

Versuch 35: Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums über den Fotoeffekt bei einer Fotozelle

Yago Obispo Gerster

1. März 2024

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Motivation	1
1.1 Physikalische Grundlagen	2
1.1.1 Fotoeffekt am Experiment der Vakummfotozelle	2
1.1.2 Eigenschaften von Metallen	2
1.1.3 Licht ist quantisiert	3
1.1.4 Bestimmung des Plankschen Wirkungsquantums	4
1.2 Ziel	4
2 Messprotokoll	5
2.1 Durchführung	5
3 Auswertung	10
3.1 Fehlerabschätzung	10
3.2 Bestimmung der Sperrspannung	10
3.3 Ermittlung des Plankschen Wirkungsquantums	20
4 Zusammenfassung und Diskussion	22

1 Einleitung und Motivation

Die Freisetzung von Elektronen aus einer blanken Metalloberfläche wurde als erstes von Alexandre Edmond Becquerel im Jahr 1839 entdeckt. 1886 bewies Heinrich Hertz experimentell die Auswirkung von ultravioletter Strahlung auf Metalle. Erst 1905 gelang es Albert Einstein, diese Entdeckungen theoretisch zu deuten, wofür er später auch den Nobelpreis bekam.

Im heutigen Versuch wollen wir eines der berühmtesten Experimente zum äusseren Fotoeffekt, der Versuch der *Fotozelle mit Gegenspannungsmethode*, durchführen.

1.1 Physikalische Grundlagen

1.1.1 Fotoeffekt am Experiment der Vakummfotozelle

Wenn man ein Metall mit Licht unterschiedlicher Frequenzen bestrahlt, lösen sich in einigen Fällen Elektronen vom Metall. Dieses Phänomen bezeichnet man als den äusseren fotoelektrischen Effekt.

Um diesen praktisch zu demonstrieren nutzt man eine Vakuumfotozelle, die aus einer Kathode (Metallplatte die mit dem Licht bestrahlt werden soll) und einer Ringanode in Form eines dünnen Drahtrings, besteht (Abbildung 1). Letztere befindet sich in einigen Millimetern Abstand von der Kathode.

Zwischen Anode und Kathode kann eine Spannung U angelegt werden. Wenn

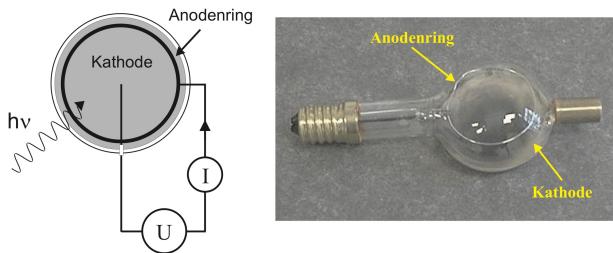


Abbildung 1: Aufbau Fotozelle

die Ringanode auf positivem Potential eingestellt ist so werden die aus Licht gelösten Elektronen aus der Kathode in Richtung des Ringes angezogen. Schliesst man ein Amperemeter an, welches die Ringanode und die Kathode elektrisch miteinander verbindet, so kann man in diesem Fall einen *Fotostrom* messen. Befindet sich die Anode jedoch auf negativem Potential, so wird der Strom kleiner, ein Gegenfeld baut sich auf, welches abstossend auf die Elektronen wirkt. So mit erreichen nur die energiereichsten Elektronen die Anode. Ab einer gewissen *Sperrspannung* kann kein Fotostrom mehr gemessen werden. Hier werden selbst die schnellsten Elektronen vom Gegenfeld abgebremst.

1.1.2 Eigenschaften von Metallen

Um den Fotoeffekt genauer zu verstehen, müssen die Eigenschaften von Metallen untersucht werden.

Bei der Bildung eines Metalls entsteht ein Gitter aus positiven Atomrümpfen und delokalisierten Elektronen, welche als *Leitungselektronen* bezeichnet werden. Diese können sich zwar frei im Metall bewegen, sind jedoch an das Metallgitter gebunden sodass sie dieses im Normalfall nicht verlassen.

Die *Fermiverteilung* beschreibt die Energie der Leitungselektronen bei einer gegebenen Temperatur. Bei einer Temperatur von $T = 0K$ sind alle Energiezustände zwischen 0 und einer Maximalenergie, die sogenannte *Fermienergie* E_F belegt. Diese Verteilung besitzt somit unter dieser Temperatur eine scharfe *Fermikante*. Diese wird bei höheren Temperaturen destabilisiert, sodass hier

auch einige Elektronen etwas höhere Energiezustände annehmen können (siehe Abbildung 2). Trifft ein Lichtphoton mit einer Energie $E = h\nu$, wobei h

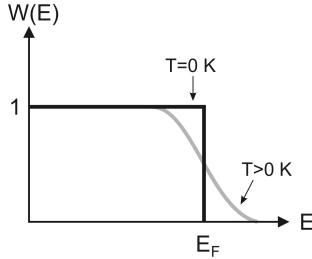


Abbildung 2: Fermiverteilung für unterschiedliche Temperaturen

das Plancksche Wirkungsquantum ist und ν die Frequenz des Lichtes auf ein Leitungselektron der Energie E_e , so kann dieses nur gelöst werden, wenn die Photonenergie grösser als der Unterschied zur Fermienergie $E_F - E_e$ und der sogenannten *Austrittsarbeit* A zusammen ist. Die Austrittsarbeit ist eine Materialeigenschaft die festlegt, wie viel Energie man benötigt um Elektronen mit der Fermienergie vom Metall zu lösen. Falls die Photonenergie grösser als Austrittsarbeit und der Unterschied zur Fermienergie ist, dann wird die restliche Energie in kinetische Energie E_{kin} umgewandelt. Für das Herauslösen von Elektronen muss also gelten (bei $T = 0K$):

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

Die maximale kinetische Energie wird nach dieser Gleichung erreicht, wenn der Unterschied zur Fermienergie verschwindet:

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

1.1.3 Licht ist quantisiert

Um den Fotoeffekt deuten zu können, kann nicht das klassische Wellenmodell herangezogen werden. Stattdessen muss man sich Licht bei diesem Versuch als Photonen vorstellen. Jedes dieser Photonen besitzt eine feste Energie, die nach der Formel

$$E = h\nu \quad (3)$$

nur von der Frequenz ν des Lichtes abhängig ist. Wenn diese auf die Kathode treffen, übertragen sie ihre Energie auf die Leitungselektronen die bei Erfüllung von Gleichung (1), d.h. für einige Energien, gelöst werden.

Reicht die Frequenz des Lichtes nicht aus, um die Austrittsarbeit zu überwinden so werden keine Elektronen gelöst und kein Fotostrom ist bei der Vakuumfototzelle messbar. Nach dem Wellenmodell würde man erwarten, dass bei einer Änderung der Amplitude, d.h. der Intensität auch der Fotostrom sich ändern

sollte. Ist die Frequenz jedoch zu klein, so kann experimentell gezeigt werden, dass die Intensität keine Rolle spielt - kein Strom wird gemessen.

Reicht die Frequenz des Lichtes aus um die Austrittsarbeit zu überwinden, so wird der Fotostrom bei Erhöhung der Intensität grösser.

Wir können also festhalten, dass die Frequenz des Lichtes entscheidend dafür ist, ob überhaupt ein Fotostrom gemessen werden kann und die Intensität für die Anzahl an herausgelösten Elektronen.

Das Wellenmodell muss also durch ein Teilchenmodell komplementiert werden. Die Kernaussage des Versuchs ist, dass Licht quantisiert ist, also aus diskreten Energiepaketen, den Photonen besteht.

