

Inhaltsverzeichnis

1	Versuchsbeschreibung und Physikalische Grundlagen	3
2	Versuchsdurchführung und Auswertung	3
2.1	Abhängigkeit des Photostroms von angelegter Spannung	3
2.2	Ermittlung der Abhängigkeit zwischen U_0 und Frequenz des Lichtes	5
2.3	Überprüfung der Abhängigkeit zwischen Grenzspannung und Lichtintensität	6
3	Fehler- und Ergebnisdiskussion	7
4	Anhang	8

1 Versuchsbeschreibung und Physikalische Grundlagen

Im zu bearbeitenden Experiment sollte die Auswirkung von einfallendem Licht auf einen metallischen Leiter untersucht werden. Durch eine optische Vorrichtung wird von einer Quecksilberdampfampe emittiertes Licht in seine Spektrallinien aufgeteilt, sodass Bereiche mit Licht gleicher Wellenlänge vorliegen:

Farbe	Wellenlänge
Gelb	$\lambda_{Gb} = 579.1 \text{ nm}$
Grün	$\lambda_{Gr} = 546.1 \text{ nm}$
Blaugrün	$\lambda_{Bg} = 491.6 \text{ nm}$
Blau	$\lambda_B = 435.8 \text{ nm}$
Violett	$\lambda_V = 404.7 \text{ nm}$
Ultraviolett	$\lambda_{UV} = 365.0 \text{ nm}$

Tabelle 1: Wellenlängen der Spektrallinien

Um Verunreinigung durch anderes Licht zu vermeiden, wurde das Experiment in einem abgedunkelten Raum durchgeführt. Gemessen wurde nun an einer Vorrichtung aus Kathode und Anode, in die das Licht einfiel. Durch dieses Licht wird Energie auf Elektronen in Atomen übertragen, sodass diese herausgelöst werden und sich dann im Raum zwischen Kathode und Anode befinden. Zum Herauslösen muss zuerst die Austrittsarbeit W_A verrichtet werden, sodass die Elektronen nach Verlassen des Atoms eine kinetische Energie von der Differenz aus Lichtenergie und Austrittsarbeit haben. Die Richtung ihrer Bewegung ist zufällig. Treffen diese freien Elektronen bei angelegter Spannung U auf Anode oder Kathode, kann eine Stromstärke I gemessen werden (Photostrom). Die Messung der Spannung erfolgt mit einem Voltmeter „Fluke 85 Multimeter“, die der Stromstärke mit dem Amperemeter „Präcitronec MV40 Milli-Pico-Meter“, Inv.-Nr. 0294/12/77. Vor allem diese Kennlinie der Abhängigkeit zwischen U und I ist von Bedeutung, neben der Ermittlung der Grenzspannung U_0 , bei der keine Stromstärke gemessen wird.

Da bei der ersten Untersuchung des Photoeffektes zwei Theorien zur Beschreibung des Lichtes vorlagen, werden auch von beiden Theorien getroffene Vorhersagen überprüft. Die erste Theorie ist die der Wellengestalt des Lichtes. Sie sagt voraus, dass die vom Licht übertragene Energie von dessen Intensität abhängt. Durch eine größere Amplitude sollten die Elektronen im metallischen Leiter mit der Zeit einen höheren Energieübertrag erhalten, eine Erhöhung der kinetischen Energie und damit ein Anstieg von U_0 bei steigender Intensität und voranschreitender Zeit stattfinden. Eine Abhängigkeit zwischen U_0 und Frequenz des Lichtes wäre hiernach nicht zu erwarten.

Die zweite Theorie, in der Licht als ein Teilchen (Photon) gesehen wird, besagt, dass die Energie dieses Photons lediglich von seiner Wellenlänge λ bzw. seiner Frequenz ν und einer Proportionalitätskonstante h abhängt, sodass die kinetische Energie des herausgelösten Elektrons

$$E_{\text{kin}} = h \cdot \nu - W_A \quad (1)$$

beträgt. Eine ausführliche Versuchsbeschreibung findet sich in [1], S.21-26.

