82	0.01	3.881	0.014	1.970	0.004
-0.40	0.01	3.34	0.01	3.401	0.014	1.844	0.004
-0.50	0.01	2.79	0.01	2.851	0.014	1.688	0.004
-0.60	0.01	2.30	0.01	2.361	0.014	1.537	0.005
-0.70	0.01	1.84	0.01	1.901	0.014	1.379	0.005
-0.80	0.01	1.39	0.01	1.451	0.014	1.205	0.006
-0.90	0.01	1.02	0.01	1.081	0.014	1.040	0.007
-1.00	0.01	0.683	0.001	0.744	0.010	0.863	0.006
-1.10	0.01	0.420	0.001	0.481	0.010	0.694	0.007
-1.20	0.01	0.236	0.001	0.297	0.010	0.545	0.009
-1.30	0.01	0.113	0.001	0.174	0.010	0.417	0.012
-1.40	0.01	0.036	0.001	0.097	0.010	0.311	0.016
-4.00	0.01	-0.061	0.001	0.000	0.010	0.000	0.000

Tabelle 4: Spannungen bei blauem Licht

U_0 [V]	σ_{U_0} [V]	U_I [V]	σ_{U_I} [V]	U_A [V]	σ_{U_A} [V]	$\sqrt{U_A}$ [\sqrt{V}]	$\sigma_{\sqrt{U_A}}$ [\sqrt{V}]
0.30	0.01	8.17	0.02	8.265	0.022	2.875	0.004
0.20	0.01	7.47	0.02	7.565	0.022	2.750	0.004
0.10	0.01	6.76	0.02	6.855	0.022	2.618	0.004
0.00	0.01	6.06	0.02	6.155	0.022	2.481	0.005
-0.10	0.01	5.27	0.01	5.365	0.014	2.316	0.003
-0.20	0.01	4.63	0.01	4.725	0.014	2.174	0.003
-0.30	0.01	3.95	0.01	4.045	0.014	2.011	0.004
-0.40	0.01	3.27	0.01	3.365	0.014	1.834	0.004
-0.50	0.01	2.64	0.01	2.735	0.014	1.654	0.004
-0.60	0.01	2.07	0.01	2.165	0.014	1.471	0.005
-0.70	0.01	1.53	0.01	1.625	0.014	1.275	0.006
-0.80	0.01	1.068	0.001	1.163	0.010	1.078	0.005
-0.90	0.01	0.673	0.001	0.768	0.010	0.876	0.006
-1.00	0.01	0.383	0.001	0.478	0.010	0.691	0.007
-1.10	0.01	0.175	0.001	0.270	0.010	0.520	0.010
-1.20	0.01	0.055	0.001	0.150	0.010	0.387	0.013
-1.30	0.01	0.015	0.001	0.110	0.010	0.332	0.015
-4.00	0.01	-0.095	0.001	0.000	0.010	0.000	0.000

Tabelle 5: Spannungen bei grünem Licht

U_0 [V]	σ_{U_0} [V]	U_I [V]	σ_{U_I} [V]	U_A [V]	σ_{U_A} [V]	$\sqrt{U_A}$ [\sqrt{V}]	$\sigma_{\sqrt{U_A}}$ [\sqrt{V}]
0.30	0.01	5.30	0.01	5.346	0.014	2.312	0.003
0.20	0.01	4.51	0.01	4.556	0.014	2.134	0.003
0.10	0.01	3.80	0.01	3.846	0.014	1.961	0.004
0.00	0.01	3.05	0.01	3.096	0.014	1.760	0.004
-0.10	0.01	2.32	0.01	2.366	0.014	1.538	0.005
-0.20	0.01	1.66	0.01	1.706	0.014	1.306	0.005
-0.30	0.01	1.07	0.01	1.116	0.014	1.056	0.007
-0.40	0.01	0.658	0.001	0.704	0.010	0.839	0.006
-0.50	0.01	0.302	0.001	0.348	0.010	0.590	0.009
-0.60	0.01	0.100	0.001	0.146	0.010	0.382	0.013
-0.65	0.01	0.042	0.001	0.088	0.010	0.297	0.017
-0.70	0.01	0.008	0.001	0.054	0.010	0.232	0.022
-4.00	0.01	-0.046	0.001	0.000	0.010	0.000	0.000

