

Versuch 35 - Fotoeffekt

PAP 1

15.9.2025

Teilnehmender Student: **Paul Saß**

Gruppe: 9

Kurs: Vormittags

Tutor/in : Jonas Schweer

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Messverfahren	1
1.3 Grundlagen aus der Physik	1
1.3.1 Fotozelle	1
1.3.2 Energieverteilung von Elektronen in Metall	2
1.4 Standartabweichung	3
2 Durchführung	4
2.1 Messprotokoll	4
3 Auswertung	10
3.1 Aufgabe I	10
4 Zusammenfassung und Diskussion	20

1. Einleitung

1.1 Motivation

Die Motivation dieses Versuchs besteht in der Bestimmung der Planckkonstante mithilfe des Fotoeffekts. Die Plackkonstante ist eine fundamentale Größe in der Quantenphysik und kennzeichnet die Quantisierung der Energie. Für die Bestimmung eignet sich der Fotoeffekt, da dieser eine anschauliche Möglichkeit bietet die Quantisierung des Lichts zu verstehen.

1.2 Messverfahren

Das Licht einer Hg-Dampflampe wird durch einen Kollimator zu einem Doppelprisma geschickt. Durch den Kollimator sind die Strahlen parallel, weshalb das Licht am Doppelprisma in sein Spektrum zerlegt wird. Anschließend wird das Licht in einen Kasten gespiegelt. In dem Kasten befindet sich ein Papierschirm, auf den das Licht mittels eines Hebels umgelenkt werden kann um die gewünschte Spektrallinie zu finden. Anschließend wird der Hebel umgelegt und mit dem Multimeter das Maximum der messbaren Spannung gesucht. Dann wird die Vorspannung in 100 mV Schritten heruntergesetzt und jeweils der Fotostrom mithilfe des Multimeters gemessen. Der Fotostrom wird mit durch einen Spannungswandler als Spannung abgelesen.

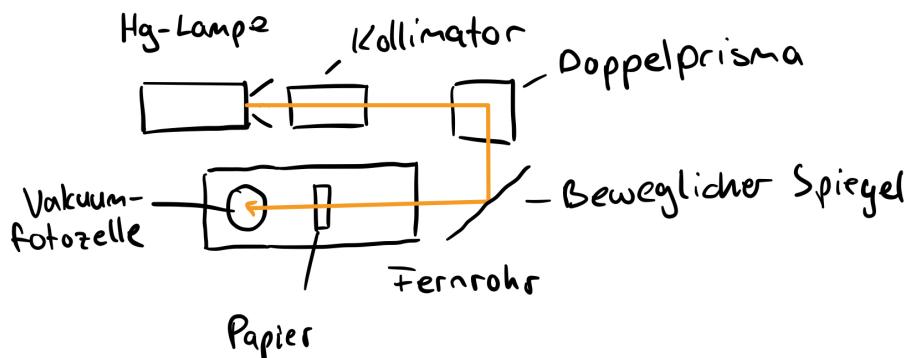


Abbildung 1.1: Aufbauskizze

1.3 Grundlagen aus der Physik

1.3.1 Fotozelle

Die Photozelle besteht aus einer Kathode, auf welche das Licht einfällt, und einer Ringanode, welche die austretenden Elektronen aufnehmen soll. Die Fotokathode besteht aus bedampftem Kalium welches eine deutlich geringere Austrittsarbeit hat, als das Kupfer aus dem die Anode besteht. Das sorgt dafür, dass aus der Anode möglichst keine Elektronen austreten. Der Elektronenfluss zwischen Fotokathode und Ringanode kann mittels eines Multimeters abgelesen werden. Diese Ströme sind sehr klein, weshalb sie mit einem Spannungswandler verstärkt werden.

1.3.2 Energieverteilung von Elektronen in Metall

In einem Metall bilden die Atome ein Metallgitter, was dafür sorgt, dass sich die Valenzelektronen innerhalb des Metalls nahezu frei bewegen können. Diese werden als Leitungselektronen bezeichnet. Sie können das Metall nicht ohne weiteres verlassen, da sie von den Atomkernen immer noch angezogen werden.

Die Energieverteilung dieser Elektronen unterliegt der sog Fermiverteilung. Diese besagt, dass bei $T = 0K$ alle Energiezustände bis zu einer Maximalenergie, der Fermienergie E_F , besetzt sind. Zustände über dieser Energie treten nicht auf.

Bei Temperaturen über $0K$ „verschwimmt“ die Grenze der Fermienergie. Das heißt, dass auch Zustände über dieser Energie auftreten.

Ein Metall hat eine charakteristische Austrittsarbeit A , welche über die Fermienergie hinaus geleistet werden muss um das Elektron in den Außenraum zu bewegen. Trifft nun ein Photon mit der Energie $h\nu$ ein Leitungselektron mit der Energie E_e wird die Energie auf das Elektron übertragen. Ist diese Energie groß genug kann das Elektron das Metall verlassen. Für die benötigte Energie gilt:

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

Für die maximale Energie eines Elektrons gilt, dass es sich bei der Fermienergie befindet. Dieser Fall ist bei Temperaturen über $0 K$ nicht immer gegeben. Legt man nun eine Spannung U so an, dass die Elektronen bremst, gibt es im Idealfall eine Spannung U_s bei der kein Strom mehr fließt. Da dies nur den Idealfall betrifft und es Elektronen gibt die es trotz $U > U_i$ zur Anode schaffen muss der Fall für Spannungen unter U_s asymptotisch angenähert werden. Die Nullstelle dieser geraden entspricht der theoretischen Sperrspannung U_s .