1.1.4 Bestimmung des Plankschen Wirkungsquantums

Um die Sperrspannung U_s zu bestimmen, bei der mit der Gegenfeldmethode der Fotostrom verschwindet, muss der funktionale Verlauf des Stromes in Abhängigkeit von der Spannung um U_s für $T > 0K$ bekannt sein. Dieser ist von der Geometrie der Fotozelle abhängig. Bei unserer Geometrie kann nach der Praktikumsanleitung angenommen werden, dass in etwa $I \propto U^2$ gilt. Um das Planksche Wirkungsquantum zu bestimmen muss also in einem Diagramm \sqrt{I} in Abhängigkeit von der Spannung U aufgetragen und eine Gerade zum Schnittpunkt $I = 0A$ (Sperrspannung) gezeichnet werden.

Da für die Sperrspannung $E_{pot} = e \cdot U_s = E_{kin}$ erfüllt ist (Gegenfeldenergie reicht um Elektronen abzubremsen), wobei e die Elementarladung ist, gilt:

$$e \cdot U_s = h\nu - A \propto \sqrt{I} \quad (4)$$

$$\Leftrightarrow U_s = \frac{h}{e}\nu - \frac{A}{e} \quad (5)$$

Zeichnet man anschliessend in einem Diagramm den linearen Zusammenhang zwischen der Sperrspannung und der Frequenz auf, so entspricht die Steigung multipliziert mit der Elementarladung genau dem Plankschen Wirkungsquantum.

1.2 Ziel

Ziel dieses Versuches ist die Bestimmung der Grenzenergie von Elektronen die aufgrund des Fotoeffekts emittiert wurden. Dafür werden wir ein Metall mit unterschiedlichem Licht (fünf unterschiedlicher Wellenlängen des Hg-Spektrums) bestrahlen. Die Gegenfeldmethode soll verwendet werden um die Energie der Elektronen zu bestimmen. Daraus wird das Plancksche Wirkungsquantum h bestimmt.

2 Messprotokoll

2.1 Durchführung

In diesem Versuch verwenden wir das Licht einer Hg-Lampe, da dieses sehr energiereiche Spektrallinien (auch im UV-Bereich) besitzt und diese wie in den Grundlagen diskutiert, notwendig sind um einen Fotostrom messen zu können. Mit einem Aufbau aus zwei Prismenspektrometern wird das Quecksilberlicht in seine einzelnen Wellenlängen zerlegt. Mit einem verstellbaren Spiegel können wir einzelne Strahlen auf das Fernrohr richten, in welchem die Fotozelle eingebaut ist. An dem Fernrohr befindet sich oben ein weisses Papier, welches auch im UV-Bereich fluoresziert, sodass an diesem die Spektrallinien erkannt werden können. Seitlich am Fernrohr befindet sich ein Hebel, welcher innerhalb des Fernrohres einen Spiegel schwenkt. Mit diesem kann man entweder einstellen, dass das Licht auf die Fotozelle trifft oder das man am weissen Papier die Spektrallinien erkennen kann.

Insgesamt sind wir an fünf starken Spektrallinien interessiert: gelb, grün, blau, violett und ultraviolet. Für jede dieser Wellenlängen wird jeweils eine Messreihe durchgeführt.

Da die Fotoströme sehr klein sind, wird ein Strom-Spannungswandler verwendet. Dabei fliesst der Fotostrom durch einen $1G\Omega$ -Widerstand und nach dem Ohmschen Gesetz fällt an diesem eine Spannung ab die proportional zum Fotostrom ist. Diese Spannung wird um den Faktor 11 verstärkt. Der Fotostrom I_F wird also über eine Spannungsmessung U_I bestimmt.

Für die UV-Linie wird eine Vorspannung von $0V$ eingestellt und in Schritten von $0,1V$ hin zu negativen Vorspannungen geändert. Als für U_I ein Wert im Bereich $20-50mV$ gemessen wurde, wurde die Messreihe abgebrochen. Neben dem Fotostrom fliesst jedoch auch ein Untergrundstrom U_{I0} , welcher in der Auswertung vom gemessenen Strom abgezogen werden muss um den echten Fotostrom zu erhalten. Um diesen zu messen wird eine hohe Sperrspannung eingestellt, von etwa $-4V$ sodass man sicher sein kann, dass kein Fotostrom mehr fliesst.

Diese Messung wird analog für die anderen 4 Spektrallinien wiederholt, wobei die Vorspannung hier nicht wie bei UV bei $0V$ beginnt, sondern bei $0,3V$.

19.09.2023

9-12 Uhr

Messprotokoll 35 : Fotoeffekt

Yago Obispo Gertter

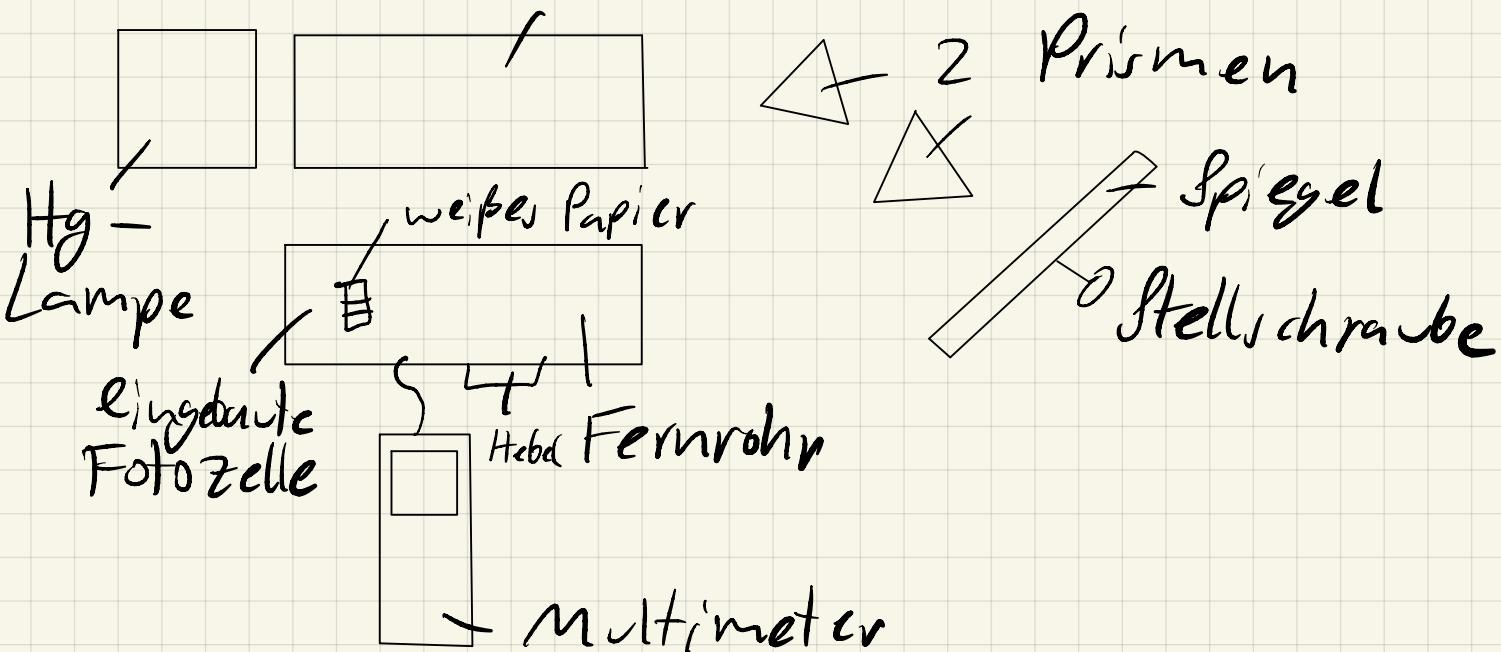
Juan Bueno Fontanilla

Betreuer: Ron
von
Oppen

Versuchsaufbau:

- Prismenspektrometer (bestehend aus 2 Prismen und eingegebauter Vakuumfotozelle)
- Hg-Spektrallampe mit Netzteil
- Piko-Ampermeter mit Netzteil
- Multimeter

Von oben: Kollimator



Skizze 2.1 : Versuchsaufbau

$$U_{IO} = -0,050 \text{ V} \leftarrow DC$$

$$U_{IO} = -0,046 \text{ V} \leftarrow AC + DC$$

$U_6 \text{ [V]}$	$U_I \text{ [V]}$	$\Delta U_I \text{ [V]}$
0,00	5,97	0,22
-0,1	5,44	0,21
-0,2	4,98	0,20
-0,3	4,50	0,19
-0,4	4,04	0,18
-0,5	3,61	0,17
-0,6	3,17	0,16
-0,7	2,75	0,16
-0,8	2,32	0,15
-0,9	1,91	0,14
-1	1,52	0,13
-1,1	1,13	0,12
-1,2	0,82	0,12
-1,3	0,55	0,11
-1,4	0,34	0,11
-1,5	0,18	0,10
-1,6	0,09	0,10
-1,7	0,03	0,10
-1,8	0,001	0,10

$U_6 \text{ [V]}$	$U_I \text{ [V]}$	$\Delta U_I \text{ [V]}$
0,3	6,29	0,06
0,2	5,76	0,06
0,1	5,27	0,06
0	4,80	0,06
-0,1	4,26	0,06
-0,2	3,77	0,06
-0,3	3,32	0,05
-0,4	2,86	0,05
-0,5	2,44	0,05
-0,6	1,98	0,05
-0,7	1,55	0,05
-0,8	1,17	0,05
-0,9	0,84	0,05
-1	0,54	0,05
-1,1	0,31	0,05
-1,2	0,16	0,05
-1,3	0,07	0,05
-1,4	0,02	0,05

Tabelle 2.2: UV

Tabelle 2.3 : Violett

$$U_{IO} = -0,079V \leftarrow DC$$

$U_6 [V]$	$U_I [V]$	ΔU_I
0,3	7,51	0,06
0,2	6,86	0,06
0,1	6,19	0,06
0	5,54	0,06
-0,1	4,88	0,06
-0,2	4,21	0,06
-0,3	3,57	0,05
-0,4	2,97	0,05
-0,5	2,38	0,05
-0,6	1,84	0,05
-0,7	1,34	0,05
-0,8	0,90	0,05
-0,9	0,54	0,05
-1	0,29	0,05
-1,1	0,12	0,05
-1,2	0,03	0,05
-1,3	-0,02	0,05

Tabell e 2.4 : Blau

R. v. Oppe
19.09.23

$$U_{IO} = -0,0472V \leftarrow DC$$

$U_6 [V]$	$U_I [V]$	$\Delta U_I [V]$
0,3	4,93	0,06
0,2	4,20	0,06
0,1	3,52	0,05
0	2,76	0,05
-0,1	2,07	0,05
-0,2	1,47	0,05
-0,3	0,97	0,05
-0,4	0,52	0,05
-0,5	0,24	0,05
-0,6	0,08	0,05
-0,7	0,01	0,05

Tabell e 2.5 : Grün

$$U_{IO} = -0,030V \leftarrow DC$$

$U_6 [V]$	$U_I [V]$	$\Delta U_I [V]$
0,3	2,87	0,05
0,2	2,30	0,05
0,1	1,78	0,05
0	1,28	0,05
-0,1	0,87	0,05
-0,2	0,49	0,05
-0,3	0,24	0,05
-0,4	0,11	0,05
-0,5	0,05	0,05
-0,6	0,02	0,05

Tabell e 2.6 : Gelb

Fehler

- Ablesefehler (Schwankung) am Multimeter : $\frac{\Delta U_{IA}}{U_{IA}} = 0,4\%$

- Fehler des Multimeters:
AC+DC - Messung: (erste Messstabelle)

$$\Delta U_I = \sqrt{(U_I \cdot 0,002 + 70 \text{ Digit})^2 + (0,004 \cdot U_I)^2}$$

- DC - Messung: (restliche Messstabelle)

$$\Delta U_I = \sqrt{(0,0008 \cdot U_I + 5 \text{ Digit})^2 + (0,004 \cdot U_I)^2}$$

3 Auswertung

3.1 Fehlerabschätzung

Bevor ich mit der Beschreibung und Auswertung des Versuchs beginne, möchte ich auf die berücksichtigten Fehler beim Experiment eingehen.

Für die Messung des Fotostroms bei der Vakuumfotozelle wurde ein Multimeter verwendet. Dieses weist sowohl einen Ablesefehler von uns auf, als auch einen eigenen Fehler, der vom Hersteller angegeben wurde.

Für den Ablesefehler verwenden wir einen relativen Fehler von $\frac{\Delta U_{IAblese}}{U_{IAblese}} = 0,4\%$. Dieser kommt daher, dass das Multimeter keinen konstanten Wert angezeigt hat, sondern schwankte. Dabei waren bei grösseren Messwerten diese Schwankungen grösser, weshalb wir uns für einen relativen Fehler entschieden haben. Diesen haben wir anhand der Schwankungen bei grossen, mittleren und kleinen Messwerten ermittelt, und 0,4% stellte sich dabei als realistisch heraus. Für den Fehler des Multimeters wurde die Anleitung des Gerätes verwendet. Die erste Messung haben wir im AC-DC-Modus des Multimeters durchgeführt. Hierfür beträgt der Fehler der gemessenen Spannung U_I : $\Delta U_{IGert} = U_I \cdot 0,02 + 10 \text{ Digits}$. Für den Gesamtfehler im AC-DC-Modus gilt also nach quadratischer Addition:

$$\Delta U_I = \sqrt{(U_I \cdot 0,02 + 10 \text{ Digits})^2 + (0,004 \cdot U_I)^2} \quad (6)$$

Für den geräteeigenen Fehler im DC-Modus in welchem alle restlichen Messungen aufgenommen wurden, gilt: $\Delta U_{IGert} = 0,0008 \cdot U_I + 5 \text{ Digits}$. Insgesamt:

$$\Delta U_I = \sqrt{(0,0008 \cdot U_I + 5 \text{ Digits})^2 + (0,004 \cdot U_I)^2} \quad (7)$$

Diese Fehler wurden beim Versuch direkt berechnet und befinden sich in einer Extraspalte in allen Messtabellen (Tabellen 2.2-2.5 des Messprotokolls).

3.2 Bestimmung der Sperrspannung

Um die Sperrspannung U_S zu bestimmen wird wie folgt vorgegangen: Da nach unserer Geometrie der Zusammenhang $I \propto U^2$ gilt tragen wir die Wurzel der korrigierten Fotospannung $\sqrt{U_I - U_{I0}}$ gegen die eingestellte Spannung U_g in einem Diagramm auf und der lineare Anteil wird zum Schnittpunkt mit der x-Achse extrapoliert.