Tabelle 6: Spannungen bei grünem Licht

U_0 [V]	σ_{U_0} [V]	U_I [V]	σ_{U_I} [V]	U_A [V]	σ_{U_A} [V]	$\sqrt{U_A}$ [\sqrt{V}]	$\sigma_{\sqrt{U_A}}$ [\sqrt{V}]
0.30	0.01	3.67	0.01	3.704	0.014	1.925	0.004
0.20	0.01	3.03	0.01	3.064	0.014	1.750	0.004
0.10	0.01	2.39	0.01	2.424	0.014	1.557	0.005
0.00	0.01	1.81	0.01	1.844	0.014	1.358	0.005
-0.10	0.01	1.20	0.01	1.234	0.014	1.111	0.006
-0.20	0.01	0.735	0.001	0.769	0.010	0.877	0.006
-0.30	0.01	0.384	0.001	0.418	0.010	0.647	0.008
-0.40	0.01	0.147	0.001	0.181	0.010	0.425	0.012
-0.50	0.01	0.052	0.001	0.086	0.010	0.293	0.017
-0.55	0.01	0.025	0.001	0.059	0.010	0.243	0.021
-4.00	0.01	-0.034	0.001	0.000	0.010	0.000	0.000

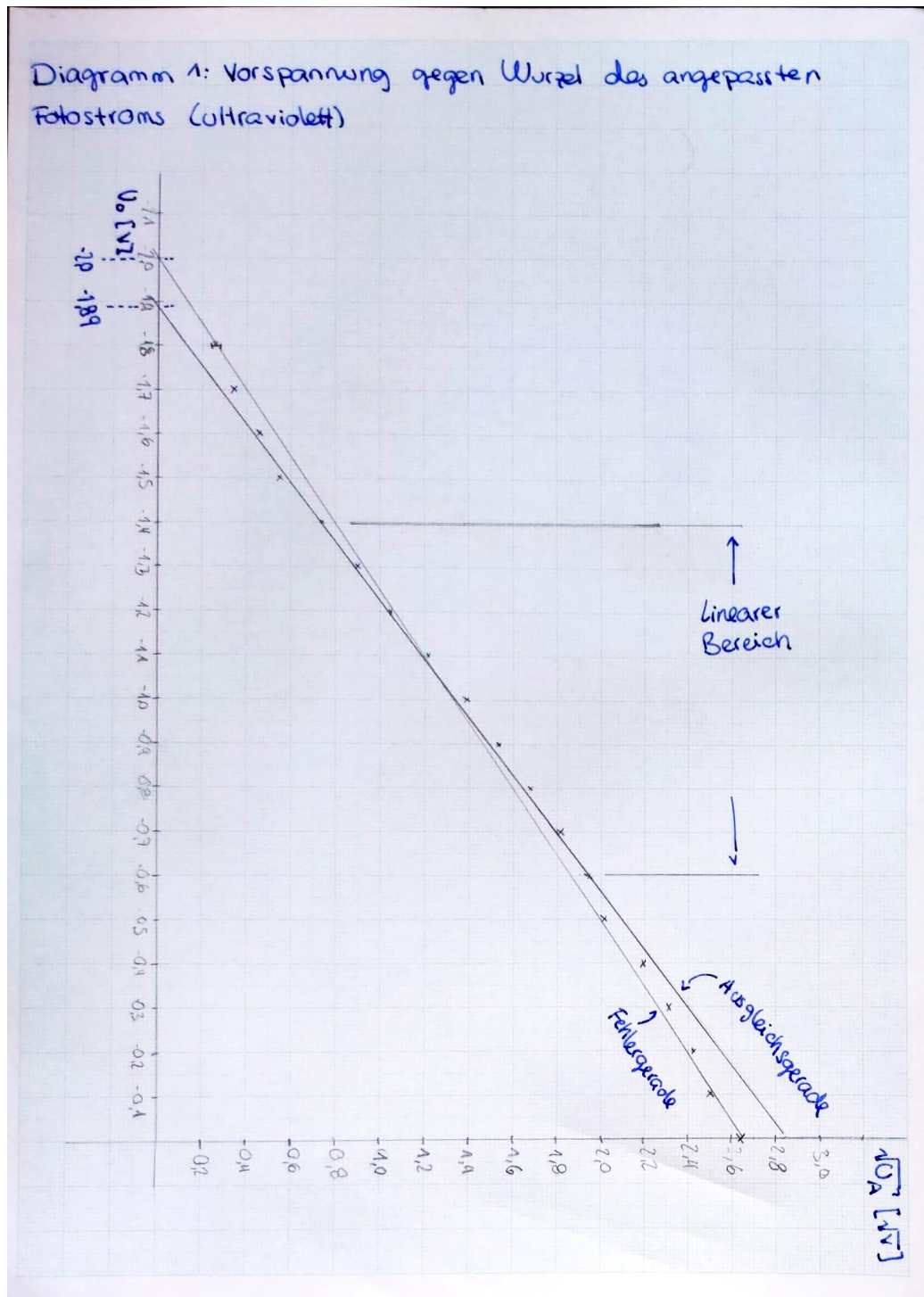


Diagramm 1: Ultraviolett

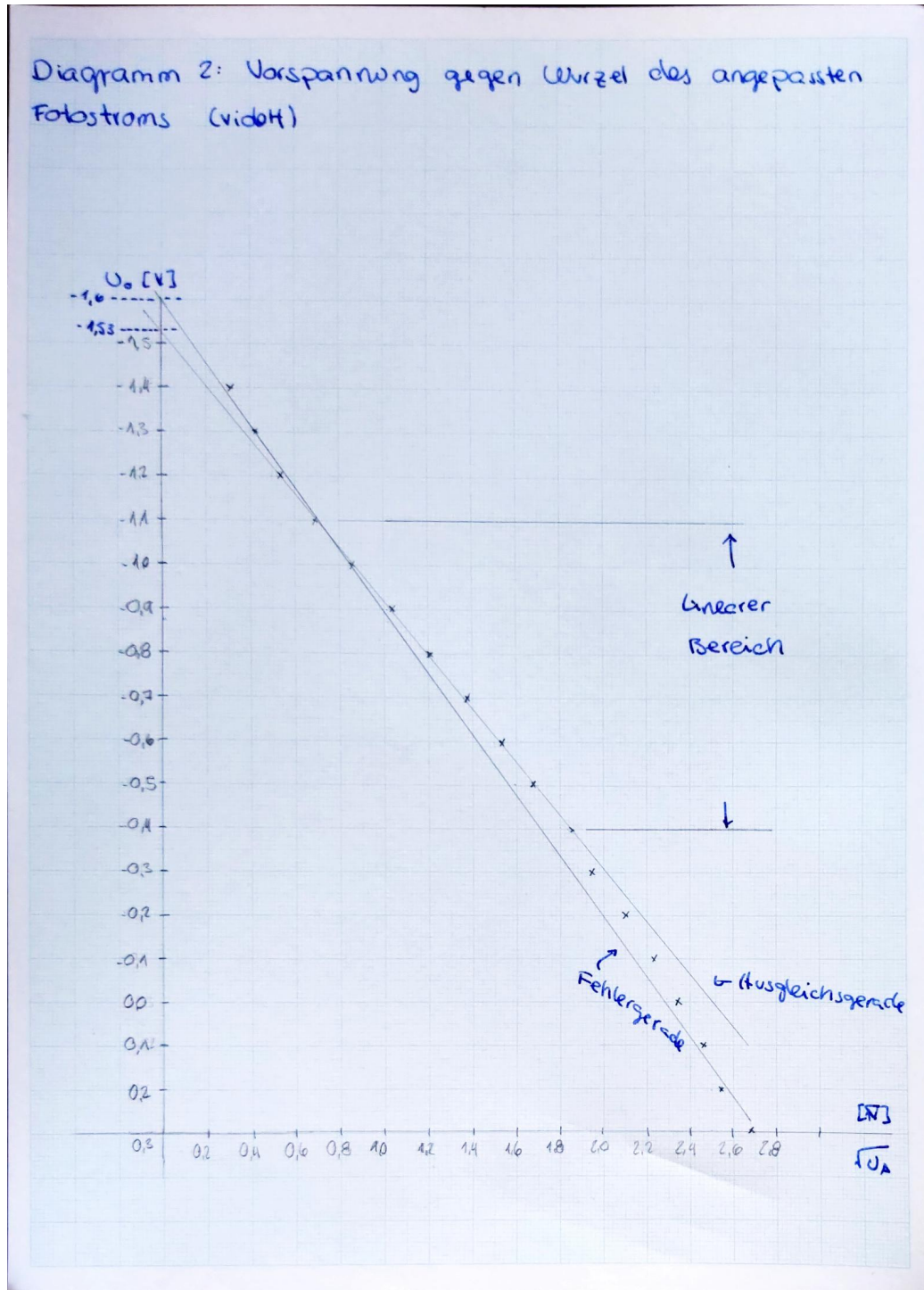