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

Elektronen im elektrischen Feld besitzen die Energie $E = eU$ welche bei der Sperrspannung genau der kinetischen Energie der Elektronen entsprechen muss, da kein Strom fließt. Mit e als Elementarladung und U als angelegte Spannung. Daraus folgt mit Gleichung 2:

$$eU_s = h\nu - A \quad (3)$$

$$\Rightarrow \frac{dU_s(\nu)}{d\nu} = \frac{h}{e} \quad (4)$$

Durch den Spannungswandler wird am Multimeter eine Spannung U_I gemessen, welche nach dem Ohmschen Gesetz proportional zu Spannung ist. Da unserer Messaufbau für einen Untergrundsstrom U_{I0} sorgt muss dieser zuerst eliminiert werden. Dies führt zu den folgenden Relation:

$$I \propto U_I - U_{I0} \quad (5)$$

Die Geometrie der Fotozelle sorgt für einen Zusammenhang zwischen gemessenem Strom I und Gegenspannung U von:

$$U \propto \sqrt{I} \quad (6)$$

Setzt man diese beiden Zusammenhänge zusammen erhält man:

$$U \propto \sqrt{U_I - U_{I0}} \quad (7)$$

Deshalb wird in den folgenden Diagrammen die Gegenspannung U gegen $\sqrt{U_I - U_{I0}}$ aufgetragen.

1.4 Standartabweichung

Allgemein lässt sich die Abweichung eines Messwertes x zu einem Literaturwert x_{Lit} darstellen durch die Sigmaabweichung:

$$\frac{|x - x_{Lit}|}{\Delta x} = k\sigma \quad \text{mit } k \in \mathbb{R} \quad (8)$$

2. Durchführung

2.1 Messprotokoll

Messprotokoll

15.09.25

Versuch 35 - Photoeffekt

9:30 Uhr bis 12:30 Uhr

Geräte:

- Spektrometeranlage mit zwei Prismen und eingebaute Vakuumfotozelle
- Hg-Spektral-Lampe mit Netzteil
- Pico-Amperemeter mit externem Netzteil
- Multimeter

Aufnahme der Strom-Spannungskennlinie für verschiedene Emissionslinien des Hg-Spektrum

Die Hg-Lampe wird eingeschaltet, dabei muss für wenige Minuten gewartet werden, damit die Intensität der Lampe konstant wird. Der Spiegel im Fernrohr wird nun zunächst so eingestellt, dass auf dem weißen Schirm die Spektrallinien zu sehen sind. Der Spektrometer-Spiegel kann durch eine Rändelschraube verstellt werden und somit die Spektrallinien auf dem Schirm verschoben werden. Auf dem Schirm ist eine Markierung in der Mitte. Nun wird die UV-Linie auf die Markierung mithilfe der Rändelschraube eingesetzt. Die Vorspannung wird auf 0V gestellt. Dann wird der Spiegel im Fernrohr wieder so geklappt, dass das Licht auf die Fotozelle trifft. Die gemessene Spannung am Multimeter soll nun durch kleine Drehung an der Rändelschraube gefunden werden. Mit dieser Einstellung wird von 0V Vorspannung in (-0,1V)-Schritten an der Vorspannung eine Messreihe der gemessenen Spannung am Multimeter durchgeführt, bis diese einen Wert zwischen 20-50mV erreicht.

Dann soll mit einer Vorspannung von -6V zunächst der Untergrundstrom, also die Spannung, die dann noch am Multimeter angezeigt wird, gemessen werden.

Dies soll für die anderen Spektrallinien (violett, blau, grün, gelb) durchgeführt werden, wobei für diese zu Beginn eine Vorspannung von +0,3V eingestellt wird.

Abbildung 2.1: Messprotokoll Versuch 34 Seite 1

Tabelle 1: Messreihe UV

Vorspannung	gemessene Spannung [V]
0,0 V	6,03
- 0,1 V	5,51
- 0,2 V	5,04
- 0,3 V	4,53
- 0,4 V	4,07
- 0,5 V	3,650
- 0,6 V	3,204
- 0,7 V	2,816
- 0,8 V	2,447
- 0,9 V	2,087
- 1,0 V	1,737
- 1,1 V	1,438
- 1,2 V	1,130
- 1,3 V	0,887
- 1,4 V	0,664
- 1,5 V	0,461
- 1,6 V	0,3072
- 1,7 V	0,1815
- 1,8 V	0,0834
- 1,9 V	0,0188
<hr/>	
- 4,0 V	- 0,0416

Abbildung 2.2: Messprotokoll Versuch 34 Seite 2

Tabelle 2: Messreihe violett

Vorspannung	gemessene Spannung [V]
0,3V	6,65 V
0,2V	6,18 V
0,1V	5,66 V
0,0V	5,14 V
-0,1V	4,65 V
-0,2V	4,13 V
-0,3V	3,65 V
-0,4V	3,228 V
-0,5V	2,816
-0,6V	2,398
-0,7V	2,021
-0,8V	1,652
-0,9V	1,318
-1,0V	1,014
-1,1V	0,763
-1,2V	0,520
-1,3V	0,3358
-1,4V	0,1912
-1,5V	0,0806
-1,6V	0,0135
<hr/>	
-4,0V	-0,0338

Abbildung 2.3: Messprotokoll Versuch 34 Seite 3

Tabelle 3: Messreihe blau

Vorspannung	gemessene Spannung [V]
0,3 V	8,50
0,2 V	7,82
0,1 V	7,15
0,0 V	6,45
-0,1 V	5,76
-0,2 V	5,16
-0,3 V	4,54
-0,4 V	3,93
-0,5 V	3,355
-0,6 V	2,806
-0,7 V	2,303
-0,8 V	1,796
-0,9 V	1,371
-1,0 V	0,964
-1,1 V	0,623
-1,2 V	0,3507
-1,3 V	0,1475
-1,4 V	0,0223
-4,0 V	-0,0544

Abbildung 2.4: Messprotokoll Versuch 34 Seite 4

Tabelle 4: Messreihe grün

Vorspannung	gemessene Spannung [V]
0,3V	7,17
0,2V	6,39
0,1V	5,60
0,0V	4,79
-0,1V	4,08
-0,2V	3,361
-0,3V	2,678
-0,4V	1,989
-0,5V	1,428
-0,6V	0,893
-0,7V	0,644
-0,8V	0,1464
-0,9V	0,0197
-4,0V	-0,0283

Abbildung 2.5: Messprotokoll Versuch 34 Seite 5

Tabelle 5: Messreihe gelb

Vorspannung	gemessene Spannung [V]
0,3 V	5,60
0,2 V	4,88
0,1 V	4,11
0,0 V	3,477
-0,1 V	2,771
-0,2 V	2,165
-0,3 V	1,575
-0,4 V	1,025
-0,5 V	0,595
-0,6 V	0,2828
-0,7 V	0,0864
-0,8 V	0,0175
-4,0 V	-0,0175

J. Schwer

Abbildung 2.6: Messprotokoll Versuch 34 Seite 6

3. Auswertung

3.1 Aufgabe I

Zuerst werden die Tabellen aus dem Messprotokoll ergänzt. Dafür wird $U_{I0} = U_I - U_0$ wobei U_0 der jeweilige Unterstrom ist. Da ungefähr gilt $I \propto U^2$ wird hier noch $\sqrt{U_{I0}}$ berechnet.