Um den Fehler von $\sqrt{U_I - U_{I0}}$ zu bestimmen wird das Gaußsche Fehlerfort-

pflanzungsgesetz verwendet:

$$\Delta(U_I - U_{I0})^2 = \left(\frac{\partial(U_I - U_{I0})}{\partial U_I} \Delta U_I \right)^2 + \left(\frac{\partial(U_I - U_{I0})}{\partial U_{I0}} \Delta U_{I0} \right)^2 \quad (8)$$

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

$$\Rightarrow \Delta(\sqrt{U_I - U_{I0}}) = \frac{\partial(\sqrt{U_I - U_{I0}})}{\partial(U_I - U_{I0})} \Delta(U_I - U_{I0}) \quad (10)$$

$$= \frac{\sqrt{(\Delta U_I)^2 + (\Delta U_{I0})^2}}{2\sqrt{U_I - U_{I0}}} \quad (11)$$

Mit dieser Formel und den Messwerten aus Tabellen 2.2-2.6 des Messprotokolls wird für jede Messreihe $\sqrt{U_I - U_{I0}}$ und der dazugehörige Fehler berechnet. Alle Einträge befinden sich in den folgenden Tabellen:

U_g (V)	U_I (V)	$U_I - U_{I0}$ (V)	$\sqrt{U_I - U_{I0}}$ (V)	$\Delta(\sqrt{U_I - U_{I0}})$ (V)
0	5,97	6,02	2,45	0,049
-0,1	5,44	5,49	2,34	0,050
-0,2	4,98	5,03	2,24	0,050
-0,3	4,50	4,55	2,13	0,050
-0,4	4,04	4,09	2,02	0,051
-0,5	3,61	3,66	1,91	0,052
-0,6	3,17	3,22	1,79	0,053
-0,7	2,75	2,80	1,67	0,056
-0,8	2,32	2,37	1,54	0,059
-0,9	1,91	1,96	1,40	0,062
-1	1,52	1,57	1,25	0,066
-1,1	1,13	1,18	1,08	0,072
-1,2	0,82	0,87	0,93	0,084
-1,3	0,55	0,60	0,77	0,096
-1,4	0,34	0,39	0,62	0,120
-1,5	0,18	0,23	0,48	0,149
-1,6	0,09	0,14	0,37	0,192
-1,7	0,03	0,08	0,28	0,256

Tabelle 1: Berechnung bei UV-Licht

U_g (V)	U_I (V)	$U_I - U_{I0}$ (V)	$\sqrt{U_I - U_{I0}}$ (V)	$\Delta(\sqrt{U_I - U_{I0}})$ (V)
0,3	6,29	6,34	2,52	0,016
0,2	5,76	5,81	2,41	0,016
0,1	5,27	5,32	2,31	0,017
0	4,80	4,85	2,20	0,018
-0,1	4,26	4,31	2,08	0,019
-0,2	3,77	3,82	1,95	0,020
-0,3	3,32	3,37	1,84	0,019
-0,4	2,86	2,91	1,71	0,021
-0,5	2,44	2,49	1,58	0,022
-0,6	1,98	2,03	1,42	0,025
-0,7	1,55	1,60	1,26	0,028
-0,8	1,17	1,22	1,10	0,032
-0,9	0,84	0,89	0,94	0,037
-1	0,54	0,59	0,77	0,046
-1,1	0,31	0,36	0,60	0,059
-1,2	0,16	0,21	0,46	0,077
-1,3	0,07	0,12	0,35	0,102
-1,4	0,02	0,07	0,26	0,134

Tabelle 2: Berechnung bei violettem Licht

U_g (V)	U_I (V)	$U_I - U_{I0}$ (V)	$\sqrt{U_I - U_{I0}}$ (V)	$\Delta(\sqrt{U_I - U_{I0}})$ (V)
0,3	7,51	7,59	2,75	0,014
0,2	6,86	6,94	2,63	0,015
0,1	6,19	6,27	2,50	0,016
0	5,54	5,62	2,37	0,016
-0,1	4,88	4,96	2,23	0,018
-0,2	4,21	4,29	2,07	0,019
-0,3	3,57	3,65	1,91	0,019
-0,4	2,97	3,05	1,75	0,020
-0,5	2,38	2,46	1,57	0,023
-0,6	1,84	1,92	1,39	0,026
-0,7	1,34	1,42	1,19	0,030
-0,8	0,9	0,98	0,99	0,036
-0,9	0,54	0,62	0,79	0,045
-1	0,29	0,37	0,61	0,058
-1,1	0,12	0,20	0,45	0,079
-1,2	0,03	0,11	0,33	0,107

Tabelle 3: Berechnung bei blauem Licht

Diese Messwerte werden anschliessend grafisch aufgetragen. Um die Sperrspannung zu bestimmen muss $\sqrt{U_I - U_{I0}}$ auf die y-Achse und die angelegte Gegen-

U_g (V)	U_I (V)	$U_I - U_{I0}$ (V)	$\sqrt{U_I - U_{I0}}$ (V)	$\Delta(\sqrt{U_I - U_{I0}})$ (V)
0,3	4,93	4,97	2,23	0,018
0,2	4,2	4,24	2,06	0,019
0,1	3,52	3,56	1,89	0,019
0	2,76	2,80	1,67	0,021
-0,1	2,07	2,11	1,45	0,024
-0,2	1,47	1,51	1,23	0,029
-0,3	0,97	1,01	1,01	0,035
-0,4	0,52	0,56	0,75	0,047
-0,5	0,24	0,28	0,53	0,067
-0,6	0,08	0,12	0,35	0,102
-0,7	0,01	0,05	0,23	0,157

Tabelle 4: Berechnung bei grünem Licht

U_g (V)	U_I (V)	$U_I - U_{I0}$ (V)	$\sqrt{U_I - U_{I0}}$ (V)	$\Delta(\sqrt{U_I - U_{I0}})$ (V)
0,3	2,87	2,90	1,70	0,021
0,2	2,3	2,33	1,53	0,023
0,1	1,78	1,81	1,35	0,026
0	1,28	1,31	1,14	0,031
-0,1	0,81	0,84	0,92	0,039
-0,2	0,49	0,52	0,72	0,049
-0,3	0,24	0,27	0,52	0,068
-0,4	0,11	0,14	0,37	0,094
-0,5	0,05	0,08	0,28	0,125
-0,6	0,02	0,05	0,22	0,158

Tabelle 5: Berechnung bei gelbem Licht

spannung U_G auf die x-Achse. Eine Ausgleichsgerade wird gezeichnet, die jedoch nicht den Abstand aller Punkte projiziert auf diese Gerade minimiert, sondern nur der mittleren Punkte, welche dem linearen Anteil entsprechen. Die Messwerte bei sehr kleinen oder sehr grossen Gegenspannungen weichen etwas von den restlichen ab. Der Schnittpunkt dieser Ausgleichsgeraden mit der x-Achse entspricht genau der Sperrspannung, da in diesem Fall