Diagramm 2: Violett

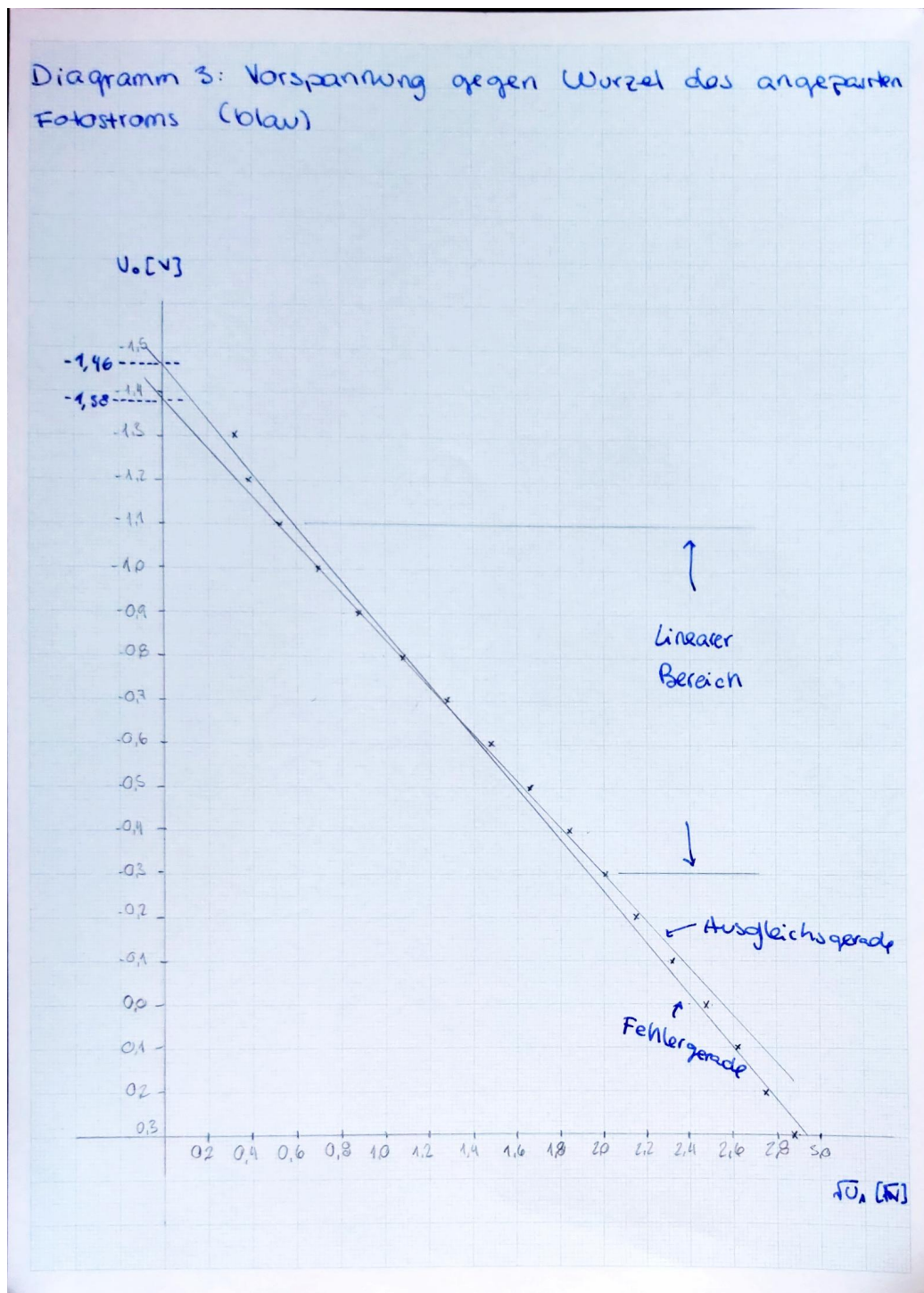


Diagramm 3: Blau

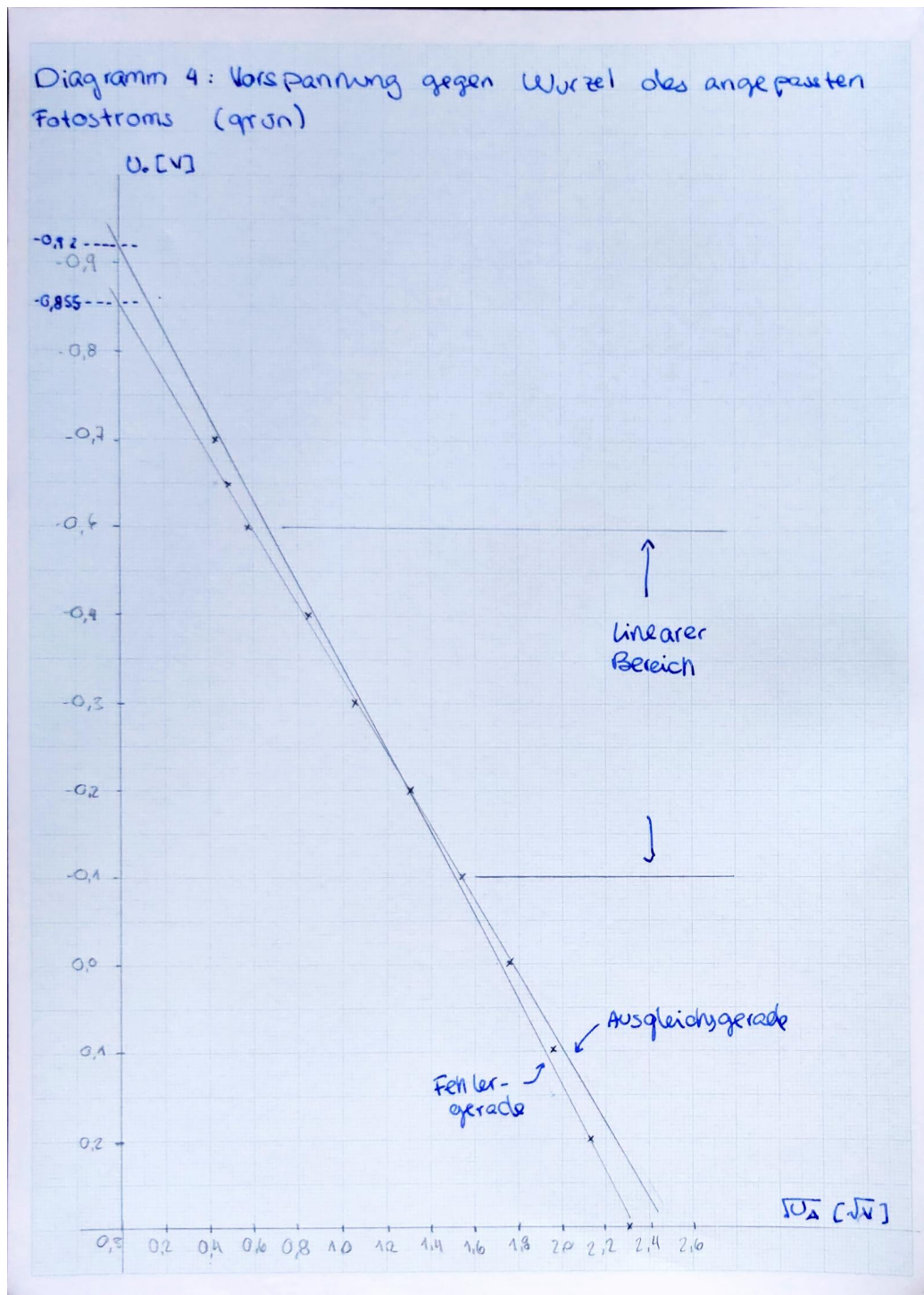


Diagramm 4: Grün

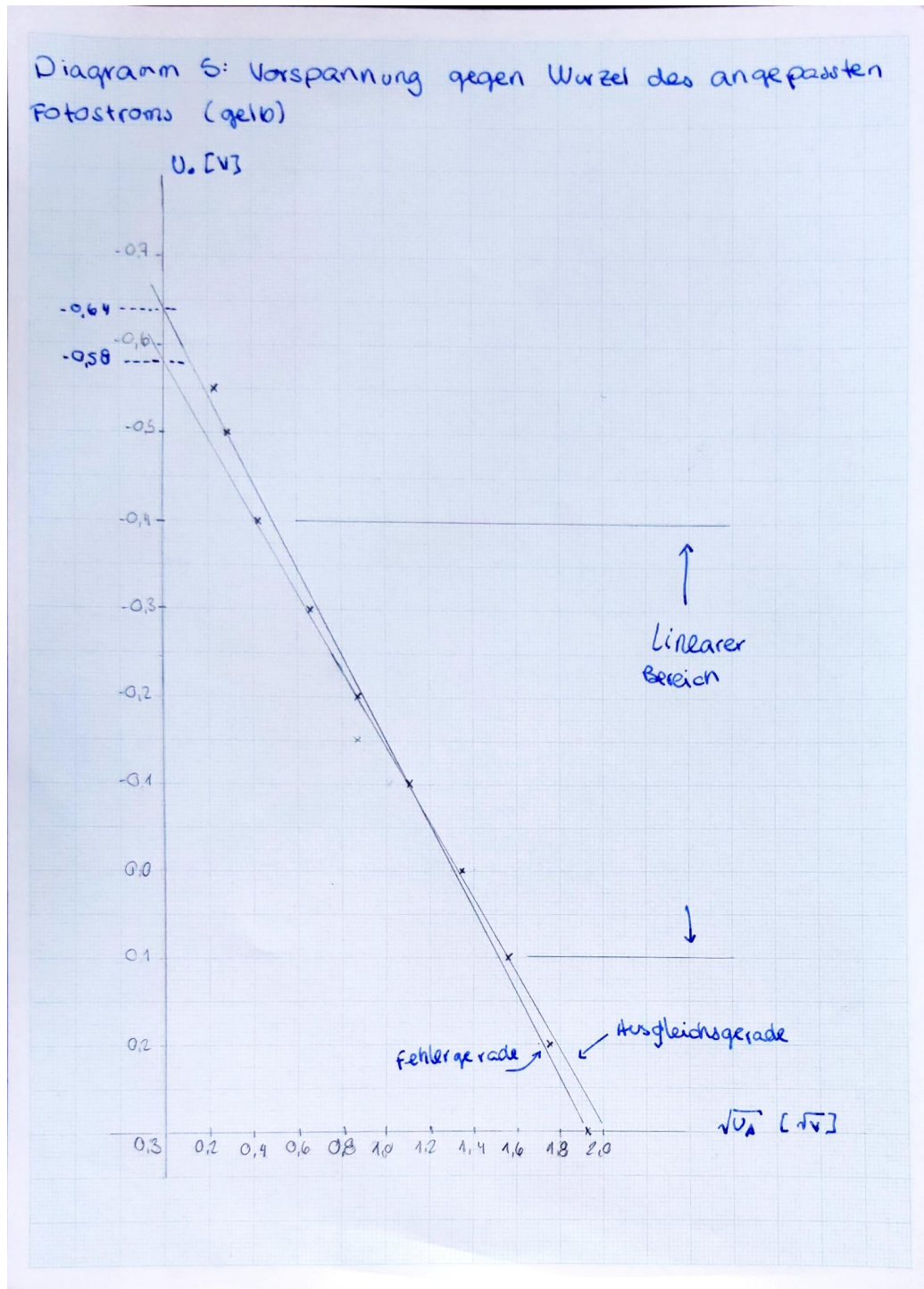


Diagramm 5: Gelb