

Der äußere Photoeffekt

Der äußere Photoeffekt ist sozusagen die Geburt der Quantenphysik. Wir haben mit Hilfe des Photoeffektes in einer Photozelle mit einer angelegten Gegenspannung eine Methode verwendet, durch die man direkt auf die kinetische Energie der durch den Photoeffekt ausgelösten Elektronen schließen kann. Die Gegenspannung wird bei dieser "Gegenfeldmethode" so weit hoch geregelt, bis kein Photostrom mehr gemessen werden kann. Auf diesem Weg haben wir unter anderem das Plancksche Wirkungsquantum zu $h \approx 5,8(\pm 0,4) \cdot 10^{-34} Js$ bestimmt.

Die PG 268-I:

Tutor:	Sing,	Cornelia	
	Bednarczyk,	Diana	196230
	Döring,	Inkje	197382
	Fleischer,	Fabian	197376
	Guyot,	Daniel	194649
	Könnecke,	Rene	197367
	Südmeyer,	Heinrich	197655
	Torabi,	Ramin	197364

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Titelblatt	1
Inhaltsverzeichnis	2
1 Allgemeines zum äußeren Photoeffekt	3
1.1 Was ist der Photoeffekt?	3
1.2 Der Photoeffekt in der Historie	3
2 Vorüberlegungen	4
2.1 Theoretische Vorüberlegungen	4
2.2 Experimentelle Vorüberlegungen	5
3 Aufbau	6
3.1 Geräteliste	6
3.2 Versuchsaufbau	6
4 Durchführung	6
5 Auswertung	7
6 Resümee	10

1. Allgemeines zum äußeren Photoeffekt

1.1 Was ist der Photoeffekt?

Als Photoeffekt wird die Beobachtung bezeichnet, daß Licht Elektronen diskret seine Energie "übergeben" kann.

Man unterscheidet zwischen dem inneren und dem äußeren Photoeffekt. Der äußere Photoeffekt, auf den wir uns beschränken wollen, wird als äußerer Photoeffekt bezeichnet, da bei ihm die Elektronen aus einem Metall "geschlagen" werden und sich danach z.B. im Vakuum befinden. Schon dieser Effekt läßt sich mit der klassischen Physik nicht beschreiben. Es gibt aber noch weitere Beobachtungen, (die in den theoretischen Vorüberlegungen erwähnt werden) die dem klassischen Lichtmodell widersprechen.

Der innere Photoeffekt sei hier nur der Vollständigkeit halber erwähnt. Er beruht auf demselben Prinzip, "schießt" aber keine Elektronen aus einer Metallbindung, sondern "hebt" sie aus dem Valenzband in das Leitungsband. Das bedeutet, daß bestimmte Halbleiter, wenn sie mit Licht bestrahlt werden, besser leiten, aber auch, daß Photodioden überhaupt erst leitend werden, wenn sie mit Licht bestrahlt werden. Dieses ist z.B. die Basis für moderne Strahlungsmessung oder heutige Digitalkameras.

1.2 Der Photoeffekt in der Historie

Die ersten Beobachtungen zum Photoeffekt sind aus dem Jahr 1887 und wurden von H. Hertz als Nebeneffekt eines anderen Versuches bemerkt. Wilhelm Ludwig Franz Hallwachs untersuchte 1888 diesen Effekt genauer und schuf den Grundversuch zum äußeren Photoelektrischen Effekt (negativ geladene Zinkplatte auf Elektroskop wird mit UV-Licht bestrahlt). Daher ist der äußere Photoeffekt oder lichtelektrische Effekt bisweilen auch als Hallwachs-Effekt bekannt. Um 1900 wurde die erste Photozelle gebaut. Lenard untersuchte daraufhin verschiedenste Erscheinungen daran. Unter anderem bestimmte er die spezifische Ladung des Elektrons; aber er verwendete auch die von uns benutzte Gegenfeldmethode, mit der der Photoeffekt quantitativ statt nur qualitativ beschrieben werden konnte.