Für die Fehler gilt, ΔU_{Mult} als Fehler des Multimeters:

$$\Delta U_{I0} = \sqrt{(\Delta U_{Mult})^2 + (\Delta U_I)^2} \quad (9)$$

$$\Delta (\sqrt{U_I - U_{I0}}) = \sqrt{\left(\frac{1}{2\sqrt{U_I - U_{I0}}} \Delta U_I\right)^2 + \left(-\frac{1}{2\sqrt{U_I - U_{I0}}} \Delta U_{I0}\right)^2} \quad (10)$$

$U[\text{mV}]$	$U_I[\text{mV}]$	$U_{I0}[\text{mV}]$	$\sqrt{U_I - U_{I0}}[\sqrt{\text{mV}}]$
0	6030 ± 25	6072 ± 25	$77,92 \pm 0,16$
-100	5510 ± 24	5552 ± 24	$74,5 \pm 0,16$
-200	5040 ± 23	5082 ± 23	$71,29 \pm 0,16$
-300	4530 ± 21	4572 ± 21	$67,61 \pm 0,16$
-400	4070 ± 20	4112 ± 20	$64,12 \pm 0,16$
-500	3650 ± 16	3692 ± 16	$60,76 \pm 0,13$
-600	3204 ± 14	3246 ± 14	$56,97 \pm 0,12$
-700	2816 ± 12	2858 ± 12	$53,46 \pm 0,11$
-800	2447 ± 11	2489 ± 11	$49,89 \pm 0,11$
-900	2087 ± 9	2129 ± 9	$46,14 \pm 0,10$
-1000	1737 ± 8	1779 ± 8	$42,17 \pm 0,09$
-1100	1438 ± 7	1480 ± 7	$38,47 \pm 0,09$
-1200	1130 ± 6	1172 ± 6	$34,23 \pm 0,08$
-1300	887 ± 5	929 ± 5	$30,5 \pm 0,08$
-1400	664 ± 4	706 ± 4	$26,56 \pm 0,07$
-1500	461 ± 3	503 ± 3	$22,42 \pm 0,06$
-1600	$307,2 \pm 1,3$	$348,8 \pm 1,4$	$18,68 \pm 0,04$
-1700	$181,5 \pm 1,0$	$223,1 \pm 1,1$	$14,94 \pm 0,04$
-1800	$83,4 \pm 0,7$	$125,0 \pm 1,0$	$11,18 \pm 0,04$
-1900	$18,8 \pm 0,5$	$60,4 \pm 0,8$	$7,77 \pm 0,05$

$$U_{I0} = -41,6, \Delta U_{I0} = 0,6$$

Tabelle 3.1: Gemessene Spannungen UV

U [mV]	U_I [mV]	U_{I0} [mV]	$\sqrt{U_I - U_{I0}}$ [\sqrt{mV}]
300	6650 ± 27	6684 ± 27	81.75 ± 0.16
200	6180 ± 25	6214 ± 25	78.83 ± 0.16
100	5660 ± 24	5694 ± 24	75.46 ± 0.16
0	5140 ± 23	5174 ± 23	71.93 ± 0.16
-100	4650 ± 22	4684 ± 22	68.44 ± 0.16
-200	4130 ± 20	4164 ± 20	64.53 ± 0.16
-300	3650 ± 16	3684 ± 16	60.69 ± 0.13
-400	3228 ± 14	3262 ± 14	57.11 ± 0.12
-500	2816 ± 12	2850 ± 12	53.38 ± 0.12
-600	2398 ± 11	2432 ± 11	49.31 ± 0.11
-700	2021 ± 9	2055 ± 9	45.33 ± 0.10
-800	1652 ± 8	1686 ± 8	41.06 ± 0.09
-900	1318 ± 6	1352 ± 6	36.77 ± 0.09
-1000	1014 ± 5	1048 ± 5	32.37 ± 0.08
-1100	763 ± 4	797 ± 4	28.23 ± 0.07
-1200	520 ± 3	554 ± 3	23.53 ± 0.07
-1300	335.8 ± 1.3	369.6 ± 1.5	19.22 ± 0.04
-1400	191.2 ± 1.0	225.0 ± 1.1	15.00 ± 0.04
-1500	80.6 ± 0.7	114.4 ± 1.0	10.70 ± 0.04
-1600	13.5 ± 0.5	47.3 ± 0.8	6.88 ± 0.06

$$U_{I0} = -33,8, \Delta U_{I0} = 0,6$$

Tabelle 3.2: Gemessene Spannungen Violett

U [mV]	U_I [mV]	U_{I0} [mV]	$\sqrt{U_I - U_{I0}}$ [\sqrt{mV}]
300	8500 ± 31	8554.4 ± 31	92.49 ± 0.17
200	7820 ± 30	7874.4 ± 30	88.74 ± 0.17
100	7150 ± 28	7204.4 ± 28	84.88 ± 0.16
0	6450 ± 26	6504.4 ± 26	80.65 ± 0.16
-100	5760 ± 24	5814.4 ± 24	76.25 ± 0.16
-200	5160 ± 23	5214.4 ± 23	72.21 ± 0.16
-300	4540 ± 21	4594.4 ± 21	67.78 ± 0.16
-400	3930 ± 17	3984.4 ± 17	63.12 ± 0.13
-500	3355 ± 14	3409.4 ± 14	58.39 ± 0.12
-600	2806 ± 12	2860.4 ± 12	53.48 ± 0.11
-700	2303 ± 10	2357.4 ± 10	48.55 ± 0.11
-800	1796 ± 8	1850.4 ± 8	43.02 ± 0.09
-900	1371 ± 6	1425.4 ± 7	37.75 ± 0.09
-1000	964 ± 5	1018.4 ± 5	31.91 ± 0.08
-1100	623 ± 3	677.4 ± 4	26.03 ± 0.07
-1200	350.7 ± 1.4	$405.1 \pm 1,5$	20.13 ± 0.04
-1300	147.5 ± 0.9	201.9 ± 1.1	14.21 ± 0.04
-1400	22.3 ± 0.6	76.7 ± 0.8	8.76 ± 0.05

