PAP1
Versuch 35: "Fotoeffekt"

Jonas Schweer

September 5, 2024

1 Einleitung

1.1 Was soll gemessen werden?

In diesem Versuch bestimmen wir für fünf ausgeprägte Spektrallinien der Quecksilberdampflampe die maximale kinetische Energie der herausgelösten Elektronen aus der Fotokathode. Mithilfe der Gegenfeldmethode bestimmen wir diese Grenzenergie für die jeweiligen Wellenlängen und können daraus das plancksche Wirkungsquantum h berechnen.

1.2 Aufbau des Versuches und Messmethode

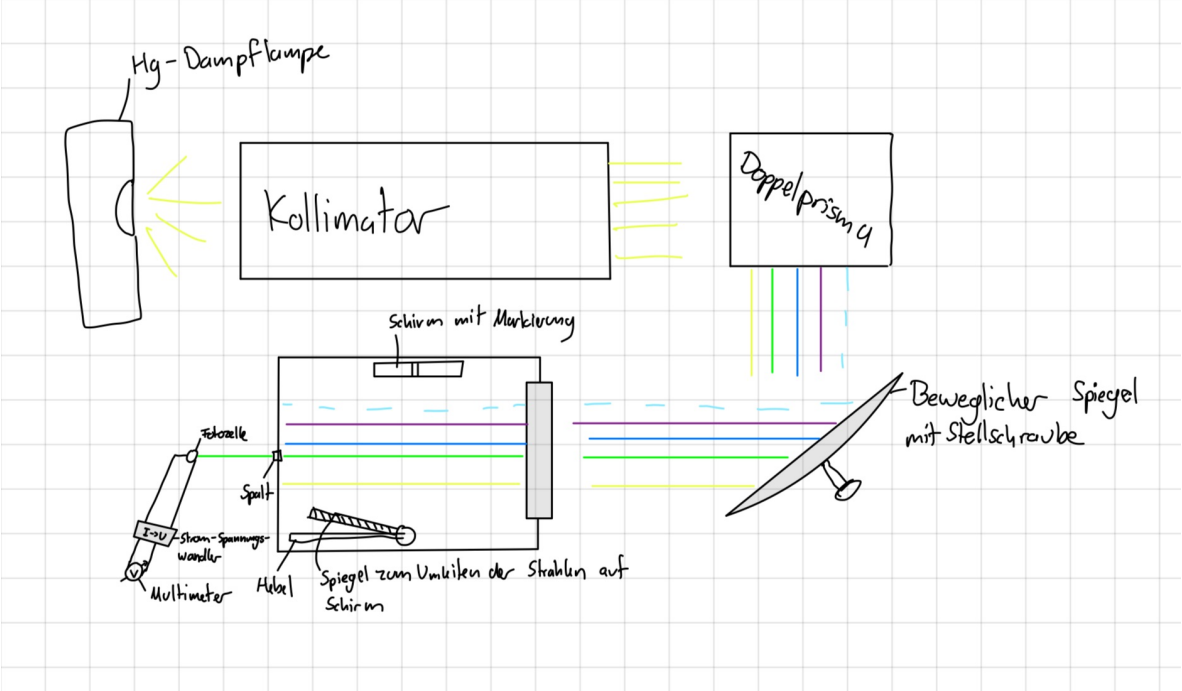


Figure 1: Skizze des Spektrometers

Der Aufbau des Versuches besteht zunächst aus einer Quecksilberdampflampe, welche Licht in einen Kollimator strahlt. Das Licht wird durch elektrische Anregung von Quecksilberdampf emittiert und besteht somit nur aus den charakteristischen Wellenlängen von Hg. Der Kollimator sorgt dafür, dass die Strahlen parallel werden.
Die parallelen Strahlen werden nun in ein Doppelprisma geleitet, in welchem sie durch Dispersion in die einzelnen Spektren aufgeteilt werden. Das so zerlegte Licht wird nun über einen beweglichen Spiegel in einen Kasten geleitet, an dessen Eingang ein Fernrohr befestigt ist. Am Ausgang des Kastens ist ein dünner Spalt eingebaut, welcher das Ziel hat, ungewollte Wellenlängen abzublocken und nur die zu messende durchzulassen.
An der Seite des Kastens befindet sich ein Hebel, dessen Umlegen einen Spiegel innerhalb der Box ausklappt und die ankommenden Spektrallinien auf einen weißen Schirm projiziert. In dieser Position lassen sich durch bewegen des Spiegels außerhalb der Box und einer Markierung auf dem Schirm die erscheinenden Linien so anpassen, dass nur

ein bestimmtes Spektrum den kleinen Spalt am Ende der Box durchdringen kann. Die gewählte Wellenlänge trifft letztendlich auf die Fotozelle, auf der das Licht Elektronen lösen kann.