Erst 1905 konnte der Photoeffekt korrekt beschrieben werden. Albert Einstein kam auf die Idee, das Licht als voneinander unabhängige Lichtquanten zu beschreiben, und schuf so das Modell, das den Photoeffekt erklärte. 1921 erhielt Einstein unter anderem dafür den Nobelpreis.

1906 stellte Einstein die Verbindung zur Plankschen Theorie der Hohlraumstrahlung her, die aus der klassischen Physik abgeleitet wurde. Damit hat er mitgeholfen, aus der klassischen Physik die Quantentheorie abzuleiten. 1924 schlug Louis de Broglie vor, jedem Teilchen (z.B. dem Elektron) auch Wellencharakter zuzuordnen und einige Experimente zeigten, daß er recht haben sollte. De Broglie konnte mit dieser Vorstellung sogar die diskreten Energiezustände des Elektrons im Atom

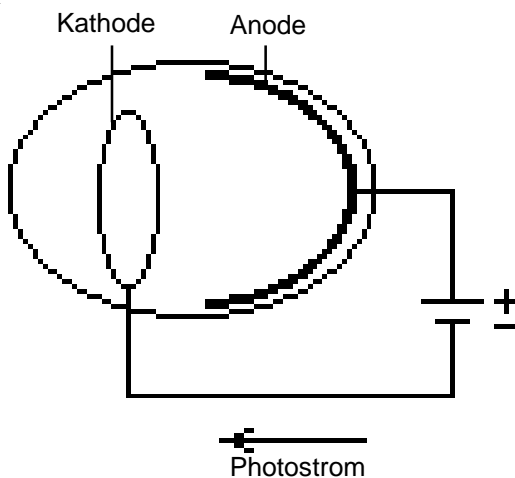
erklären. Damit wurde der Welle-Teilchen-Dualismus auch auf "klassische" Teilchen erweitert.

2. Vorüberlegungen

2.1 Theoretische Vorüberlegungen

Es ist nicht möglich, den Photoeffekt theoretisch zu beschreiben, ohne die Ergebnisse des Photoeffektes zu benutzen. Das liegt ganz einfach daran, daß das Modell zur Beschreibung des Photoeffektes (die ursprüngliche Quantentheorie) aus dem Photoeffekt abgeleitet wurde. Dies war nötig, da klassische Modelle den Photoeffekt nicht beschreiben konnten, bzw. ihm oft widersprachen.

Prinzip der Photozelle:



Ergebnisse des äußeren Photoeffektes:

1. Licht kann aus Metallen Elektronen auslösen, aber keine Protonen oder gar Ionen.
2. Das Licht benötigt aber eine gewisse Grenzfrequenz; sie hängt vom verwendeten Metall ab.
3. Höhere Lichtintensität löst unterhalb der Grenzfrequenz keine Elektronen aus, oberhalb werden proportional zur Intensität mehr Elektronen ausgelöst.
4. Eine mit Licht bestrahlte Photozelle liefert eine Spannung.
5. Die Photoelektronen werden in unmeßbar kurzer Zeit ausgelöst.
6. Die kinetische Energie der Photoelektronen ist proportional zur Frequenz des eingestrahlt Lichtes.

Viele dieser Beobachtungen verstoßen grob gegen das Wellenmodell, der Photoeffekt läßt sich also mit dem Wellenmodell nicht erklären. So ist es nach dem Wellenmodell fraglich, ob Licht Elektronen aus Metallen auslösen kann. Die Frequenz des Lichtes müßte sich anders auswirken - es müßte Resonanz geben oder ähnliches. Das würde wiederum eine nie beobachtete Zeit zum "Einschwingen" benötigen. Die Lichtintensität

müßte proportional zur kinetischen Energie der Photoelektronen sein, da die übertragene Energie von der Amplitude der Lichtwelle abhängen müßte und die Elektronen müßten senkrecht zur Ausbreitungsrichtung des Lichtes ausgelöst werden, weil bei elektromagnetischen Wellen die Energie senkrecht zur Ausbreitungsrichtung "schwingt". Damit verstößt dieser Ansatz der Erläuterung durch das Wellenmodell auch der Impulserhaltung. Daher ist es notwendig, den Photoeffekt mit einem anderen Modell zu erklären.