$$\sqrt{U_I - U_{I0}} = 0 \quad (12)$$

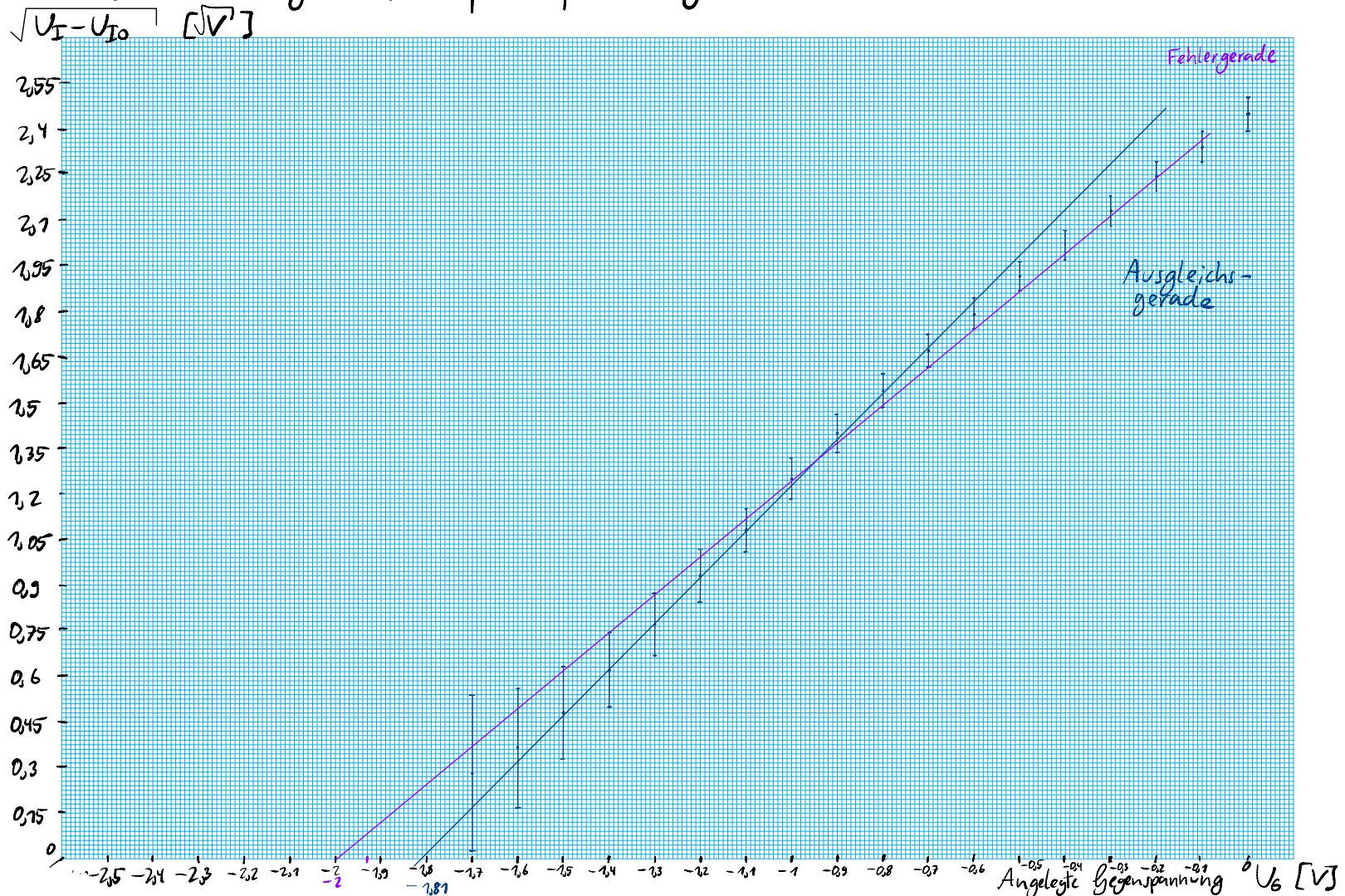
$$\Leftrightarrow U_I = U_{I0} \quad (13)$$

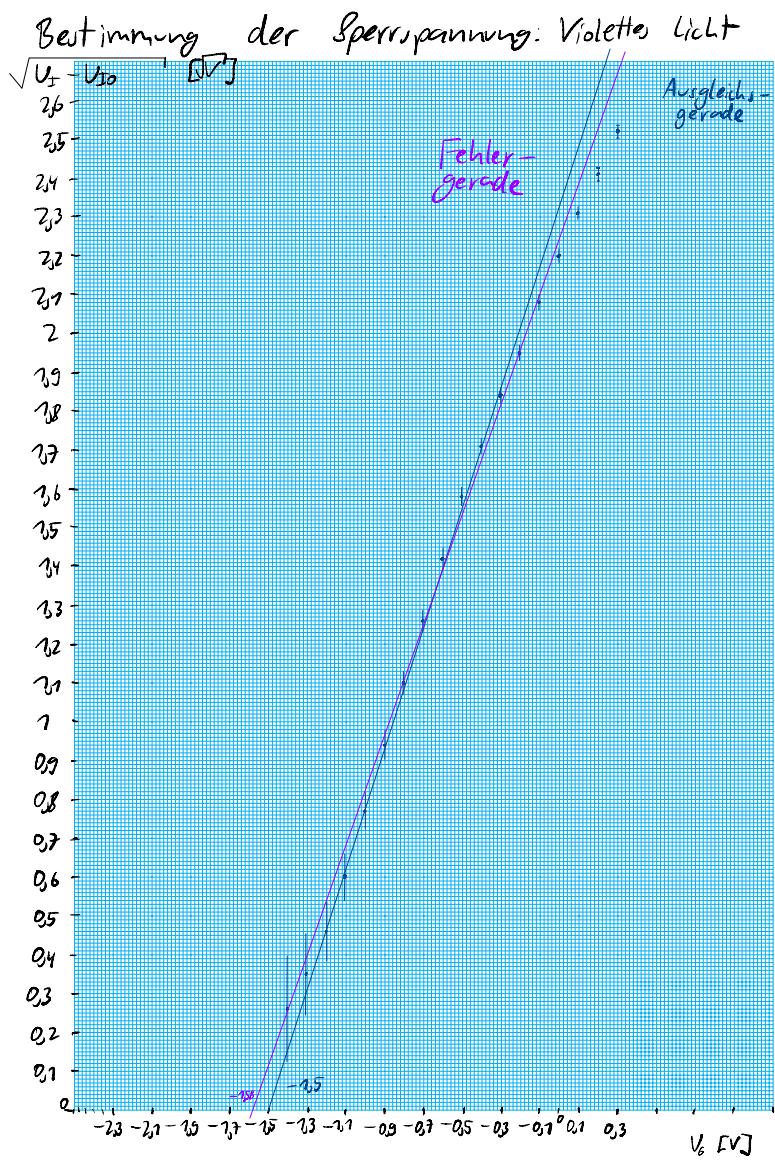
d.h. die gemessene Spannung nur der Untergrundspannung entspricht und somit kein Fotostrom mehr gemessen werden kann.

Weiterhin wird in jedes der Diagramme eine Fehlergerade eingezeichnet, mit dessen Schnittpunkt der Fehler abgeschätzt werden kann. Dabei wird berücksichtigen die Fehlergeraden wieder nur den linearen Teil. Beim Zeichnen wurde geprüft, welche Messwerte in etwa zum linearen Teil gehören und über die Min./

Max.-Abschätzungs methode wurde die grösste Abweichung der Ausgleichsgeraden in diesem Intervall bestimmt.