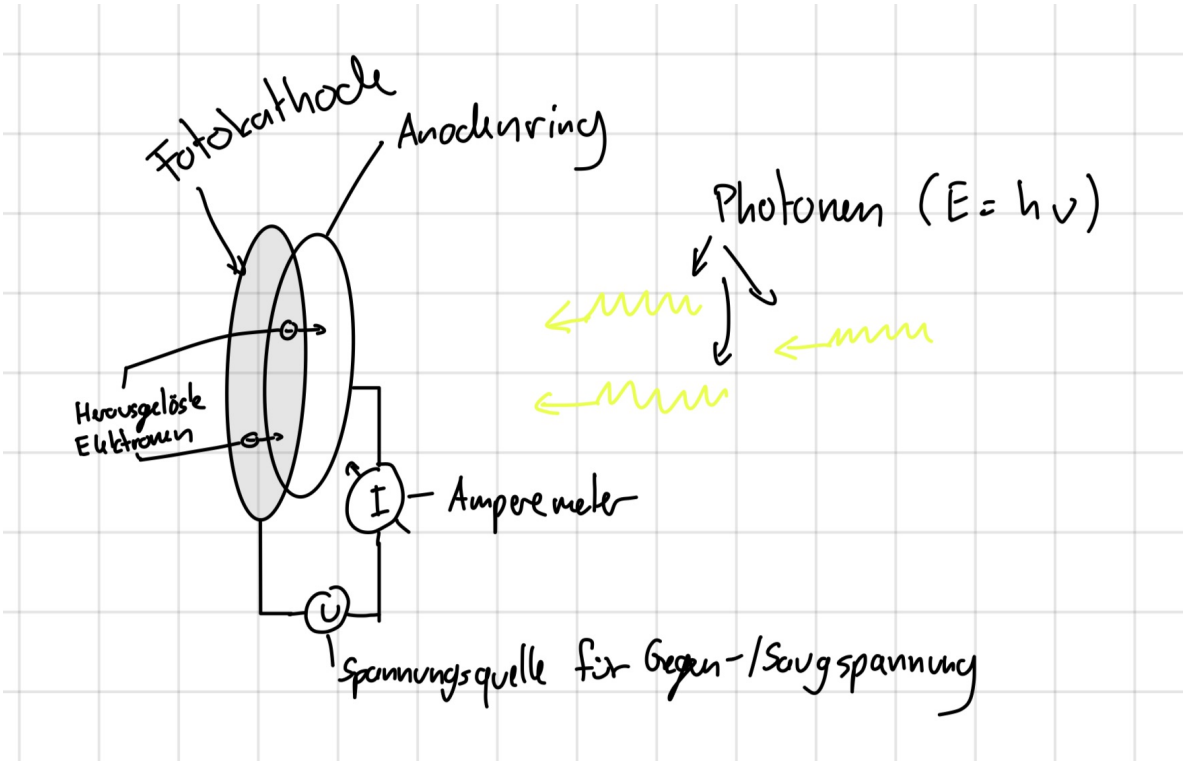


Figure 2: Skizze der Fotokathode

Die Fotozelle selbst besteht aus einem evakuierten Glaskolben, in dessen Inneren eine mit Kalium bedampfte Kathode (der sogenannten Fotokathode) und eine ringförmige Anode aufgebaut sind. Zwischen Anode und Kathode lässt sich eine Spannung U anlegen.
In unserem Versuch wird die Anode auf ein negatives Potential gelegt ($\rightarrow$Gegenspannung) damit nur die Elektronen mit ausreichend Energie zu einem potentiell fließenden Strom beitragen können.
Der Strom wird nun durch ein Stom-Spannungswandler in eine Spannung umgewandelt welche mit einem Multimeter gemessen wird.

1.3 Physikalische Grundlagen

Licht besteht weder aus klassischen Wellen, noch aus klassischen Teilchen. Durch Experimente lässt sich feststellen, dass es je nach Bedingungen sowohl Teilchen- als auch Wellencharakter besitzt. Das nennt man den "Wellen- Teilchen- Dualismus". Deshalb betrachten wir in diesem Versuch Licht als sogenannte Quanten, also Energiepakete, die sowohl Teilchen- als auch Welleneigenschaften aufweisen.
Das Photon besitzt eine Energie, welche Proportional zu seiner Frequenz ν ist. Der Proportionalitätsfaktor ist das (in diesem Versuch gesuchte) plancksche Wirkungsquantum

h. Also lässt sich die Energie eines einzelnen Photons wie folgt berechnen:

$$E_{ph} = h\nu \tag{1}$$

Der Zusammenhang zwischen Frequenz und Wellenlänge ist durch die Konstantheit der Lichtgeschwindigkeit c folgendermaßen gegeben:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \tag{2}$$

Also lässt sich die Energie auch berechnen als:

$$E_{ph} = h\frac{c}{\lambda} \tag{3}$$

Je kleiner also die Wellenlänge, desto größer die Frequenz, desto größer die Energie. Diese Energie ist nun wichtig, wenn wir betrachten was passiert, wenn es mit einem weiteren Teilchen kollidiert. Bei diesem Vorgang übergibt es nämlich seine Energie vollständig an das getroffene Teilchen. Um nun zu verstehen, warum dadurch Elektronen aus Metallen ausgelöst wird, und warum wir in diesem Versuch gerade eine mit Kalium bedampfte Kathode nutzen, muss man sich anschauen, wie Metalle (bzw. Leiter) aufgebaut sind.
Wenn sich das Metall entsteht, baut sich ein so genanntes "Metallgitter" auf. Dabei geben sie einige Valenzelektronen ab und können so mit anderen Metallionen die Gitterstruktur bilden. Die so freigesetzten Elektronen können sich nun in dem positiv geladenen Gitter bewegen, es jedoch noch nicht verlassen. Um das zu können, wird eine bestimmte Menge an zugeführter Energie benötigt.
Wie viel Energie genau, ist sowohl von dem Metall abhängig, welches die Austrittsarbeit A bestimmt, als auch von der Energie, die das Elektron selbst schon besitzt. Bei einer Temperatur von T = 0K weiß man über die Energieverteilung, dass jeder Zustand bis zu einer einer gewissen Energie E_F, der "Fermienergie", mit einer Wahrscheinlichkeit von 100% auftritt. Energiezustände über E_F gibt es bei T = 0K nicht, deswegen wird dieser Punkt auch die "Fermikante" genannt. Die Energie, die ein Elektron mit einer Energie von genau E_F braucht, ist eben genau die Austrittsarbeit A. Die überschüssige Energie wird dem Elektron als kinetische Energie mitgegeben. Also gilt mit Hilfe von Gleichung (1) für die maximale Energie, die ein Elektron bei 0K erreichen kann:

$$E_{kin,max} = h\nu - A \tag{4}$$

Leider ist der Fall für T = 0K nicht realistisch, deswegen müssen wir uns anschauen, was mit der Energieverteilung passiert, wenn die Temperatur steigt. Wenn das passiert, dann wird aus der harten Kante der Wahrscheinlichkeiten bei E_F eher ein steiler Abfall, der aber auch etwas über E_F hinausgeht. Also sind Energiezustände vor der Fermienergie nicht mehr 100% garantiert, nur noch sehr wahrscheinlich. Nun gibt es aber auch Energien oberhalb der Kante, welche mit etwas geringerer Wahrscheinlichkeit auftreten. Um nun die kinetische Energie eines Elektrons mit Energie E_e zu berechnen, muss man zuerst berechnen, um wie viel Energie es von der Fermienergie abweicht und kommt dann mit kleiner Modifikation von Gleichung (4) auf folgendes:

$$E_{kin} = h\nu - A - (E_F - E_e) \tag{5}$$

Man zieht also von der Energie des Photons die Energie Austrittsarbeit A und die Energie, die zugeführt werden muss, um das Elektron auf die Fermienergie zu bekommen $E_F - E_e$, ab und erhält die resultierende kinetische Energie. Je größer der Energiewert der Elektronen oder je kleiner die Austrittsarbeit, desto mehr kinetische Energie bleibt am Ende übrig. Deswegen nutzen wir in dem Experiment auch Kalium, denn dessen Austrittsarbeit ist sehr gering.
Die ausgetretenen Elektronen bewegen sich nun in Richtung der Ringanode und lassen so einen Strom entstehen. Die Stärke des Stromes hängt nur von der Anzahl an ausgelösten Elektronen ab, da alle, die auf den Ring treffen würden (also in die richtige Richtung fliegen) auch ankommen. Wenn wir nun eine negative Gegenspannung anlegen, müssen sie zusätzlich noch ein elektrisches Feld überwinden. Die dafür benötigte Energie lässt sich wie folgt berechnen:

$$E_{Feld} = qU = eU \tag{6}$$

Dabei ist e die Elektronenladung und U_s die angelegte Spannung. Es kommen also nur Elektronen mit $E_{kin} > eU$ bei dem Anodenring an. Im Fall T = 0K kommt es bei einem linearen Anstieg von U zu einem linearen Abfall von dem fließenden Strom I, da alle Energiezustände gleich wahrscheinlich sind. Sobald $qU_s > h\nu - A$ sinkt der Strom auf 0A, da es keine Elektronen mit einer höheren Energie gibt (Siehe (4). U_s ist hierbei die Sperrspannung.
Bei höheren Temperaturen ist allerdings wie beschrieben die Energieverteilung nicht mehr so hart abgeschnitten, weswegen es auch Elektronen mit $E_e > E_F$ gibt, die trotz $U > U_s$ noch die Anode erreichen können. Der Graph von I nähert sich also nur asymptotisch den $0A$. Man kann jedoch durch den vorhergehenden, nahezu linearen Teil U_s extrapolieren, indem man eine Gerade anlegt und bis zu $I = 0$ durchzieht.
Bei einem perfekt linearen verlauf wäre also die Sperrspannung dort zu finden, wo die Energie, die benötigt wird, um das elektrische Feld zu durchqueren, genau der maximalen kinetischen Energie entspricht. Also als Formel ausgedrückt:

$$eU_s = h\nu - A \Leftrightarrow U_s = \frac{1}{e}(h\nu - A) \tag{7}$$

Das bedeutet, dass U_s linear von der Frequenz ν abhängt, und somit die Ableitung eines $U(\nu)$-ν-Diagramms konstant sein muss. Diese konstante ist:

$$\frac{dU_s(\nu)}{d\nu} = \frac{1}{e}\frac{d}{d\nu}(h\nu - A) = \frac{h}{e} \tag{8}$$

Es folgt direkt eine Berechnung von h, nämlich:

$$h = e\frac{dU_s(\nu)}{d\nu} \tag{9}$$

Versuch 35: Fotoeffekt | Protokoll

02.09.24
Jonas Schweer
Harish Mahendran

Messgeräte: Spektrometeraufbau
Quecksilberdampflampe
Multimeter
Spannungsquelle

Fehler des Multimeter nach Hersteller:

Messbereich	Messgenauigkeit
60 mV	± (1,2% des Messwerts + 10 Digit)
600 mV	± (1,2% des Messwerts + 10 Digit)
6 V	± (0,8% des Messwerts + 5 Digit)
60 V	± (0,8% des Messwerts + 5 Digit)

Genauigkeit der Spannungsquelle:

± 0,01 V (Limitierung des Displays

Messung: Wir messen zunächst für 5 Linien des Quecksilberspektrum den entstehenden Fotostrom.

Dies machen wir zuerst ohne angelegte Spannung und erhöhen dann die Gegenspannung in 0,1V schritten.

Wir schreiben so lange Werte auf, bis sie in den 50mV-Bereich fallen. Als Letztes nehmen

wir noch eine Messung des Untergrundstroms $U_{r,0}$ auf, indem wir die Spannungsquelle auf -4V

stellen und messen. Die Messergebnisse werden durch einen Strom-Spannungswandler von extrem kleinen

Stromstärken in Spannungen umgewandelt. Die Umrechnung funktioniert folgendermaßen:

$$1\,V \Leftrightarrow 91\,pA$$

Messungen:

Vorspannung U_v [V]	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	4,0
Abgelesene Spannung bei gelbem Licht (578 nm) [V]	1,985	1,348	0,844	0,423	0,179	0,061	0,019													-0,025
Abgelesene Spannung bei grünem Licht (546 nm) [V]	3,1	2,365	1,738	1,158	0,666	0,314	0,101	0,014												-0,044
Abgelesene Spannung bei blauem Licht (436 nm) [V]	6,33	5,53	4,824	4,111	3,441	2,805	2,212	1,618	1,145	0,733	0,396	0,187	0,061	-0,006						-0,095
Abgelesene Spannung bei violettem Licht (405 nm) [V]	5,78	5,164	4,603	4,052	3,508	3,01	2,495	1,975	1,506	1,083	0,723	0,454	0,242	0,115	0,041					-0,058
Abgelesene Spannung bei UV-Licht (365 nm) [V]	7,52	6,9	6,33	5,77	5,219	4,65	4,093	3,587	3,053	2,53	2,06	1,588	1,183	0,802	0,552	0,301	0,157	0,068	0,022	-0,059