Dadurch, das Einstein behauptete, daß Licht aus Quanten (Teilchen oder Korpuskeln) besteht, deren Energie von der Frequenz und deren Zahl von der Lichtintensität abhängt, konnte er den Photoeffekt erklären. Nach Einsteins Vorstellung "kollidieren" ein Photon und ein Elektron wobei das Photon seine gesamte Energie an das Elektron abgibt. Nachdem das Elektron angeregt wurde, "diffundiert" es (nach dem Drei-Schritt-Modell von Spicer) zur Oberfläche und tritt dann ins Vakuum über. Mit "diffundiert" ist hier gemeint, daß das Elektron nach dem Impulserhaltungssatz in das Metall geschleudert wird, dort aber elastische Stöße an den Atomen durchführt und mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit irgendwann ganz aus dem Metall austritt. Dabei muß es die Austrittsarbeit überwinden, um sich aus dem Verbund zu lösen. Einsteins Formel zum Photoeffekt:

$$E = h \cdot f - W$$

E	kinetische Energie des Photoelektrons
h	Planksches Wirkungsquantum
f	Frequenz des einfallenden Lichtes
W	spezifische Austrittsarbeit des Metalls

Wie man leicht sehen kann, ergibt sich aus obiger Gleichung, wenn man in einem Diagramm E über f aufträgt, eine Gerade mit der Steigung h und dem Schnittpunkt mit der y-Achse bei -W.

2.2 Experimentelle Vorüberlegungen

Unsere Absicht war nun, aus den Meßwerten oben erwähnte Gerade zu konstruieren und somit h und W zu bestimmen.

Die Frequenz des eingestrahnten Lichtes konnten wir mit den Farbfiltern direkt bestimmen. E läßt sich aber nur indirekt "messen". Deswegen haben wir die Gegenfeldmethode benutzt. Das Prinzip der Gegenfeldmethode beruht darauf, daß eine mit Licht bestrahlte Photozelle eine Spannung liefert, wenn die Frequenz des Lichtes ausreichend hoch ist. Wenn man eine Photozelle kurzschließt oder einen Verbraucher anschließt, dann fließt ein Strom, der sogenannte Photostrom. Bei der Gegenfeldmethode wird nun eine Gegenspannung angelegt, die alle Elektronen, deren kinetische Energie nicht ausreicht, um auf die Kathode zu gelangen zurück zur Anode befördert.

Wir wollten nun monochromatisches Licht auf die Photozelle einfallen lassen und die Gegenspannung so weit hochregeln, bis kein Photostrom mehr fließt. Damit können wir dann die kinetische Energie der Elektronen, die sich genau in Richtung der Kathode bewegen, berechnen,

da sie proportional zur angelegten Gegenspannung ist. Wenn wir die Austrittsarbeit addieren, erhalten wir direkt die Energie der eingestrahlenen Lichtquanten.

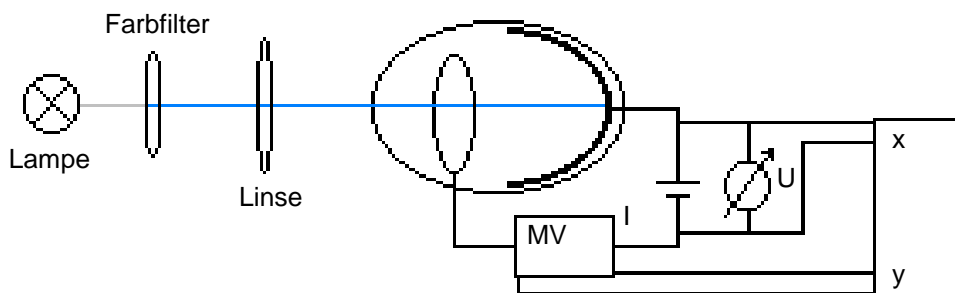
3. Aufbau

3.1 Geräteliste

PL-Inventarnummer:

1. Photozelle mit Halter	715a
2. Quecksilber-Hochdrucklampe mit Netzgerät	714d
3. Schwanenhalslampe	713c
4. Farbfilter	728b
5. Netzgerät [30V, 2.5A] EA 7030-025	013b
6. x-y-t-Schreiber Rohde & Schwarz	027b
7. Meßverstärker	044b

3.2 Versuchsaufbau



Nachdem das Licht der Lampe(n) durch einen Farbfilter gefallen ist, ist es monochromatisch. Dieses Licht wurde durch eine Linse geschickt, um eine möglichst hohe Intensität zu gewährleisten und um zu verhindern, daß das Licht auf die Kathode fällt. Wenn es dann auf die Anode fällt, löst es dort Elektronen aus. Die Elektronen, die die Kathode erreichen, stellen dann den Photostrom dar. Dieser wird von dem Meßverstärker registriert. Der Meßverstärker liefert proportional zum Photostrom eine Spannung, die auf die y-Koordinate des x-y-Schreibers gegeben wird. Die x-Koordinate des x-y-Schreibers gibt die angelegte Gegenspannung an.

4. Durchführung

Wir haben zwei Meßreihen aufgenommen. Erst eine mit der Schwanenhalslampe und dann eine mit der Quecksilberdampf-Hochdrucklampe. Das Licht haben wir mit einer Linse fokussieren müssen, damit der ohnehin sehr schwache Photostrom besser meßbar wird, und nicht so enorm verstärkt werden muß. Außerdem wird dadurch

das Ergebnis genauer und wir haben dadurch die Lichteinstrahlung auf die Kathode verringert. Leider ist es uns nicht ganz gelungen, den Photoeffekt in umgekehrter Richtung (Auslösung von Photoelektronen aus der Kathode) gänzlich zu unterbinden, was man an unseren Meßkurven sehen kann.

Es wird empfohlen die Kathode zwei Sekunden zu erhitzen (Glut), um Ablagerungen abzdampfen, da das aber offenbar recht diffizil ist, ohne die Kathode durchbrennen zu lassen, haben wir auf den Rat gehört, es zu lassen. Diese Details wirken sich natürlich auf die Meßgenauigkeit aus.

Wir haben nun die Gegenspannung langsam hochgeregelt und der x-y-Schreiber hat den Photostrom in Abhängigkeit zur angelegten Gegenspannung aufgetragen. Diese Prozedur haben wir dann mit verschiedenen Farbfiltern wiederholt.