2 Versuchsdurchführung und Auswertung

2.1 Abhängigkeit des Photostroms von angelegter Spannung

Zuerst wurde die gelbe Spektrallinie auf die Vorrichtung von Kathode und Anode gerichtet, dann Spannungen zwischen -14 V und 60 V eingestellt, wobei besonders im Bereich zwischen -3 V und 3 V kleinschrittig gemessen wurde. Für die Unsicherheiten der Werte gilt

$$u_I = 1.5\% \text{ des Messbereichs} + \frac{1}{2} \text{ Skalenteil,}$$
$$u_U = 1\% \text{ des Wertes} + 1 \text{ Digit.}$$

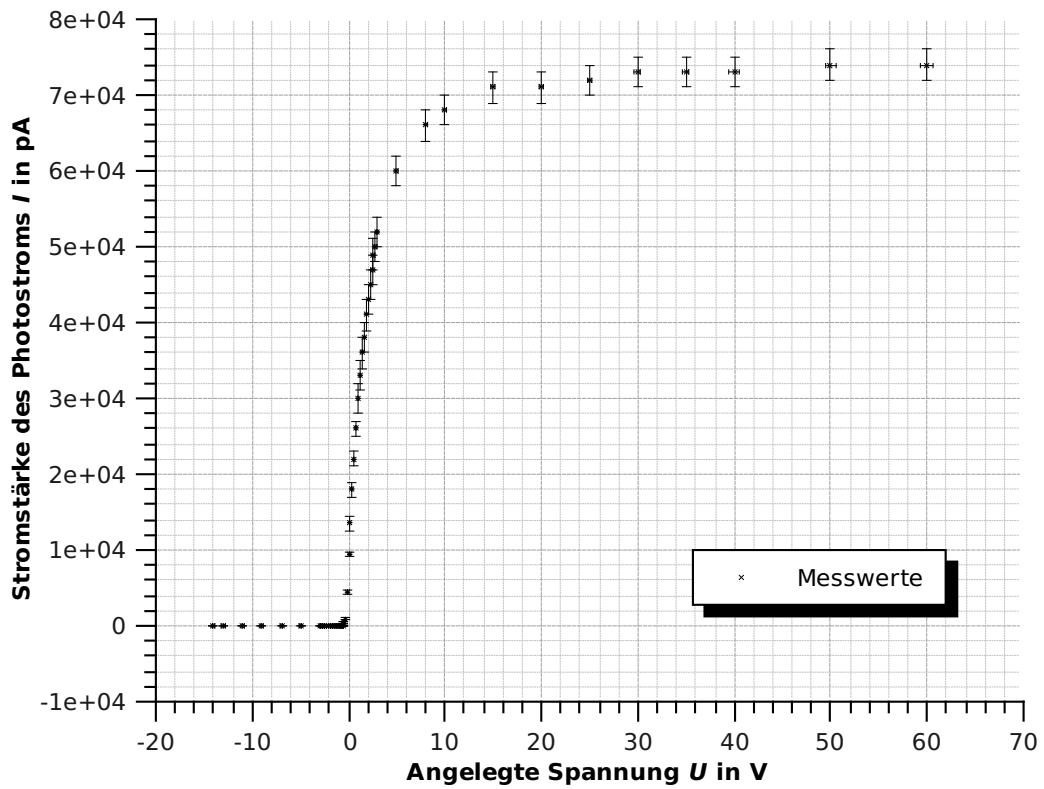


Abbildung 1: Kennlinie zwischen Spannung und Stromstärke

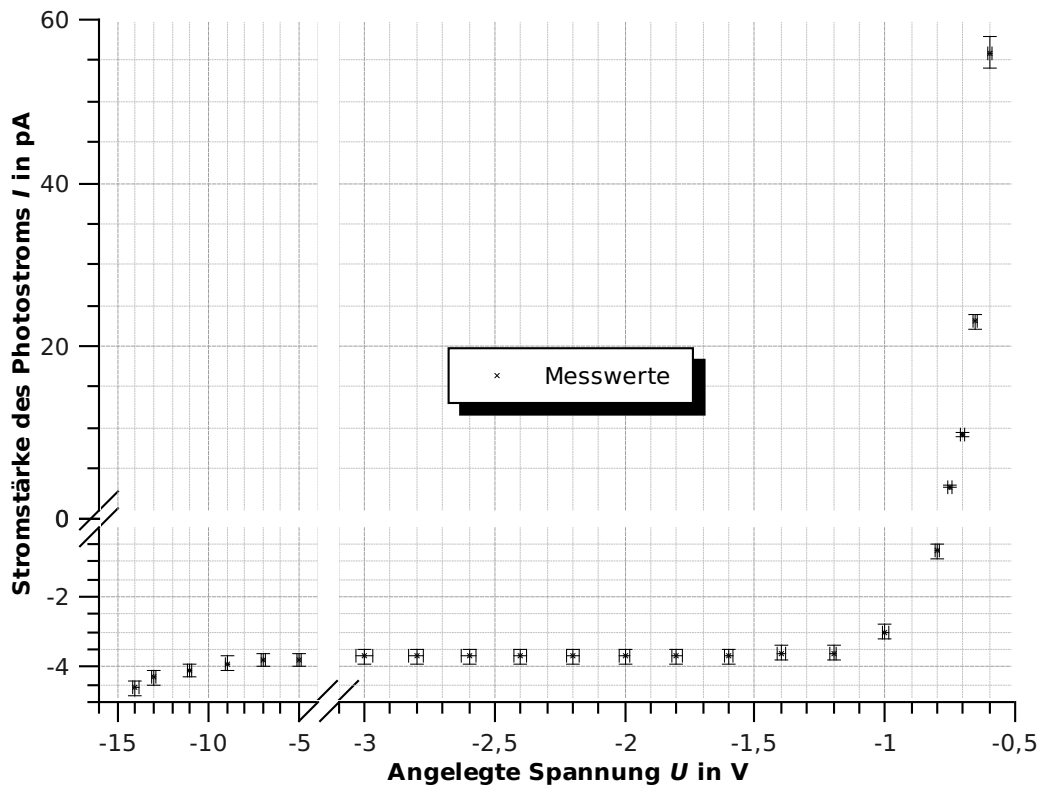


Abbildung 2: Kennlinie zwischen Spannung und Stromstärke für $U < 0$

Die aufgenommenen Werte sind nebst Unsicherheiten dem Datenblatt im Anhang zu entnehmen. Aus ihnen ergibt sich der in Abbildung 1 dargestellte grafische Zusammenhang.

Betrachtet man vorerst den Bereich $U > 0$, so stellt man fest, dass ein rascher Anstieg des Stromes in positiver Richtung erfolgt, der sich dann einem konstanten Wert annähert. Dies deckt sich mit der Theorie. Bei positiver Spannung erfahren die gelösten Elektronen eine Beschleunigung in Richtung der Anode. Ist diese Spannung noch klein, so reicht die Energie

$$E = e \cdot U \tag{2}$$

nicht aus, um alle freien Elektronen derart zu beschleunigen, dass sie die Anode auch erreichen (da ihre ursprüngliche Bewegungsrichtung zufällig ist). Erst bei steigender Spannung werden immer mehr Elektronen hinreichend zur Anode beschleunigt, sodass nahezu alle freien Elektronen eingefangen werden und sich der Photostrom einer konstanten Stromstärke annähert.

Für den Bereich $U < 0$ liest man einen geringen negativen Strom ab, d.h. einige der gelösten Elektronen werden durch die negative Spannung wieder zurück zur Kathode beschleunigt. Mit steigender Spannung wird das elektrische Feld schwächer, sodass immer weniger Elektronen zurück zur Kathode gelangen, bis schließlich bei U_0 der Energieübertrag des Feldes so groß ist wie die kinetische Energie der Elektronen, sodass diese weder Kathode noch Anode erreichen. Ab dieser Spannung beginnt der starke Anstieg der Elektronenaufnahme an der Kathode. Dargestellt ist der Verlauf dieser Kurve in Abbildung 2.