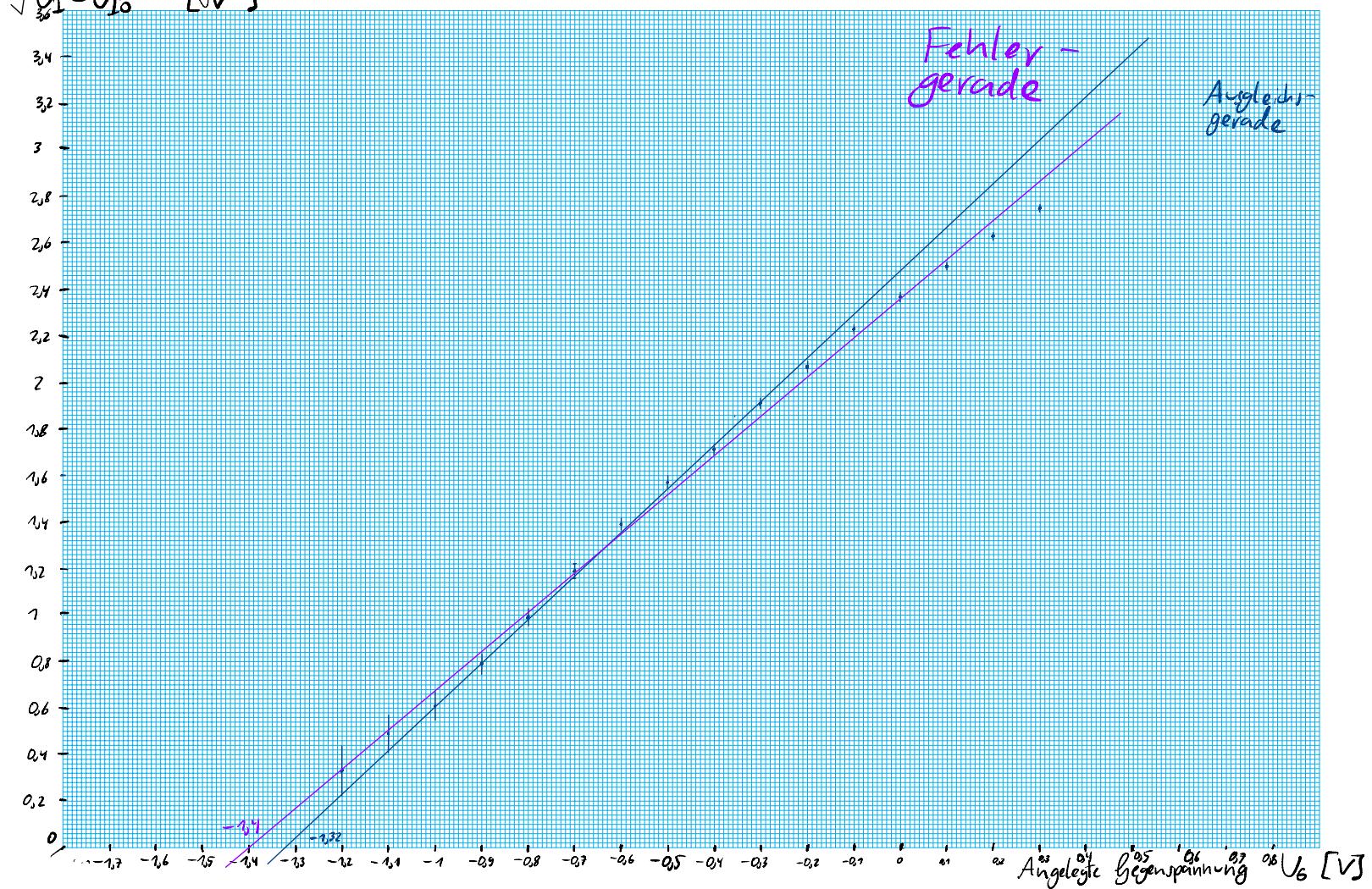
Bestimmung der Sperrspannung: Ultraviolettes - Licht