A. Mavrakidis

3 Auswertung

Um das plancksche Wirkungsquantum berechnen zu können, müssen wir zuerst den Zusammenhang der Sperrspannungen mit der Frequenz des Lichtes herausfinden. Dafür müssen wir zuerst von unserem gemessenen Strom den bestimmten Untergrundstrom U_{I0} abziehen, da dieser unser Ergebnis systematisch verfälscht. Demnach rechnen wir statt mit U_I (dem gemessenen Strom, welcher durch den Strom-Spannungswandler proportional zum erzeugten Strom ist) mit:

$$I \propto (U_I - U_{I0}) \tag{10}$$

Wir wissen von unserem Fotozellen-Aufbau, dass der von uns eingestellte Gegenstrom U_V proportional ist zu $\sqrt{I}$. Daraus folgt also die Relation:

$$U_V \propto \sqrt{I} \Rightarrow U_V \propto \sqrt{(U_I - U_{I0})} \tag{11}$$

Um nun also zu wissen, wann der Strom verschwindet und die Sperrspannung erreicht ist, müssen wir ein U_V zu $\sqrt{(U_I - U_{I0})}$ Diagramm erstellen und aus deren linearen Teil graphisch die Sperrspannung herausfinden. Der Fehler von $\sqrt{(U_I - U_{I0})}$ lässt sich mithilfe Gauß'scher Fehlerfortpflanzung berechnen,

$$\Delta\sqrt{(U_I - U_{I0})} = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\Delta U_{I0}^2 + \Delta U_I^2}{U_I - U_{I0}}} \tag{12}$$

Mit all diesen Rechnungen lässt sich die Messtabelle um einige Werte erweitern:

Gelbes Licht (λ = 578nm)

U_V [V]	0	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6
U_I [V]	1,985	1,348	0,844	0,423	0,179	0,061	0,019
$\Delta U_{I\,[V]}$	0,02088	0,01578	0,01175	0,00608	0,00315	0,00173	0,00033
$U_I - U_{I0}$ [V]	2,01	1,373	0,869	0,448	0,204	0,086	0,044
$\sqrt{(U_I - U_{I0})}$ [$\sqrt{V}$]	1,418	1,172	0,932	0,669	0,452	0,293	0,21
$\Delta\sqrt{(U_I - U_{I0})}$ [$\sqrt{V}$]	0,014983301	0,01716	0,02082	0,02801	0,04111	0,06315	0,0882

Figure 3: Messtabelle für gelbes Licht - erweitert

Grünes Licht (λ = 546nm)

U_V [V]	0	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7
U_I [V]	3,1	2,365	1,738	1,158	0,666	0,314	0,101	0,014
$\Delta U_{I\,[V]}$	0,0298	0,02392	0,0189	0,01426	0,01033	0,00477	0,00221	0,00027
$U_I - U_{I0}$ [V]	3,144	2,409	1,782	1,202	0,71	0,358	0,145	0,058
$\sqrt{(U_I - U_{I0})}$ [$\sqrt{V}$]	1,773	1,552	1,335	1,096	0,843	0,598	0,381	0,241
$\Delta\sqrt{(U_I - U_{I0})}$ [$\sqrt{V}$]	0,013396716	0,01419	0,01556	0,01808	0,02279	0,03118	0,04867	0,07682

Figure 4: Messtabelle für grünes Licht - erweitert

Blaues Licht (λ = 436nm)

U_V [V]	0	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-0,8	-0,9	-1	-1,1	-1,2	-1,3
U_I [V]	6,33	5,53	4,824	4,111	3,441	2,805	2,212	1,618	1,145	0,733	0,396	0,187	0,061	-0,006
$\Delta U_{I[V]}$	0,10064	0,04924	0,04359	0,03789	0,03253	0,02744	0,0227	0,01794	0,01416	0,01086	0,00575	0,00324	0,001732	2,8E-05
$U_I - U_{I0}$ [V]	6,425	5,625	4,919	4,206	3,536	2,9	2,307	1,713	1,24	0,828	0,491	0,282	0,156	0,089
$\sqrt{(U_I - U_{I0})}$ [$\sqrt{V}$]	2,535	2,372	2,218	2,051	1,88	1,703	1,519	1,309	1,114	0,91	0,701	0,531	0,395	0,298
$\Delta\sqrt{(U_I - U_{I0})}$ [$\sqrt{V}$]	0,021151123	0,01298	0,01289	0,01291	0,0131	0,01353	0,01429	0,01571	0,01779	0,02119	0,02672	0,03497	0,046890486	0,06201

Figure 5: Messtabelle für blaues Licht - erweitert

Violettes Licht(λ = 405nm)

U_V [V]	0	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-0,8	-0,9	-1	-1,1	-1,2	-1,3	-1,4
U_I [V]	5,78	5,164	4,603	4,052	3,508	3,01	2,495	1,975	1,506	1,083	0,723	0,454	0,242	0,115	0,041
$\Delta U_{I[V]}$	0,05124	0,046312	0,041824	0,037416	0,033064	0,02908	0,02496	0,0208	0,017048	0,013664	0,010784	0,006448	0,003904	0,00238	0,000592
$U_I - U_{I0}$ [V]	5,838	5,222	4,661	4,11	3,566	3,068	2,553	2,033	1,564	1,141	0,781	0,512	0,3	0,173	0,099
$\sqrt{(U_I - U_{I0})}$ [$\sqrt{V}$]	2,416	2,285	2,159	2,027	1,888	1,752	1,598	1,426	1,251	1,068	0,884	0,716	0,548	0,416	0,315
$\Delta\sqrt{(U_I - U_{I0})}$ [$\sqrt{V}$]	0,0130789	0,01297	0,012933	0,012978	0,013138	0,013434	0,013967	0,014885	0,016288	0,018463	0,021805	0,026244	0,033963721	0,04457	0,058804

Figure 6: Messtabelle für violettes Licht - erweitert

Ultraviolettes Licht (λ = 365nm)