2.2 Ermittlung der Abhängigkeit zwischen U_0 und Frequenz des Lichtes

In diesem Teil des Versuches wurde für jede Spektrallinie die für die Stromstärke $I = 0$ nötige Gegenspannung U_0 sechsmal gemessen, daraus Mittelwert, Vertrauensbereich und mit der systematischen Unsicherheit die Gesamtunsicherheit berechnet. Die aufgenommenen Werte können genau wie die errechneten Unsicherheit im Datenblatt im Anhang eingesehen werden. Multipliziert man die ermittelte Grenzspannung mit der Elektronenladung, erhält man nach (2) die kinetische Energie der Elektronen, wobei hier der Zweckmäßigkeit halber für Energien stets die Einheit der Elektronenvolt verwendet wird. Weiterhin sind die Frequenzen der Spektrallinien von Interesse, die sich nach der Beziehung $c = \lambda \cdot \nu$ zu $\nu = \frac{c}{\lambda}$ ergeben, wobei $c = 299792458 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ die als exakt angenommene Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist (entnommen aus [3]). Die Abweichung zur Lichtgeschwindigkeit in Luft kann vernachlässigt werden. So ergeben sich die in Tabelle 2 dargestellten Werte.

Spektrallinie	Frequenz ν in Thz	Grenzenergie eU_0 in eV	Unsicherheit u_{eU_0} in ev
Gelb	517.69	0.82	0.01
Grün	548.97	0.95	0.01
Blaugrün	609.83	1.18	0.01
Blau	687.91	1.49	0.02
Violett	740.78	1.71	0.02
Ultraviolett	821.35	1.74	0.02

Tabelle 2: Ermittelte Werte für die Abhängigkeit der Grenzenergie von der Frequenz des Lichtes

Nach der Theorie soll sich hier ein linearer Zusammenhang der Form

$$eU_0 = h \cdot \nu - W_A \tag{3}$$

zwischen Frequenz und Energie einstellen. Es muss also mit Wichtung über die Werte aus Tabelle 2 linear regressiert werden. Hier ist nun zu beachten, dass der Wert für Ultraviolett nicht ohne Schwierigkeiten zu bestimmen war. Die Spektrallinie war trotz abgedunkelter Umgebung schwer zu erkennen, bzw. schwer scharf zu stellen. Aus diesem Grund ist die Aussagekraft des gemessenen Wertes anzuzweifeln. Er wird in der Regression nicht verwendet. In Abbildung 3 ist die grafische Darstellung der Messwerte sowie der Regression

zu betrachten. Die ermittelten Werte der Proportionalitätskonstante h , Planck'sches Wirkungsquantum genannt, und der Austrittsarbeit W_A sind ebenfalls der Grafik zu entnehmen. Auf die Austrittsarbeit soll im weiteren Verlauf jedoch nicht näher eingegangen werden.

Weiterhin von Interesse ist die Grenzfrequenz ν_G des Lichtes, bei der keine Elektronen herausgelöst werden, d.h. bei der die Grenzspannung $U_0=0$ ist. Diese erhält man dann aus (3):

$$\begin{aligned} \bar{\nu}_G &= \frac{W_A}{h} \\ &= 310 \text{ THz.} \end{aligned}$$

Grafisch ist sie der Schnittpunkt der Regressionsgeraden mit der Abszisse. Für die Unsicherheit dieses Wertes gilt nach dem Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz

$$\begin{aligned} u_{\nu_G} &= \sqrt{\left(\frac{u_{W_A}}{h}\right)^2 + \left(\frac{u_h \cdot W_A}{h^2}\right)^2} \\ &= 7 \text{ THz.,} \end{aligned}$$

sodass sich der Endwert

$$\nu_G = (310 \pm 7) \text{ THz}$$

ergibt. Dies entspräche Licht aus dem Infrarotbereich, für das menschliche Auge nicht wahrnehmbar.