$$U_{I0} = -54,4, \Delta U_{I0} = 0,6$$

Tabelle 3.3: Gemessene Spannungen Blau

$U[\text{mV}]$	$U_I[\text{mV}]$	$U_{I0}[\text{mV}]$	$\sqrt{U_I - U_{I0}}[\sqrt{\text{mV}}]$
300	7170 ± 28	7198 ± 28	84.84 ± 0.16
200	6390 ± 26	6418 ± 26	80.11 ± 0.16
100	5600 ± 24	5628 ± 24	75.02 ± 0.16
0	4790 ± 22	4818 ± 22	69.41 ± 0.16
-100	4080 ± 20	4108 ± 20	64.10 ± 0.16
-200	3361 ± 14	3389 ± 14	58.22 ± 0.12
-300	2678 ± 12	2706 ± 12	52.02 ± 0.11
-400	1989 ± 9	2017 ± 9	44.91 ± 0.10
-500	1428 ± 7	1453 ± 7	38.16 ± 0.09
-600	893 ± 5	921 ± 5	30.35 ± 0.08
-700	444.0 ± 2.8	472.3 ± 2.8	21.73 ± 0.07
-800	146.400 ± 0.9	174.7 ± 1.0	13.22 ± 0.04
-900	19.700 ± 0.5	48.0 ± 0.8	6.93 ± 0.06

$$U_{I0} = -28, 3, \Delta U_{I0} = 0, 6$$

Tabelle 3.4: Gemessene Spannungen Grün

$U[\text{mV}]$	$U_I[\text{mV}]$	$U_{I0}[\text{mV}]$	$\sqrt{U_I - U_{I0}}[\sqrt{\text{mV}}]$
300	5600 ± 24	5611 ± 24	74.95 ± 0.16
200	4880 ± 22	4898 ± 22	69.98 ± 0.16
100	4110 ± 20	4128 ± 20	64.25 ± 0.16
0	3477 ± 15	3495 ± 15	59.11 ± 0.13
-100	2771 ± 12	2789 ± 12	52.81 ± 0.11
-200	2145 ± 10	2163 ± 10	46.50 ± 0.10
-300	1575 ± 7	1593 ± 7	39.91 ± 0.09
-400	1025 ± 5	1043 ± 5	32.29 ± 0.08
-500	595 ± 3	613 ± 3	24.75 ± 0.07
-600	282.2 ± 1.2	299.7 ± 1.3	17.31 ± 0.04
-700	86.4 ± 0.7	103.9 ± 0.9	10.19 ± 0.04
-800	17.5 ± 0.5	35.0 ± 0.8	5.92 ± 0.07