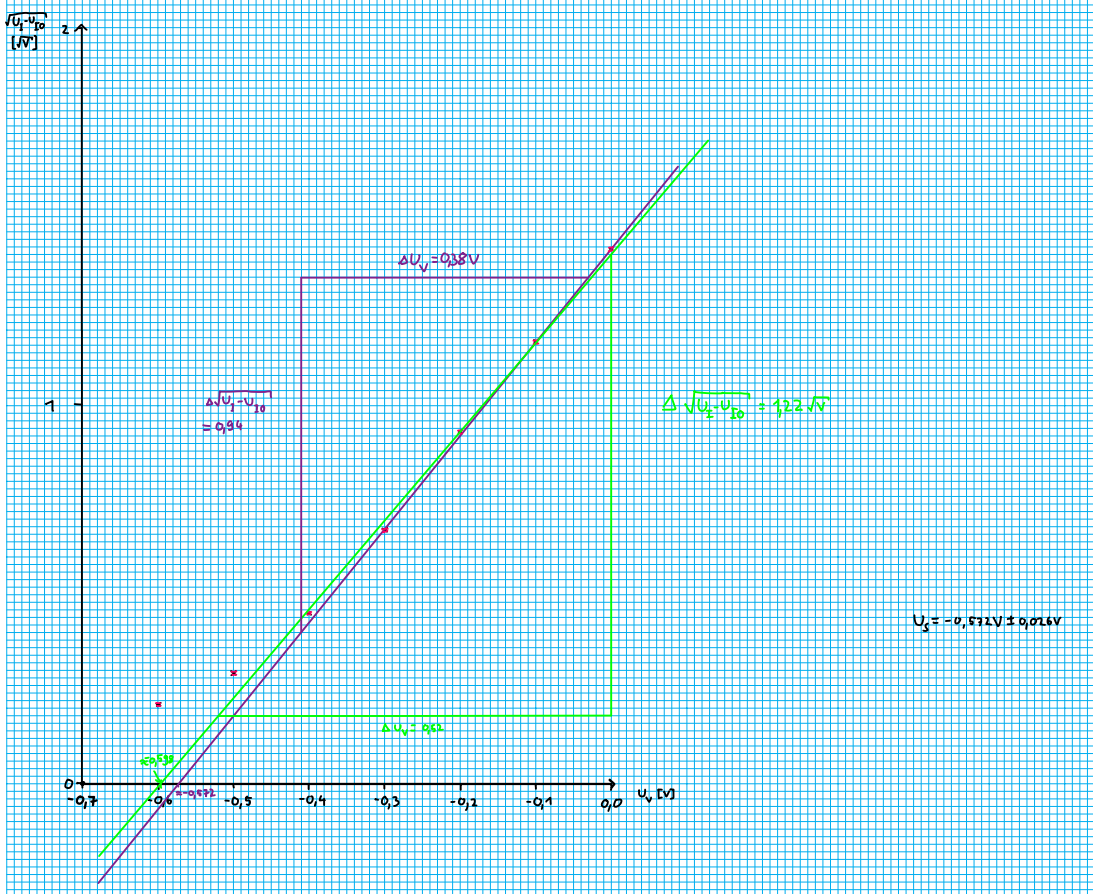
U_V [V]	0	-0,1	-0,2	-0,3	-0,4	-0,5	-0,6	-0,7	-0,8	-0,9	-1	-1,1	-1,2	-1,3	-1,4	-1,5	-1,6	-1,7	-1,8
U_I [V]	7,52	6,9	6,33	5,77	5,219	4,65	4,093	3,587	3,053	2,53	2,06	1,588	1,183	0,802	0,552	0,301	0,157	0,068	0,022
$\Delta U_{I[V]}$	0,11016	0,1052	0,10064	0,05116	0,04675	0,0422	0,03774	0,0337	0,02942	0,02524	0,02148	0,0177	0,014464	0,01142	0,00762	0,00461	0,00288	0,00182	0,00036
$U_I - U_{I0}$ [V]	7,579	6,959	6,389	5,829	5,278	4,709	4,152	3,646	3,112	2,589	2,119	1,647	1,242	0,861	0,611	0,36	0,216	0,127	0,081
$\sqrt{(U_I - U_{I0})}$ [$\sqrt{V}$]	2,753	2,638	2,528	2,414	2,297	2,17	2,038	1,909	1,764	1,609	1,456	1,283	1,114	0,928	0,782	0,6	0,465	0,356	0,285
$\Delta\sqrt{(U_I - U_{I0})}$ [$\sqrt{V}$]	0,021105658	0,02114	0,02121	0,01308	0,01298	0,01293	0,01297	0,0131	0,0134	0,01392	0,0147	0,01598	0,017823428	0,02086	0,02416	0,03107	0,03993	0,05197	0,06501

Figure 7: Messtabelle für UV Licht - erweitert

Diese Tabellen helfen, um die Diagramme und Fehlergeraden zu zeichnen. Da die berechneten Fehler relativ klein sind, und der größere Fehler daher kommen wird, den linearen Teil richtig abzuschätzen, habe ich meine Fehlergerade so eingezeichnet, dass sie das größtmögliche, was als "linear" gelten könnte, abdeckt.