5. Auswertung

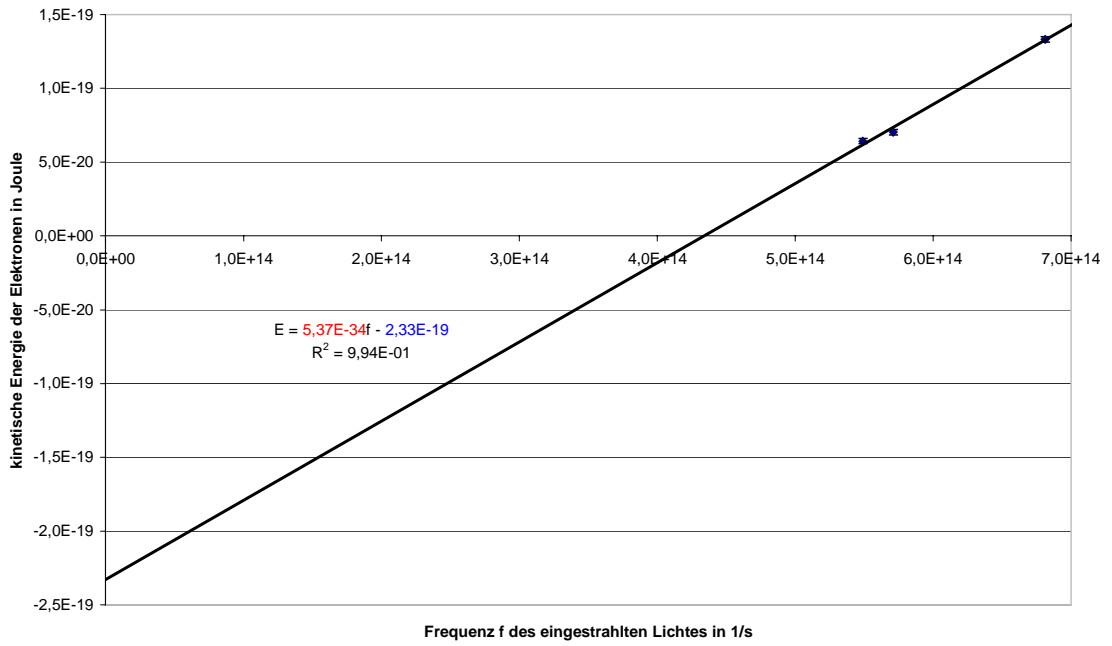
Zur Auswertung benötigt man nur die Stellen, an denen der Photostrom gleich null ist. Da der Photostrom direkt abhängig von der Lichtintensität ist, sind die anderen Meßwerte des Photostromes eher ein interessanter Nebeneffekt. Da der Meßverstärker um das ca. 10^9 -fache verstärkt hat, wird die Genauigkeit weiter beeinflußt. Außerdem hatte der Meßverstärker einen Offset, der noch beim Ablesen abgezogen wurde. Die Tatsache, daß z.B. die Intensität des Lichtes der Schwanenhalslampe eine Funktion ihrer Temperatur ist, hat auf die Gegenspannung, bei der Photostrom gleich Null ist, keine Auswirkung.

Nach dem Ablesen der einzelnen Meßwerte und dem Errechnen der zugehörigen Energien und Frequenzen nach den Formeln:

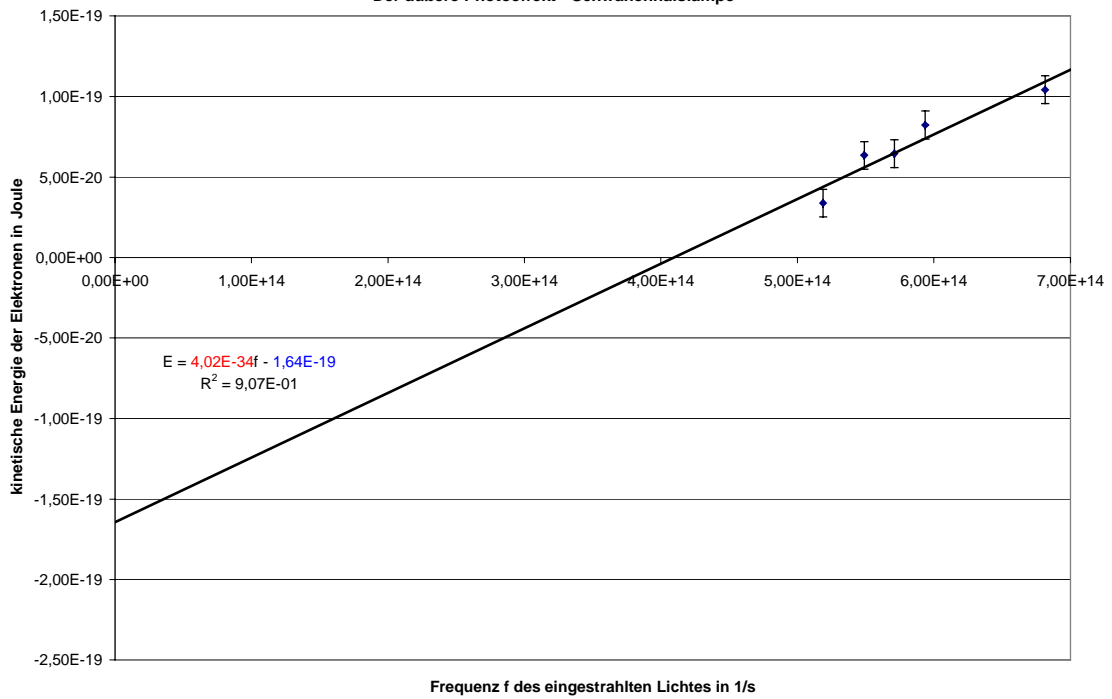
$$f = \frac{c}{\lambda} \text{ und } E = e \cdot U$$