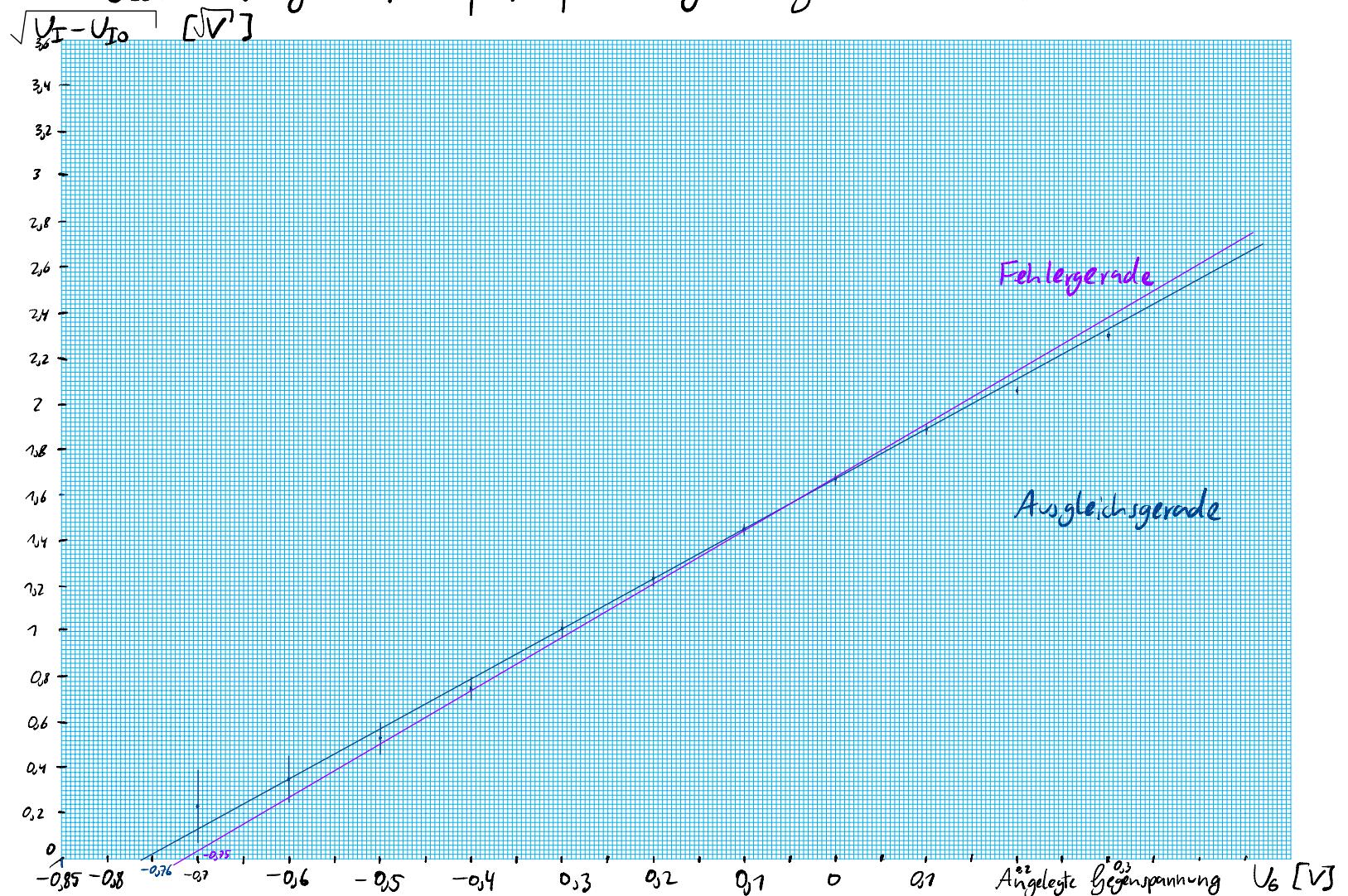


Bestimmung der Sperrspannung: Blaues - Licht

$$\sqrt{U_I - U_{I0}} \quad [\sqrt{V}]$$



Bestimmung der Sperrspannung: grunes - Licht

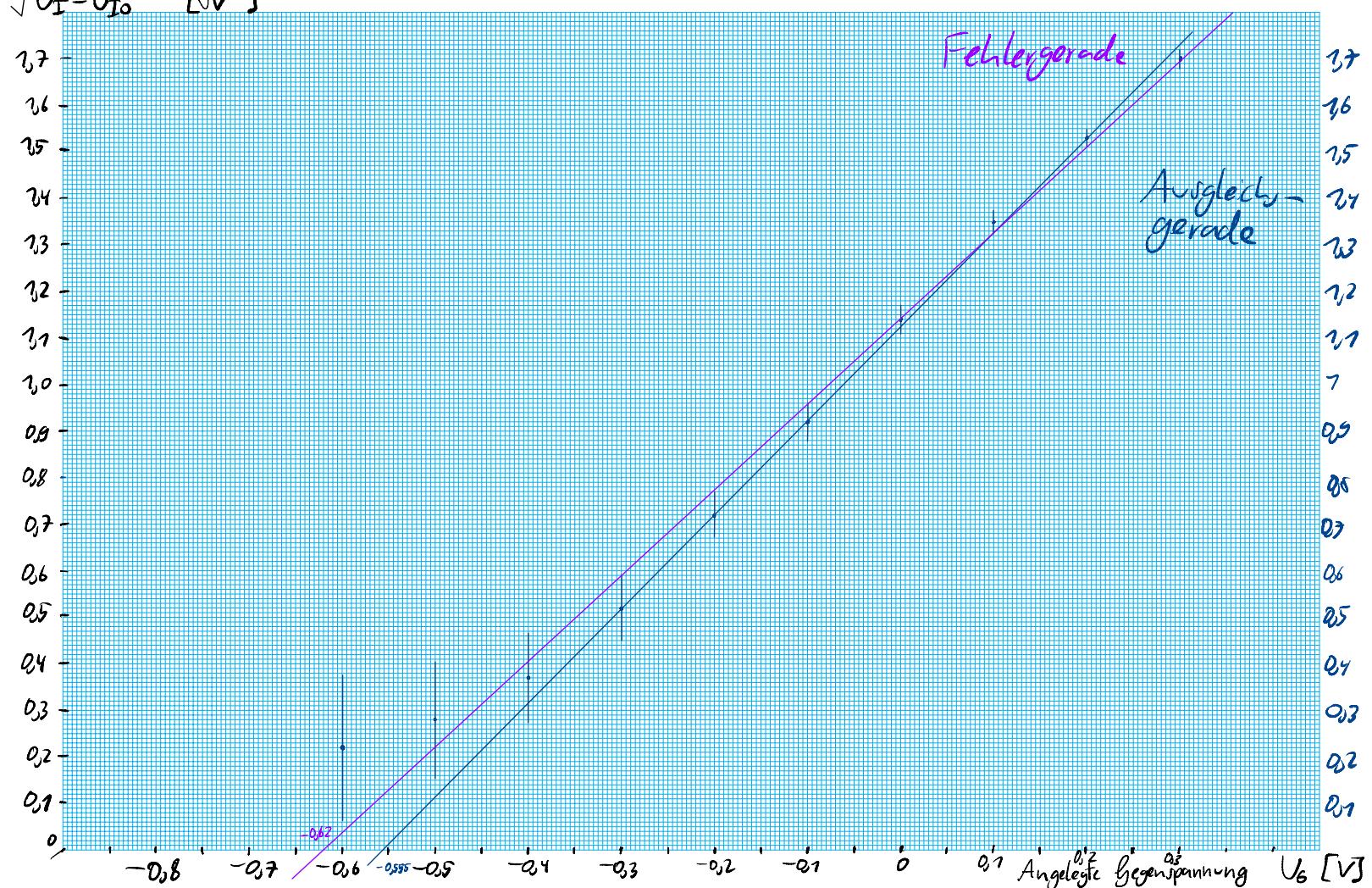


Bestimmung der Sperrspannung: Gelber - Licht

$\sqrt{U_I - U_{I0}}$ [V]

Fehlergerade

Ausgleichsgerade



Für die Sperrspannungen gilt entsprechend:

Farbe	Frequenz [THz]	Sperrspannung U_S [V]	ΔU_S [V]
UV-Licht	821,3	-1,81	0,19
Violett	740,2	-1,5	0,08
Blau	687,9	-1,32	0,08
Grün	549,0	-0,76	0,01
Gelb	518,7	-0,56	0,06

Tabelle 6: Sperrspannungen mit ihrem Fehler

3.3 Ermittlung des Plankschen Wirkungsquantums

Anschliessend soll mit den gemessenen Werten das Planksche Wirkungsquantum h bestimmt werden.

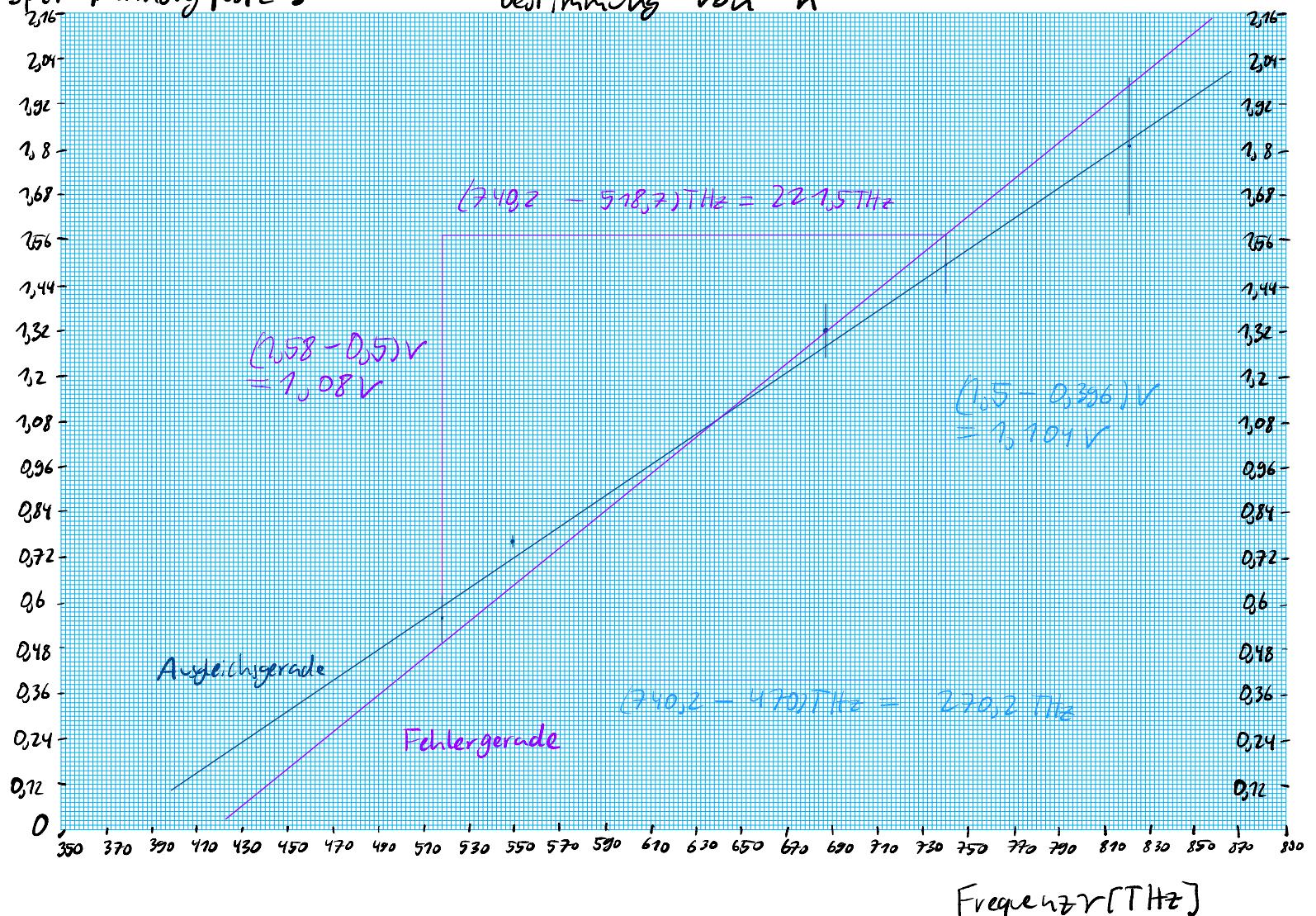
Wir haben die Sperrspannung U_S so definiert, dass selbst die schnellsten Elektronen, mit maximaler kinetischer Energie, von dem Gegenfeld abgebremst werden und somit kein Fotostrom mehr gemessen werden kann. Deshalb muss die Feldenergie durch die erzeugende Sperrspannung genau der maximalen kinetischen Energie entsprechen. In den Grundlagen wurde mit Formel (4) auf