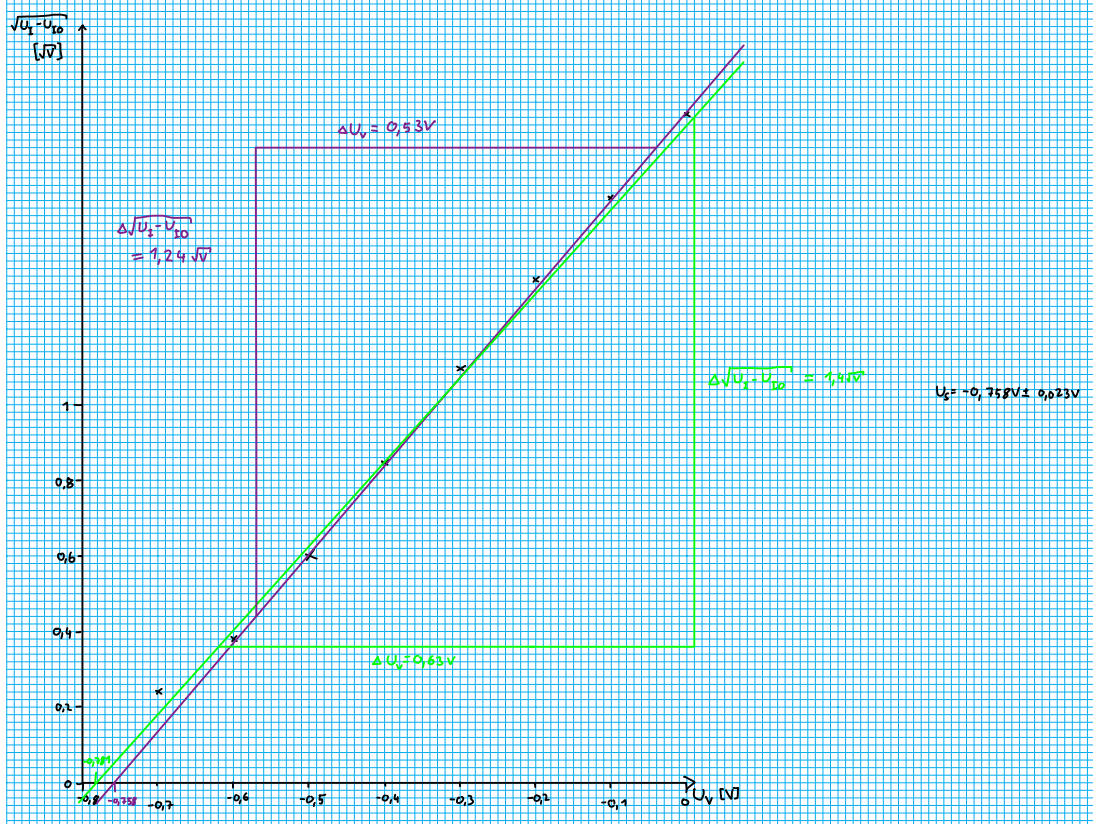
Gelbes Licht, $\lambda = 578\,nm$

Lila: Ausgleichsgerade
Grün: Fehlergerade



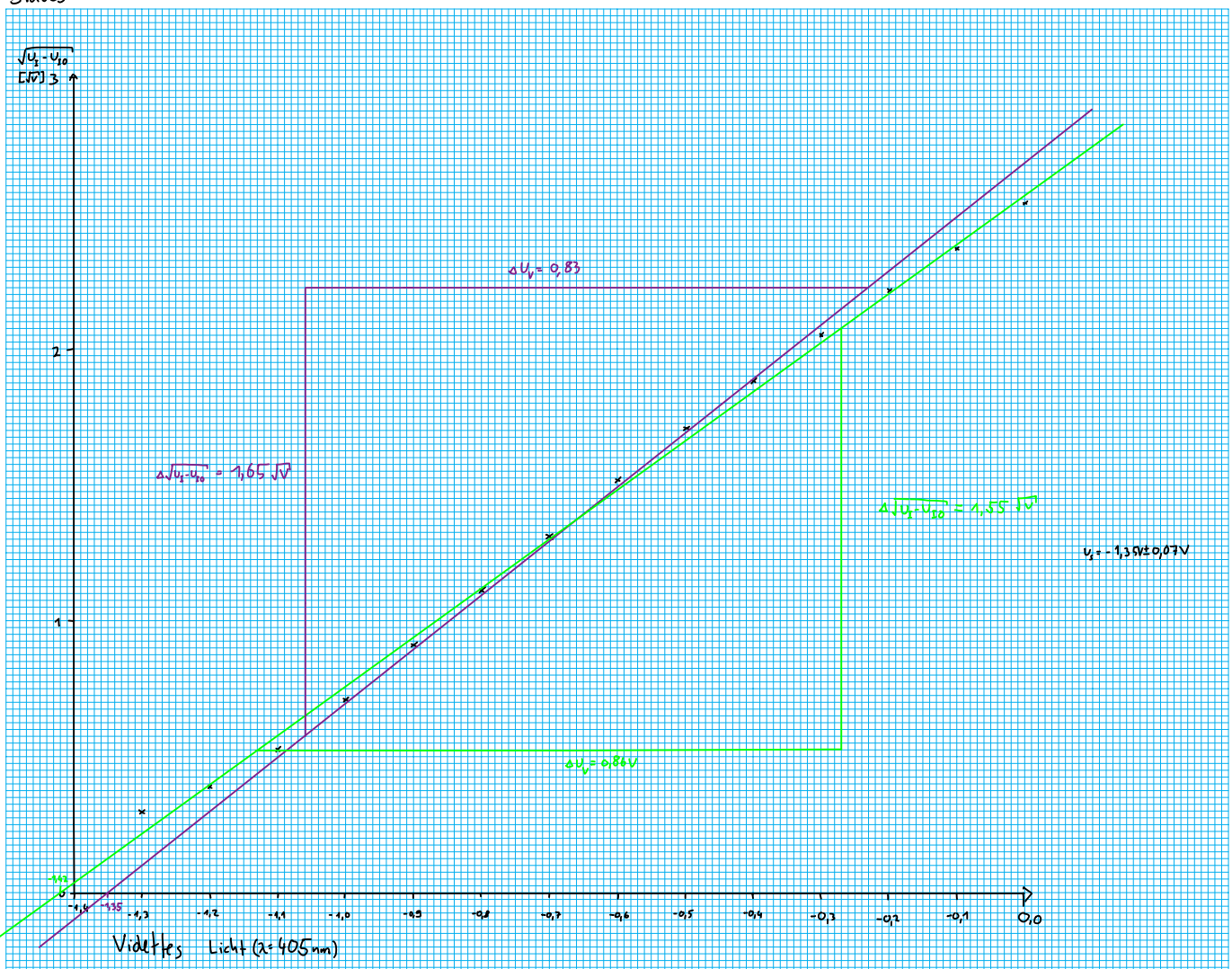
$U_S = -0{,}572V \pm 0{,}016V$

Grünes Licht ($\lambda = 546\,nm$)