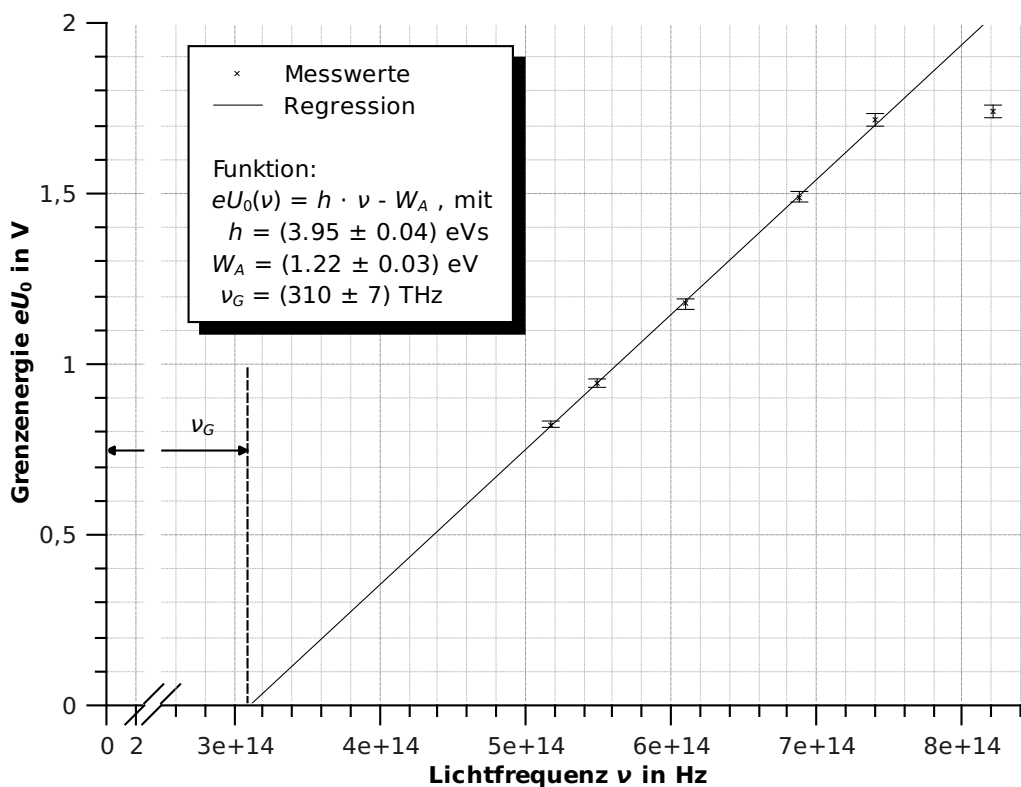


Abbildung 3: Grafische Darstellung der Teilversuchsergebnisse

2.3 Überprüfung der Abhängigkeit zwischen Grenzspannung und Lichtintensität

Zuletzt erfolgte eine erneute Messung der Grenzspannung für die Spektrallinien Grün, Blau und Violett, jedoch jeweils mit durch Filter veränderte Lichtintensitäten. Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 4 ersichtlich.