$$U_S = \frac{h}{e} \nu - \frac{A}{e} \quad (14)$$

geschlossen. Wenn wir also die Sperrspannungen aus Tabelle 6 in Abhängigkeit der Frequenz auftragen, so können wir über die Steigung das Planksche Wirkungsquantum durch die Elementarladung bestimmen. Weiterhin wird eine Fehlergerade eingezeichnet. Die Differenz der Steigung der Fehlergeraden und der Ausgleichsgeraden entspricht dem Fehler.

Sperrspannung $|U_s| [V]$

Bestimmung von h



Für die Steigungen m wurde folgendes abgelesen und berechnet:

$$m_{\text{Ausgleichsgerade}} = \frac{1,104V}{270,2\text{THz}} = 4,1 \cdot 10^{-15} \frac{V}{\text{Hz}} \quad (15)$$

$$m_{\text{Fehlergerade}} = \frac{1,08V}{221,5\text{THz}} = 4,9 \cdot 10^{-15} \frac{V}{\text{Hz}} \quad (16)$$

Das heisst für die Steigung gibt es einen absoluten Fehler von $0,8 \cdot 10^{-15} \frac{V}{\text{Hz}}$. Es gilt:

$$h = m_{\text{Ausgleichsgerade}} \cdot e = 6,57 \cdot 10^{-34} \frac{VC}{\text{Hz}} \quad (17)$$

Für die Elementarladung wurde der Wert $e = 1,602176634 \cdot 10^{-19} C$ verwendet (Quelle: CODATA).

Für die Berechnung des Fehlers wird der Fehler des Elementarladungsliteraturwert ignoriert da dieser vernachlässigbar klein gegenüber dem Steigungsfehler ist. Es gilt:

$$\Delta h = e \cdot \Delta m_{\text{Ausgleichsgerade}} = 1,28 \cdot 10^{-34} \frac{VC}{\text{Hz}} \quad (18)$$

Insgesamt haben wir das Planksche Wirkungsquantum zu

$$h = (6,6 \pm 1,3) \cdot 10^{-34} Js \quad (19)$$

bestimmt.

4 Zusammenfassung und Diskussion

Zusammenfassend haben wir das Planksche Wirkungsquantum experimentell bestimmt. Dazu haben wir den Fotostrom einer Vakuumfotozelle über eine Spannungsmessung in Abhängigkeit von der eingestellten Gegenspannung für unterschiedliche Wellenlängen gemessen. Die Gegenspannung baute ein Gegenfeld auf, welches die Elektronen in der Fotozelle abbremste und somit den gemessenen Fotostrom verringerte. Beim Aufbau messte man durch eine Spannungsmessung jedoch nicht nur die Spannung die zum Fotostrom der Elektronen die durch das Licht emittiert wurden gehörte, sondern auch einen Untergrundstrom. Deshalb wurde dieser Untergrundstrom bei einer hohen Gegenspannung gemessen und in der Auswertung von gemessenen Spannungswert abgezogen um den wahren Fotostrom zu erhalten. Da bei unserer Geometrie der Zusammenhang $I \propto U^2$ galt, haben wir die Wurzel der korrigierten Fotospannung in Abhängigkeit von der Gegenspannung grafisch aufgetragen. Der Schnittpunkt mit der x-Achse lieferte die Sperrspannung. Dies wurde für jede Frequenz wiederholt.

Zuletzt wurde ein Diagramm angefertigt welches die Sperrspannungen in Abhängigkeit von der Frequenz darstellte. Nach einer Energiebilanzüberlegung entsprach die Steigung multipliziert mit der Elementarladung genau dem Plankschen Wirkungsquantum. Dieses wurde zu $h = (6,6 \pm 1,3) \cdot 10^{-34} Js$ bestimmt.

Das Planksche Wirkungsquantum hat einen Literaturwert von $h = 6.62607015 \cdot 10^{-34} Js$ (Quelle: CODATA). Somit besitzt mein bestimmter Wert eine Abweichung vom Literaturwert von $0,02\sigma$. Jedoch ist anzumerken, dass bei mehr signifikanten Stellen diese Abweichung leicht grösser wäre. Die Abweichung ist relativ gering, da unserer absoluten Fehler von $1,3 \cdot 10^{-34} Js$ relativ hoch ist. Deshalb will ich im Anschluss einige Verbesserungsvorschläge für den Versuch zur Minimierung des Fehlers präsentieren:

An erster Stelle ist zu betonen, dass bei diesem Versuch vor allem grafisch gearbeitet wurde. Dabei wurden 5 Diagramme für die Ermittlung der Sperrspannung erstellt, bei denen die Ausgleichsgerade nur für den linearen Teil eingetragen werden musste. Dabei war es schwierig, diese Ausgleichsgerade per Hand so genau wie möglich zu zeichnen und es war schwierig einzuschätzen welche Messwerte zum linearen Teil dazugezählt werden sollten und welche nicht. Als Vorschlag könnte beispielsweise Python verwendet werden um eine genaue Ausgleichsgerade im linearen Teil zu zeichnen. Ein Computerprogramm könnte auch die nötige Regression genau berechnen und müsste nicht wie ich, per Augenmaß diese Gerade einzeichnen.

Obwohl versucht wurde, den Versuchsraum soweit es geht abzudunkeln, konnten wir nicht garantieren, dass kein Licht anderer Wellenlängen in das Fernrohr eingedrungen ist und somit einen Einfluss auf den Fotostrom hatte. Würde man das Experiment in einem vollkommen isolierten und abgedunkelten Raum durchführen, so könnte der Fehler weiterhin reduziert werden.

Zuletzt muss beachtet werden, dass der Fotostrom über eine Spannung gemessen wurde. Eine direkte Strommessung mit einem sehr genauen Strommessgerät hätte unser Ergebnis ebenfalls verbessert.

Insgesamt fand ich den Versuch jedoch sehr lehrreich. Ein gutes Verständnis über diesen Versuch ist die Grundlage für das spätere Verständnis der Quantenmechanik. Denn der Versuch mit der Fotozelle und die Deutung durch Einstein hat nicht nur den quantisierten Charakter von Licht unter Beweis gestellt, sondern auch die Tür zur Quantenmechanik eröffnet. Aus diesem Grund wurde an Einstein vermutlich auch der Nobelpreis für die Deutung verliehen.