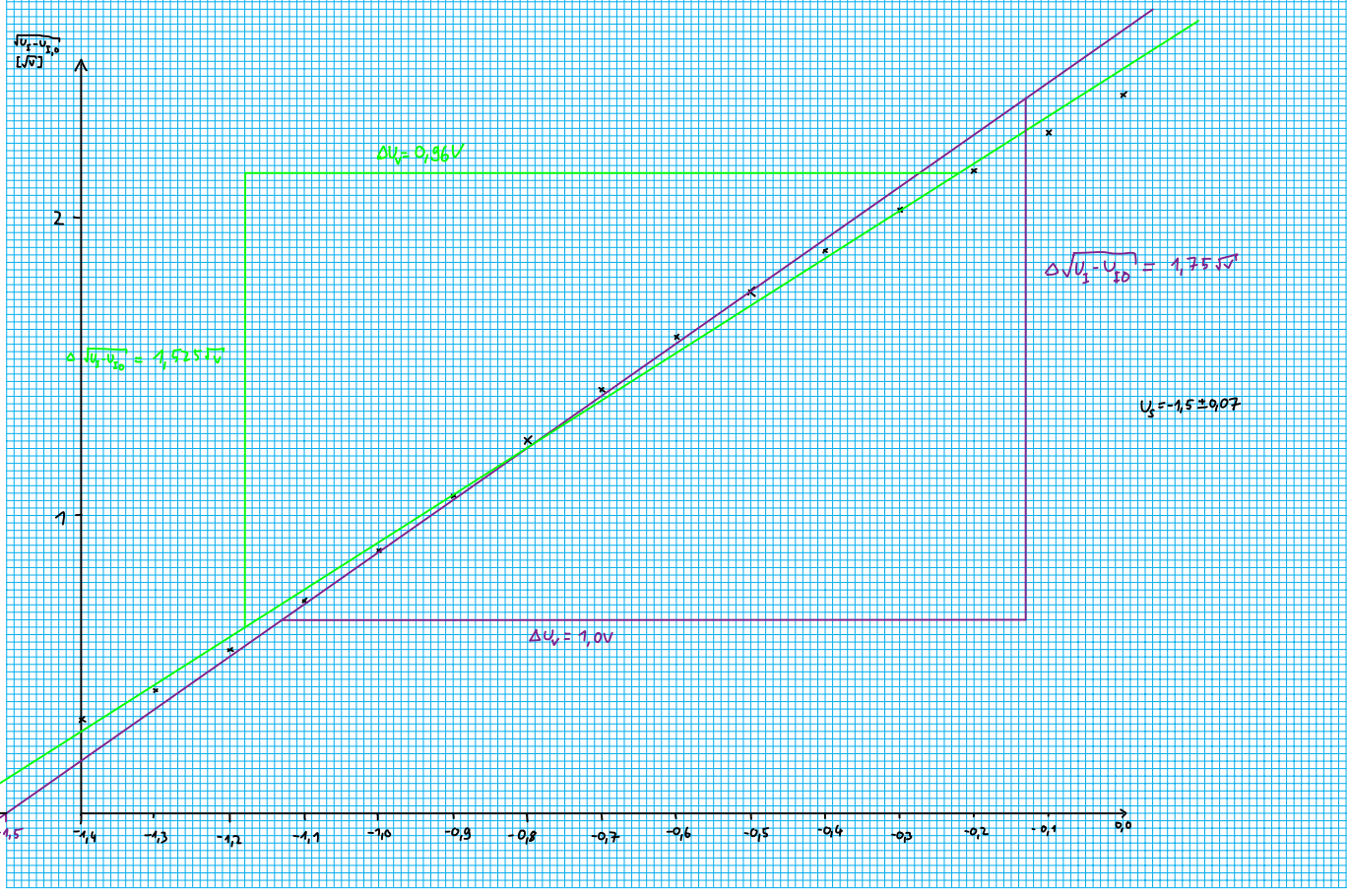


$U_S = -0{,}758V \pm 0{,}023V$

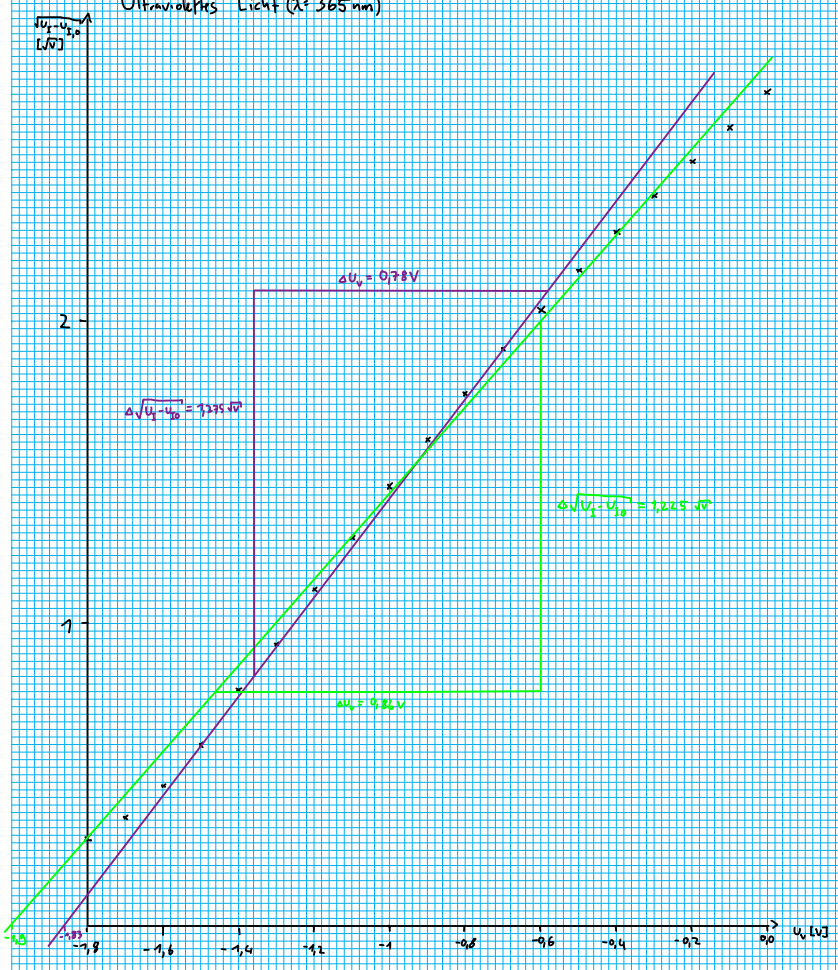
Blaues Licht ($\lambda = 436\,nm$)



Violettes Licht ($\lambda = 405\,nm$)



Ultraviolettes Licht ($\lambda = 365\,nm$)