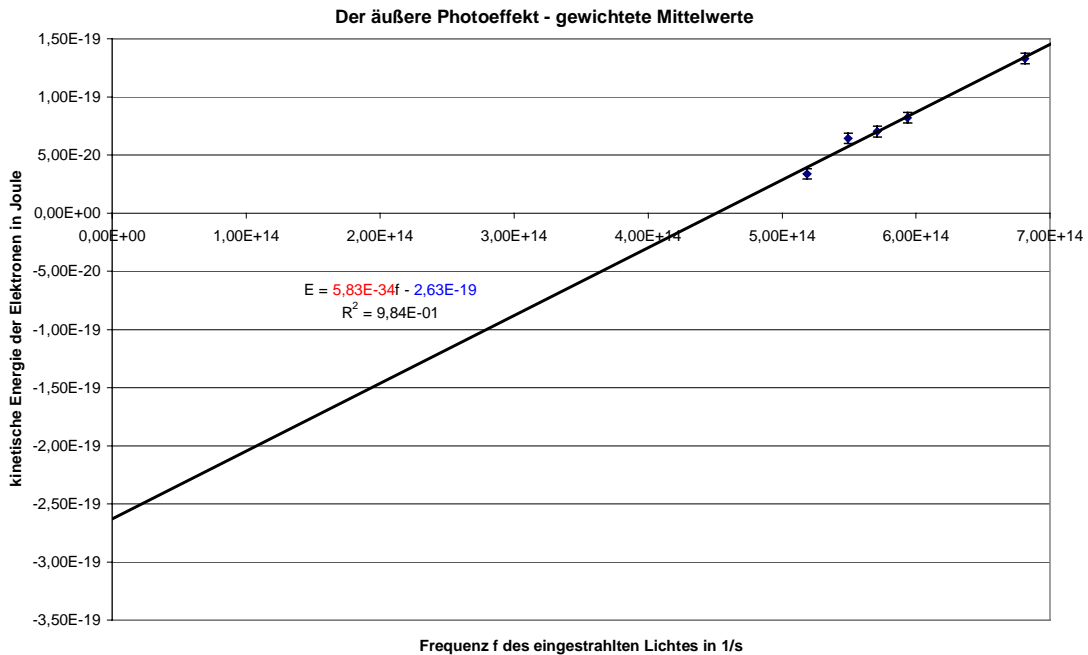
ergeben sich folgende Graphen:

Der äußere Photoeffekt - Quecksilberdampf-Hochdrucklampe



Der äußere Photoeffekt - Schwanenhalslampe





Die zugehörigen Meßwerte:

Quecksilberdampf Lampe:						Einheit:
Wellenlänge:	5,46E-07	5,25E-07	4,40E-07			[m]
Grenzspannung:	0,40	0,44	0,83			[V]
Frequenz:	5,49E+14	5,71E+14	6,81E+14			[1/s]
kin. Energie d. Elektronen:	6,43E-20	7,03E-20	1,33E-19			[J]
Schwannenhalslampe:						
Wellenlänge:	5,78E-07	5,46E-07	5,25E-07	5,05E-07	4,40E-07	[m]
Grenzspannung:	0,21	0,40	0,40	0,51	0,65	[V]
Frequenz:	5,19E+14	5,49E+14	5,71E+14	5,94E+14	6,81E+14	[1/s]
kin. Energie d. Elektronen:	3,38E-20	6,34E-20	6,45E-20	8,23E-20	1,04E-19	[J]
Mittelwerte aus beiden:						
Wellenlänge:	5,78E-07	5,46E-07	5,25E-07	5,05E-07	4,40E-07	[m]
Grenzspannung:	0,21	0,40	0,44	0,51	0,83	[V]
Frequenz:	5,19E+14	5,49E+14	5,71E+14	5,94E+14	6,81E+14	[1/s]
kin. Energie d. Elektronen:	3,38E-20	6,43E-20	7,03E-20	8,23E-20	1,33E-19	[J]