$$U_{I0} = -17, 5, \Delta U_{I0} = 0, 5$$

Tabelle 3.5: Gemessene Spannungen Gelb

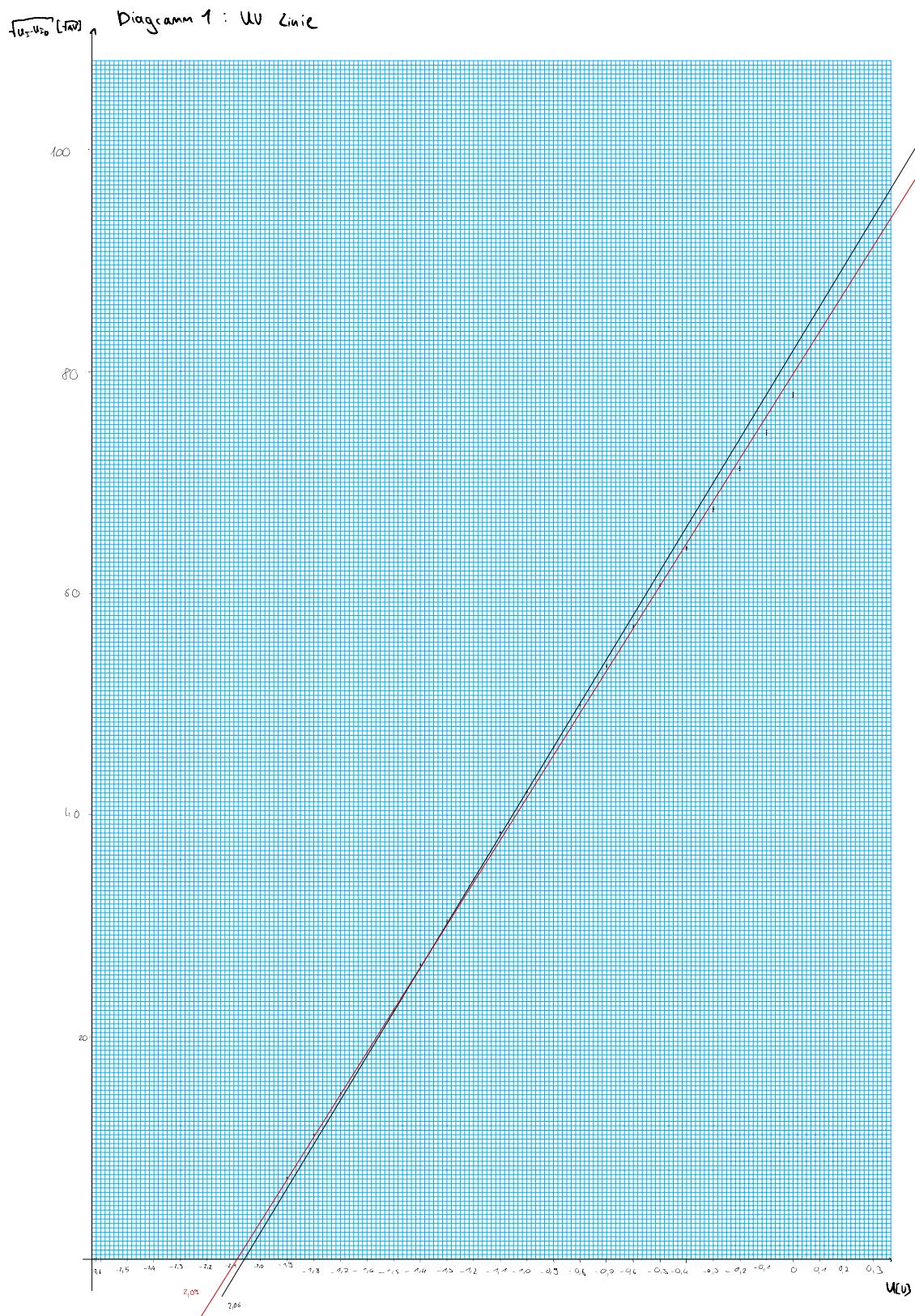


Abbildung 3.1: Diagramm 1

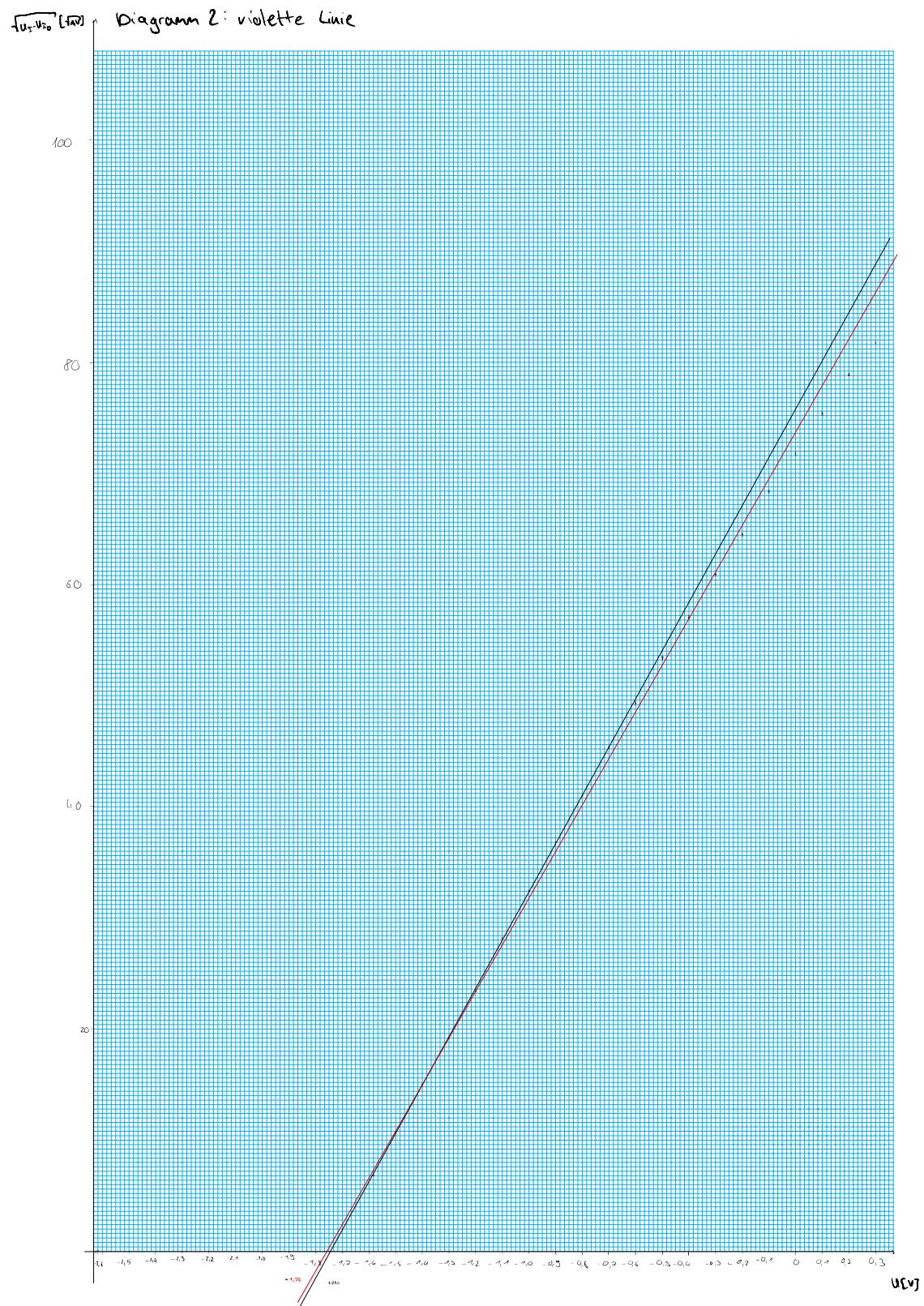


Abbildung 3.2: Diagramm 2

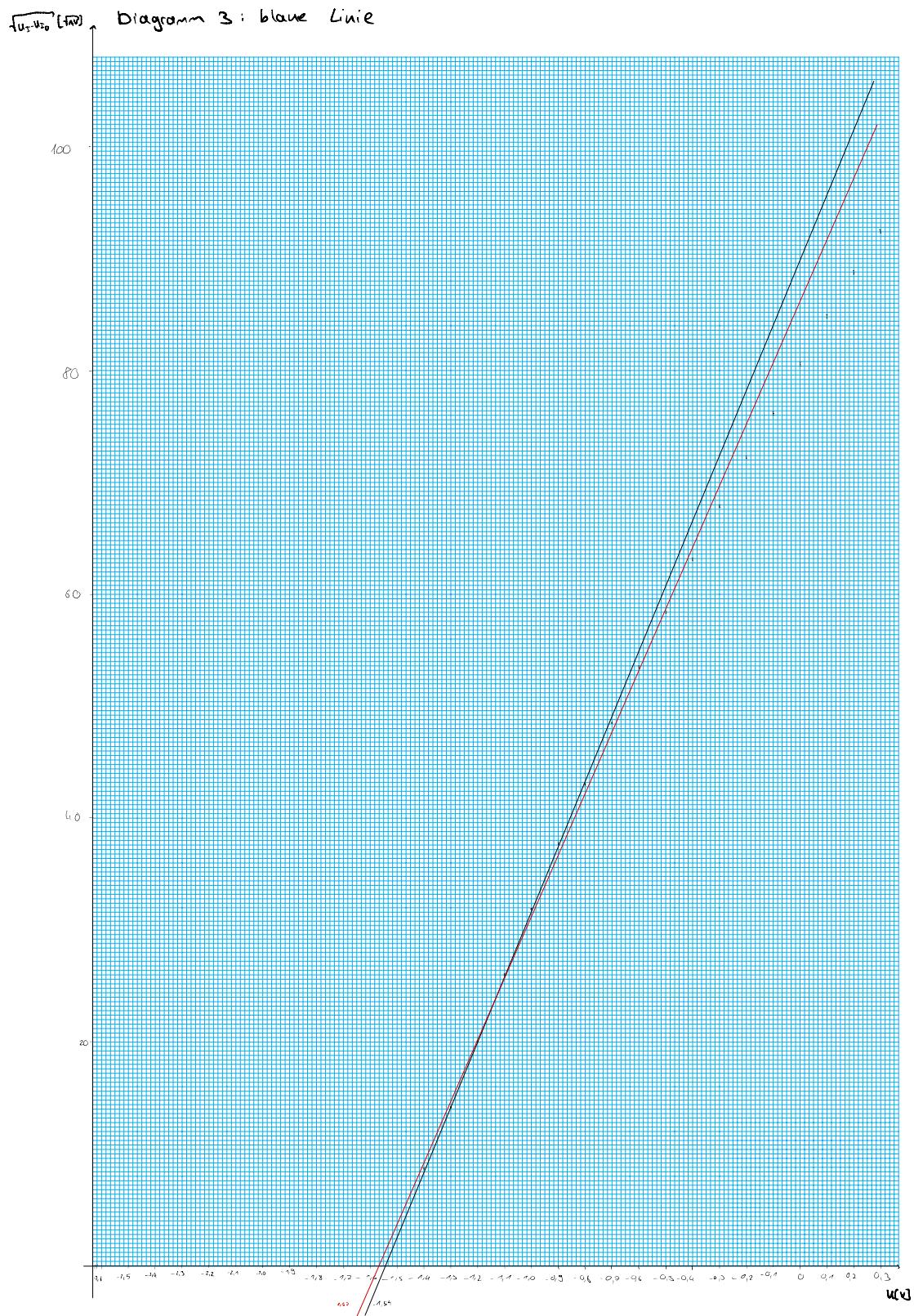


Abbildung 3.3: Diagramm 3

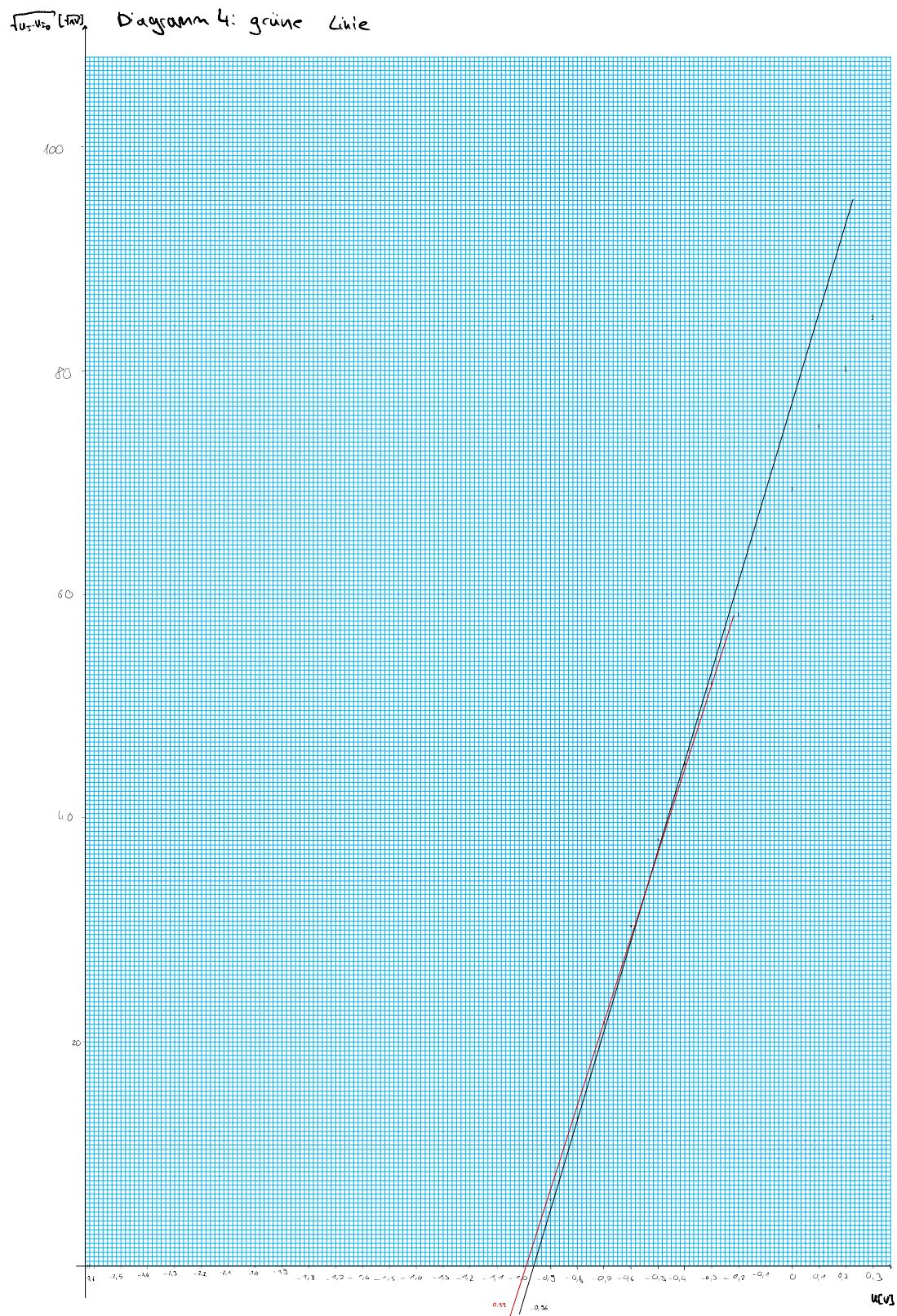


Abbildung 3.4: Diagramm 4

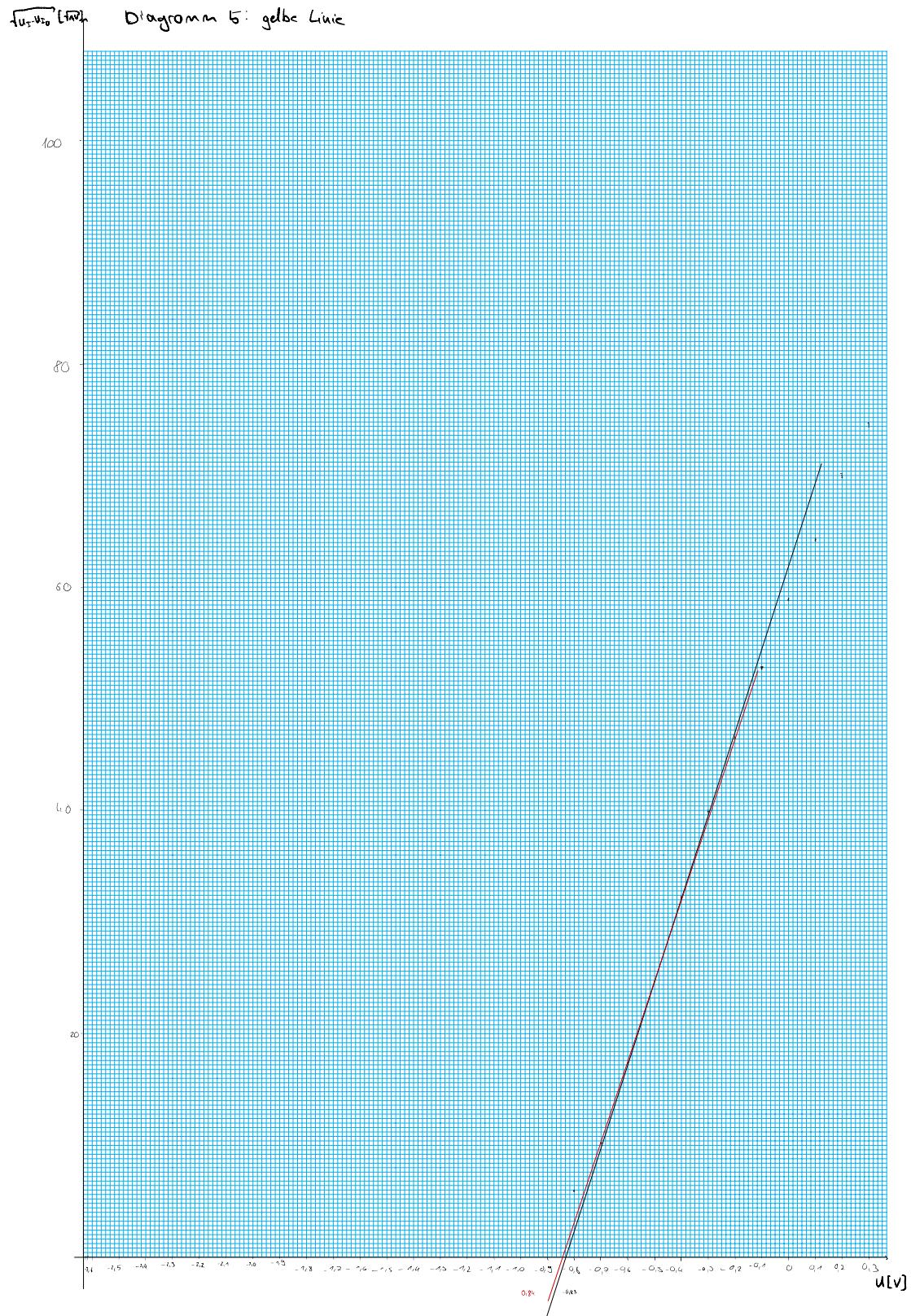


Abbildung 3.5: Diagramm 5

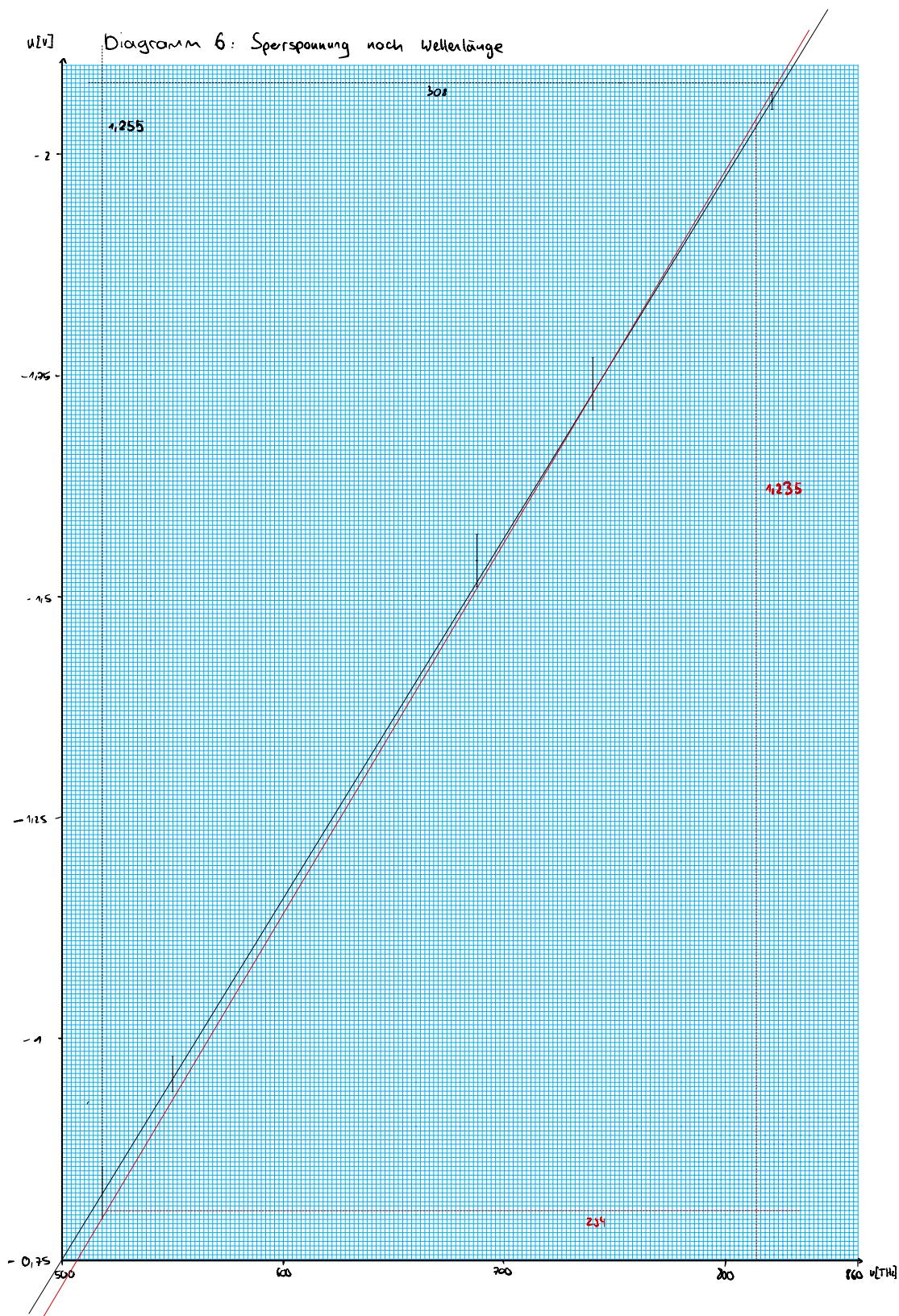


Abbildung 3.6: Diagramm 6

Aus den jeweils zugehörigen Diagrammen 1-5 ergibt sich durch das Ablesen der Nullstelle der Trendgeraden die Sperrspannung U_s . Hier gilt für den Fehler mit $U_{s-Fehler}$ als Nullstelle der Fehlergeraden.

$$\Delta U_s = U_s - U_{s-Fehler} \quad (11)$$

Frequenz[THz]	Sperrspannung U_s [V]
518,7	$0,83 \pm 0,03$
549,0	$0,96 \pm 0,02$
687,0	$1,54 \pm 0,03$
740,2	$1,74 \pm 0,03$
821,3	$2,06 \pm 0,03$