$U_S = -1{,}83\,V \pm 0{,}07\,V$

Die jeweiligen Sperrspannungen mit ihren Fehlern wurden jeweils neben die Diagramme geschrieben. Tabellarisch gegenüber der Frequenz aufgetragen und in ein Diagramm eingezeichnet erhält man diese beiden Abbildungen:

Wellenlänge λ [nm]	Frequenz ν [THz]	U_S [V]	ΔU_S [V]
578	517	-0,572	0,026
546	548	-0,758	0,023
436	686	-1,35	0,07
405	738	-1,5	0,07
365	819	-1,83	0,07

Figure 8: Sperrspannung pro Frequenz und jeweiliger Fehler

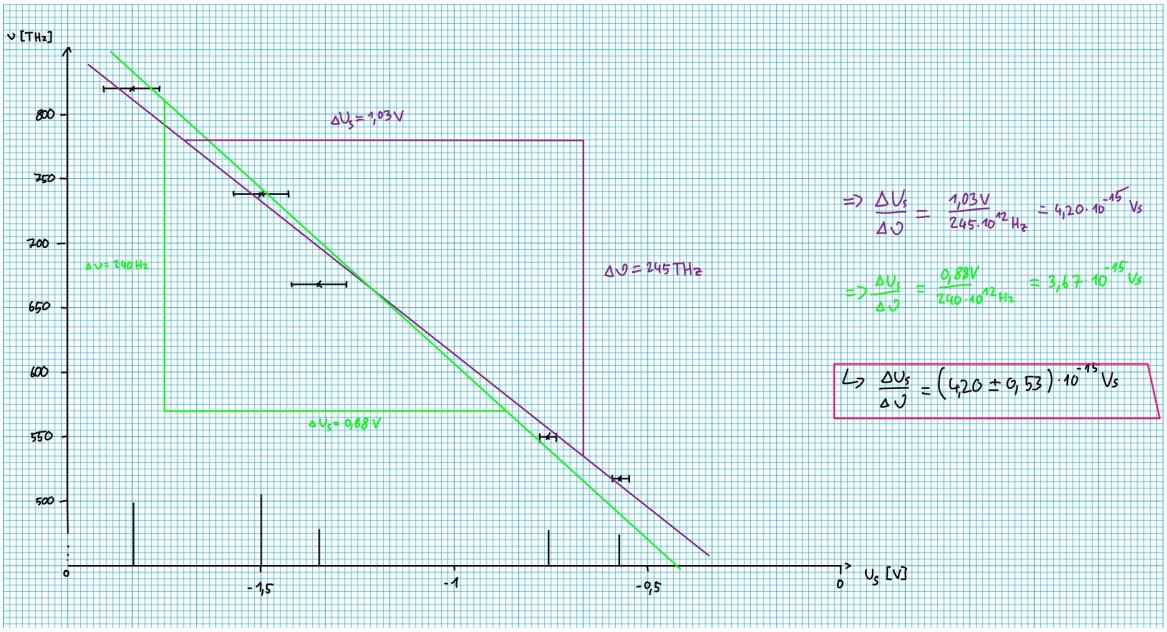


Figure 9: Sperrspannung pro Frequenz und jeweiliger Fehler - Diagramm (Lila = Ausgleichsgerade, Grün = Fehlergerade

[1]

[1]Zwar habe ich auf den Achsen U_s auf die x-Achse gemacht und ν auf die y-Achse, das macht aber für die Auswertung der Steigung von $U_s(\nu)$ keinen Unterschied

Wir bekommen also heraus, dass die Steigung von $U_s(\nu) = (4,20 \pm 0,53) \cdot 10^{-15} Vs$ beträgt. Setzen wir dies nun in (9) ein, so erhalten wir für h einen Wert von

$$h = [(4,20 \pm 0,53) \cdot 10^{-15} Vs] \cdot e = (6,73 \pm 0,85) \cdot 10^{-34} Js \tag{13}$$

4 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Kurz zusammengefasst haben wir zuerst für 5 verschiedene Spektrallinien des Hg-Spektrums den Strom pro Gegenspannung gemessen und haben daraus auf ihre Sperrspannungen schließen können. Durch den linearen Zusammenhang zwischen Sperrspannung und Frequenz fanden wir daraufhin die Steigung von $U_s(\nu)$ heraus, was sich als äquivalent zu $h \cdot e$ herausstellte. Durch diese Relation lies sich letztendlich h berechnen.

Mit unseren Messergebnissen habe ich den Wert für h als $h = (6,73 \pm 0,85) \cdot 10^{-34} Js$ ermitteln können. Im Vergleich mit dem Literaturwert, der beispielsweise auf Wikipedia als $6.62607015 \cdot 10^{-34} Js$ angegeben ist, erkennen wir, dass unser Wert nur um ca. $0,12\sigma$ abweicht, was ich als ziemlich gut bewerten würde. Allerdings muss man auch dazu erwähnen, dass ein Fehler von $\pm 0,85 \cdot 10^{-34} Vs$ in diesem Kontext auch schon ein großer Fehler ist. Ich vermute, dieser große Fehler ist auf die große Varianz bei den Linearisierungsgeraden zurückzuführen, da es doch nicht ganz einfach war genau zu bestimmen, welche Punkte noch zu dem linearen Teil zählen und welche nicht.

Für eine Minimierung dieses Fehlers wären vermutlich mehrere Messungen, also nicht nur in 0,1V sondern vielleicht in 0,05V Schritten hilfreich. Außerdem wäre eine Auswertung der Graphen mit Hilfe eines Computers sicherlich genauer, hier habe ich sie allerdings von Hand vollzogen.

Ursprünglich hätte ich vermutet, dass unsere Messwerte stärker abweichen, da unser Spannungsmessgerät anfangs nicht richtig den Strom erkannt hat (der Peak war erst nicht zu finden), jedoch hat dieses Problem entweder keine wirklichen Auswirkungen auf das Ergebnis gehabt, oder wurde durch ein anderes Problem kompensiert.

Alles in Allem würde ich jedoch trotzdem sagen, dass unsere Messung erfolgreich war und gute Resultate erzielt hat.