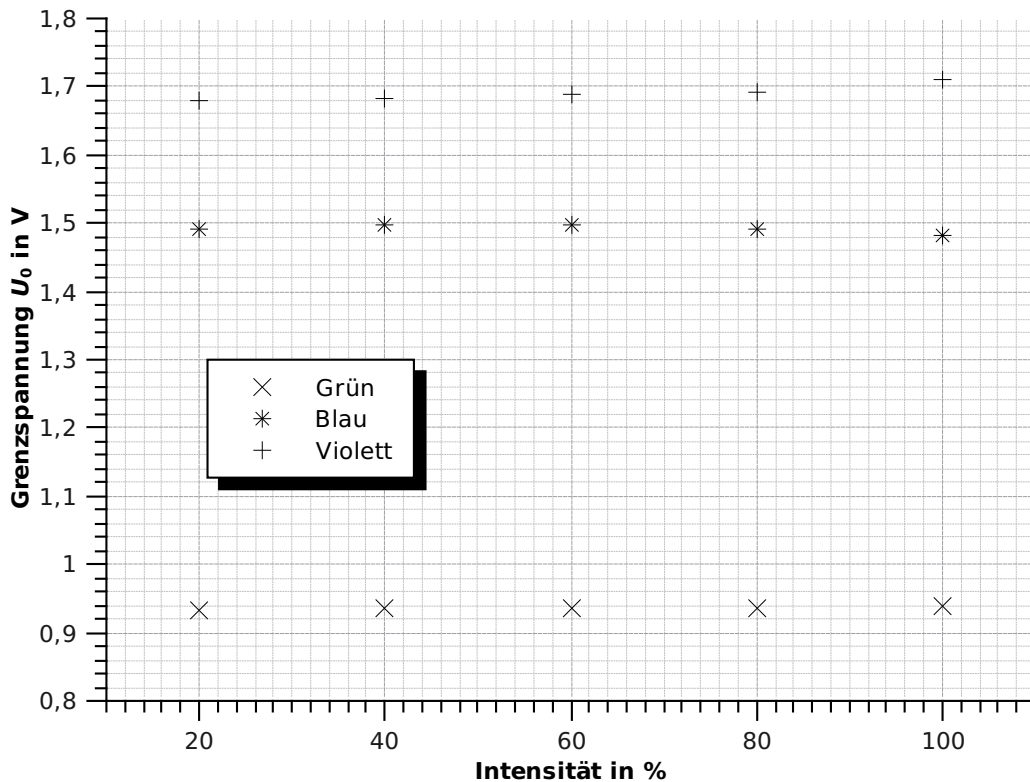


Abbildung 4: Darstellung der Grenzspannung in Abhängigkeit der Lichtintensität

Sieht man von leichten Variationen ab, so kann festgehalten werden, dass bei den Spektrallinien für jegliche Intensitäten eine konstante Grenzspannung U_0 gemessen wurde. Es besteht also keine Abhängigkeit zwischen diesen Größen. Die aus der Wellentheorie des Lichtes resultierenden Vorhersagen scheitern hier also.

3 Fehler- und Ergebnisdiskussion

Ein Vergleich mit dem Referenzwert $h = 4.13567$ eVs (aus [4]) zeigt, dass der in Abschnitt 2.2 ermittelte Wert um nur 4.4% abweicht. Allerdings schließt die Unsicherheit den Referenzwert nicht ein, sodass von einer unbekannt systematischen Fehlerquelle ausgegangen werden muss. Diese kann mehrere Ursachen haben. Zum einen stellte es sich als sehr schwierig heraus, die Messanordnung derart zu justieren, dass eine scharfe Spektrallinie direkt in die Vorrichtung aus Kathode und Anode fällt. Auch kann nicht sicher sein, dass trotz abgedunkelter Umgebung nicht doch nichtchromatisches Licht in die Vorrichtung fiel und das Ergebnis verfälschte. Weiterhin wurden die Wellenlängen des einfallenden Lichtes als fehlerfrei betrachtet, was nicht unbedingt der Fall sein muss. Eine Angabe von Wellenlängenunsicherheiten würde in einer größeren Unsicherheit des Endwertes resultieren und so möglicherweise bereits zu Konsistenz der Werte führen.

Weiterhin lassen sich Fehler in den elektrischen Messgeräten nicht ausschließen. Das Messen von Strömen im Picoamperebereich ist wegen des Innenwiderstandes des Amperemeters nicht besonders genau. Auch Störströme in unzureichend isolierten Verkabelungen würden sich stark auf die Werte der elektrischen Größen auswirken. Eine Überprüfung der Messgeräte brächte hier Gewissheit.