Tabelle 3.6: Sperrspannungen nach Wellenlänge

Daraus wurde Diagramm 6 erstellt und mithilfe des Betrags der Steigung der Trend und Fehlergeraden die Planck-Konstante h bestimmt:

Dabei muss die Steigung der Geraden noch mit der Elementarladung $e = 1,602 \cdot 10^{-19}\text{C}$ multipliziert werden.

Für die Steigung der Trendgeraden gilt:

$$a_{Trend} = \left| \frac{0,825 - 2,08}{308} \frac{\text{V}}{\text{THz}} \right| = 4,07 \cdot 10^{-15} \frac{\text{V}}{\text{Hz}} \quad (12)$$

Für die Steigung der Fehler Gerade gilt:

$$a_{Fehler} = \left| \frac{0,805 - 2,04}{294} \frac{\text{V}}{\text{THz}} \right| = 4,20 \cdot 10^{-15} \frac{\text{V}}{\text{Hz}} \quad (13)$$

Dabei wurde die negative

$$\Rightarrow a_{Trend} = (4,07 \pm 0,13) \cdot 10^{-15} \frac{\text{Js}}{\text{C}}$$

$$\Rightarrow \underline{\underline{h = (6,52 \pm 0,21) \cdot 10^{-34} \text{Js}}}$$