Die bei den einzelnen Graphen angegebenen Gleichungen sind die zugehörigen Geradengleichungen der Graphen. Aus ihnen kann man das **Planksche Wirkungsquantum h** und die **Austrittsarbeit W** problemlos ablesen. Aus dem Graphen der gewichteten Mittelwerte ergibt sich für $h \approx 5,83 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ und für $W \approx 2,63 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. Verglichen mit dem Literaturwert von $h \approx 6,6260755 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ ergibt sich eine Abweichung von ca. 14%.

Der beim Graphen angezeigte Fehler berechnet sich durch

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_j - \hat{y}_j)^2}{\sum y_j^2 - \frac{(\sum y_j)^2}{N}}$$

Dies ist das Quadrat des Pearsonschen Korrelationskoeffizienten. Dieser liegt zwischen eins und minus eins und ist ein Maß für die Abweichung der Meßwerte von der Geraden. Je näher er bei eins liegt, desto genauer sind die jeweiligen Meßwerte. Für unsere Fehlerbetrachtung spielt er aber keine weitere Rolle.

Der Wert, der sich aus der Messung mit der Quecksilberdampfampe ergibt ist bei weitem genauer, was an der viel höheren Lichtintensität der einzelnen Spektrallinien liegen könnte. Um dies gebührend zu berücksichtigen mußten wir recht weit ausholen:

Da der Fehler, der durch die Abweichung der Frequenzen entsteht, recht klein sein dürfte, haben wir ihn gänzlich vernachlässigt. Am stärksten fällt eindeutig der Fehler von E ins Gewicht. Zuerst haben wir die Unsicherheit der einzelnen Meßwerte berechnet:

$$\sigma_{y_i} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - E - hx_i)^2}.$$

Daraus kann man dann den gewichteten Mittelwert berechnen:

$$E_w = \frac{\frac{E_1}{\sigma_1} + \frac{E_2}{\sigma_2}}{\frac{1}{\sigma_1} + \frac{1}{\sigma_2}}.$$

Aus diesen gewichteten Mittelwerten ist dann die dritte Gerade entstanden.

Der Fehler für h berechnet sich zu

$$\sigma_h = \sqrt{\frac{N\sigma_y^2}{\Delta}} \text{ mit } \Delta = N \cdot \left(\sum_{i=1}^N x_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2$$

und beträgt $\sigma_h \approx 3,6 \cdot 10^{-35} \text{ Js}$.

Der Fehler von W errechnet sich zu

$$\sigma_w = \frac{\sigma_y^2 \cdot \sum_{i=1}^N x_i^2}{\Delta} \approx 1,9 \cdot 10^{-20} \text{ J}.$$

6. Resümee

Da wir, wie in der Durchführung erwähnt, von vornherein einige Abstriche bei der Genauigkeit gemacht haben, ist es erfreulich, daß unser Plancksches Wirkungsquantum mit $h \approx 5,8(\pm 0,4) \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ nur um 14% vom Literaturwert abweicht. Schade ist allerdings, daß der Literaturwert nicht mehr in der berechneten Fehlertoleranz liegt. Leider ist auch kein systematischer Fehler eindeutig erkennbar, der eine solch starke Abweichung verursachen könnte.

Unsere verwendete Methode ist eigentlich recht gut geeignet, man könnte allerdings noch mehr Messungen durchführen, indem man anstelle der Farbfilter einen Monochromator benutzt und so ein breiteres Spektrum {☺} von Wellenlängen zur Verfügung hat.

Der äußere Photoeffekt - gewichtete Mittelwerte