Zu guter Letzt ist nicht bekannt, ob der Raum zwischen Kathode und Anode evakuiert war. Sollte das nicht der Fall sein, so könnten die Elektronen mit Gasatomen gestoßen und damit Energie verloren haben, die in der betrachteten Energiebilanz nicht beachtet wurde. Dadurch wäre eine geringere Grenzspannung nötig und die Regression lieferte ein zu kleines Planck'sches Wirkungsquantum, wie es hier der Fall ist.

Alles in Allem war der Versuch jedoch zufriedenstellend. Die Größenordnung des ermittelten Wertes ist korrekt und ein Vergleich mit anderen Protokollen zeigt, dass eine Abweichung von 4.4% sehr gering ist. Eine rechnerische Betrachtung der diskutierten Fehlerquellen brächte möglicherweise eine Vergrößerung der Unsicherheit, sodass die Werte dann konsistent wären.

4 Anhang

I Datenblatt der Rechnungen in OpenOffice Calc

II Handschriftliche Protokollierung des Versuches

Literatur

- [1] Skript: „Physikalisches Grundpraktikum - Mechanik und Thermodynamik“ von Dr. Uwe Müller, Berlin 2005
- [2] Skript: „Physikalisches Grundpraktikum - Einführung in die Messung, Auswertung und Darstellung experimenteller Ergebnisse in der Physik“ von Dr. Uwe Müller, Berlin 2007
- [3] „Naturkonstanten“ (http://www.ptb.de/de/naturkonstanten/_zahlenwerte.html), Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Stand: 5.7.2009
- [4] „Physical Constants“, (http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?hev|search_for=universal_in!), National Institute of Standards and Technology, Stand: 5.7.2009

Datenblatt der Rechnungen in OpenOfficeCalc

U [V]	I [pA]	u_U [V]	u_I [pA]	Messbereich I [pA]	Skalenteil I	1 Digit U
-14	-4,6	0,150	0,2	10	0,1	0,01
-13	-4,3	0,140	0,2	10	0,1	0,01
-11	-4,1	0,120	0,2	10	0,1	0,01
-9	-3,9	0,100	0,2	10	0,1	0,01
-7	-3,8	0,080	0,2	10	0,1	0,01
-5,01	-3,8	0,060	0,2	10	0,1	0,01
-3	-3,7	0,031	0,2	10	0,1	0,001
-2,8	-3,7	0,029	0,2	10	0,1	0,001
-2,6	-3,7	0,027	0,2	10	0,1	0,001
-2,4	-3,7	0,025	0,2	10	0,1	0,001
-2,2	-3,7	0,023	0,2	10	0,1	0,001
-2	-3,7	0,021	0,2	10	0,1	0,001
-1,8	-3,7	0,019	0,2	10	0,1	0,001
-1,6	-3,7	0,017	0,2	10	0,1	0,001
-1,4	-3,6	0,015	0,2	10	0,1	0,001
-1,2	-3,6	0,013	0,2	10	0,1	0,001
-1	-3	0,011	0,2	10	0,1	0,001
-0,8	-0,7	0,009	0,2	10	0,1	0,001
-0,75	2,8	0,009	0,2	10	0,1	0,001
-0,7	9,2	0,008	0,2	10	0,1	0,001
-0,65	23	0,008	0,95	30	1	0,001
-0,6	56	0,007	2	100	1	0,001
-0,55	115	0,007	9,5	300	10	0,001
-0,5	295	0,006	9,5	300	10	0,001
-0,45	520	0,006	20	1000	10	0,001
-0,4	950	0,005	50	3000	10	0,001
-0,2	4400	0,003	200	10000	100	0,001
0	9500	0,001	200	10000	100	0,001
0,2	13500	0,003	950	30000	1000	0,001
0,4	18000	0,005	950	30000	1000	0,001
0,6	22000	0,007	950	30000	1000	0,001
0,8	26000	0,009	950	30000	1000	0,001
1	30000	0,011	2000	100000	1000	0,001
1,2	33000	0,013	2000	100000	1000	0,001
1,4	36000	0,015	2000	100000	1000	0,001
1,6	38000	0,017	2000	100000	1000	0,001
1,8	41000	0,019	2000	100000	1000	0,001
2	43000	0,021	2000	100000	1000	0,001
2,2	45000	0,023	2000	100000	1000	0,001
2,4	47000	0,025	2000	100000	1000	0,001
2,6	49000	0,027	2000	100000	1000	0,001
2,8	50000	0,029	2000	100000	1000	0,001
3	52000	0,040	2000	100000	1000	0,01
5	60000	0,060	2000	100000	1000	0,01
8	66000	0,090	2000	100000	1000	0,01
10	68000	0,110	2000	100000	1000	0,01
15	71000	0,160	2000	100000	1000	0,01
20	71000	0,210	2000	100000	1000	0,01
25	72000	0,260	2000	100000	1000	0,01
30	73000	0,310	2000	100000	1000	0,01
35	73000	0,360	2000	100000	1000	0,01
39,99	73000	0,500	2000	100000	1000	0,1
50	74000	0,600	2000	100000	1000	0,1
60	74000	0,700	2000	100000	1000	0,1