Daraus folgt mit einem Literaturwert von $h_{Lit} = 6,62607015 \cdot 10^{-34}\text{Js}$ und Gleichung 8, eine Abweichung von $0,5\sigma$.

4. Zusammenfassung und Diskussion

Verschiedene Frequenzen können unterschiedlich gut Elektronen aus der Kathode auslösen. Anhand dieses Zusammenhangs lässt sich die Plackkonstante bestimmen. In unserem Versuch haben wir für die Frequenzen des Hg-Spektrums den Fotostrom gemessen. Daraus entstanden 5 Messreihen aus welchen die Sperrspannungen U_s ausgelesen wurden. Daraus konnte der Zusammenhang zur Frequenz hergestellt werden und die Plackkonstante bestimmt werden. Dieser Zusammenhang ist genau $\frac{h}{e}$.

Die bestimmte Planckkonstante ist $h = (6,52 \pm 0,21) \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ was im Vergleich zu dem Literaturwert von $h_{Lit} = 6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ einer Abweichung von $0,5\sigma$ entspricht. Unsere Messung kann als genau angenommen werden, da sie sich im 1σ Bereich befindet und der ausreichen klein ist (3,2 %). Dieses Ergebnis ist dennoch kritisch zu betrachten, da durch das händische Einzeichnen der Trendgeraden große Fehler entstehen können. Ebenfalls spielen Fehlerquellen wie die Sauberkeit der Prismen, die Genauigkeit des eingestellten Intensitätsmaximum oder die Genauigkeit der Gegenspannung eine Rolle. Diese wurden mit Blick auf die Abweichung ausreichen berücksichtigt.

Die Versuchsdurchführung lässt Raum für Verbesserungen. Die größte Fehlerquelle ist das händische Einzeichnen. Dort würde es das Ergebnis verbessern, wenn man kleinschrittigere Messungen durchführt oder die Trendgeraden mittels eines Computerprogramms ermitteln lässt. Ebenfalls könnten Lampen verwendet werden, welche mehr isolierte Spektrallinien produzieren wodurch mehr Messreihen für Frequenzen entstehen.