Messung	U_0 [V] - gelb	U_0 [V] - gruen	U_0 [V] - blaugrün	U_0 [V] - blau	U_0 [V] - violett	U_0 [V] - ultraviolett	
1		-0,822	-0,945	-1,181	-1,489	-1,715	-1,750
2		-0,819	-0,946	-1,167	-1,488	-1,713	-1,723
3		-0,824	-0,946	-1,171	-1,489	-1,715	-1,734
4		-0,825	-0,943	-1,178	-1,488	-1,714	-1,744
5		-0,822	-0,946	-1,179	-1,488	-1,714	-1,744
6		-0,820	-0,946	-1,182	-1,489	-1,712	-1,738
Mittelwert $\overline{U_0}$		-0,822	-0,945	-1,176	-1,489	-1,714	-1,739
Standardabweichung s	0,00228035		0,00121106	0,00598888	0,00054772	0,00116905	0,00951665
Vertrauensbereich z	0,00093095		0,00049441	0,00244495	0,00022361	0,00047726	0,00388516
syst. Messabweichung u_s	0,00922000		0,01045333	0,01276333	0,01588500	0,01813833	0,01838833
Messunsicherheit u_{U_0}	0,00926688		0,01046502	0,01299540	0,01588657	0,01814461	0,01879429
Endergebnis U_0							

Lichtgeschw.	c	299792458 m/s				
elem.Ladung	e	1,60E-19				
	Wellenlänge λ in m	Frequenz f in Hz	U_0 in V	u_{U_0} in V	E_{kin} in eV	$u_{E_{kin}}$ in eV
gelb	5,79E-07	517686855465377	0,82200000	0,00926688	0,8220000	0,00926688
gruen	5,46E-07	548969891961179	0,94533333	0,01046502	0,9453333	0,01046502
blaugrün	4,92E-07	609830061025224	1,17633333	0,01299540	1,1763333	0,01299540
blau	4,36E-07	687912937127123	1,48850000	0,01588657	1,4885000	0,01588657
violett	4,05E-07	740777015072894	1,71383333	0,01814461	1,7138333	0,01814461
ultraviolett	3,65E-07	821349200000000	1,73883333	0,01879429	1,7388333	0,01879429

$h = 3,956312654416153e-15 \text{ +/- } 4,147847018857723e-17$
 $WA = 1,228031297818507e+00 \text{ +/- } 2,435376776365984e-02$

h	3,96E-015	4,15E-017	0,956
Wa	1,23E+000	2,44E-002	
$\nu_G = WA/h$	3,10E+014	6,96E+012	
λ_{G_0}	9,66E-007		

Spektrallinie	Frequenz ν in Thz	Grenzenergie E_{U_0} in eV	Unsicherheit $u_{E_{U_0}}$ in eV
Gelb	517,69	0,82	0,01
Grün	548,97	0,95	0,01
Blaugrün	609,83	1,18	0,01
Blau	687,91	1,49	0,02
Violett	740,78	1,71	0,02
Ultraviolett	821,35	1,74	0,02