

A1: Photoeffekt

Verfasserin: Dan-Nha Huynh

Versuchspartner: Marco Kraft

Versuchsbetreuer: R. Mankowsky

Versuchsdatum: 28.Mai 2008

A1: PHOTOEFFEKT **1**

1. ZIELSTELLUNG	3
2. VERWENDETE MESSINSTRUMENTE	3
3. VERSUCHSAUFBAU	3
4. MESSUNG DES PHOTOSTROMS IN ABHÄNGIGKEIT VON DER ANODENSPANNUNG FÜR DIE GELBE SPEKTRALFARBE	3
4.1 MESSDATEN	4
4.2 DARSTELLUNG DER KENNLINIE DES GELBEN LICHTES	4
4.3 INTERPRETATION	6
5. BESTIMMUNG DES PLANCKSCHEN WIRKUNGSQUANTUMS	6
5.1 MESSDATEN	7
5.2 DARSTELLUNG DER BREMSSPANNUNG IN ABHÄNGIGKEIT VON DER FREQUENZ	7
5.3 BERECHNUNG DES PLANCKSCHEN WIRKUNGSQUANTUMS UND DER GRENZFREQUENZ	8
5.4 MESSUNSICHERHEIT	9
5.5 ERGEBNIS	9
5.6 KRITISCHE BETRACHTUNG	9
6. MESSUNG DER BREMSSPANNUNG ALS FUNKTION DER LICHTINTENSITÄT	10
6.1 MESSDATEN	10
6.2 GRAPHISCHE DARSTELLUNG	10
6.3 INTERPRETATION UND KRITISCHE BETRACHTUNG	11
7. KRITISCHE BETRACHTUNG	11
8. APPENDIX	12

1. Zielstellung

Beobachtung des Teilchencharakters von Licht und Berechnung des planckschen Wirkungsquantums

Hinweis: Für weitere Informationen zu den physikalischen Grundlagen und den Aufgabenstellungen zu diesem Versuch sei auf das Skriptⁱ verwiesen.

2. Verwendete Messinstrumente

Digitalmultimeter zur Messung der Anodenspannung (DMM; $e_s(\text{DMM})=1 \text{ LSD}$), Analog-Multimeter zur Messung der Stromstärke (Picoamperemeter; $e_s(\text{Picoamperemeter})$ abh. vom gewähltem Messbereich)

3. Versuchsaufbau

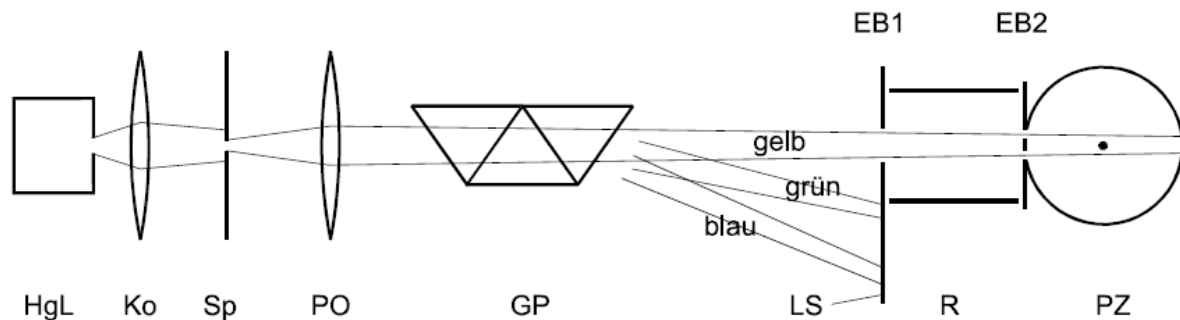


Abbildung 3-1ⁱⁱ

HgL: Quecksilberhochdrucklampe, Ko: Kondensator, Sp: Spalt, Projektionsobjektiv, GP: Geradsichtprisma, LS: Leuchtschirm, EB: Eintrittsblende, R: Rohr, PZ: Photozelle

4. Messung des Photostroms in Abhängigkeit von der Anodenspannung für die gelbe Spektralfarbe

Für die gelbe Spektrallinie ($\lambda = 579,1\text{nm}$) wird der Photostrom I_{ph} bei 26 verschiedenen Anodenspannungen U gemessen, wobei um 0V in kleineren Schritten bezüglich der Anodenspannung gemessen wird, da in diesem Bereich größere Änderungen der Stromstärke auftreten als an den End- und Anfangspunkten.

Messdaten

Messung i	Anodenspannung U/V	Stromstärke I_{ph}/nA
1	-14,97	-0,0076
2	-10,00	-0,0066
3	-5,00	-0,0055
4	-2,00	-0,0046
5	-1,000	-0,0045
6	-0,500	0,6
7	-0,250	1,2
8	-0,150	2,7
9	-0,050	3,9
10	0,000	5,5
11	0,050	5,7
12	0,150	7,2

13	0,250	8,3
14	0,501	10
15	1,000	13
16	2,00	16
17	5,00	22
18	10,00	26
19	15,00	28
20	20,00	30
21	25,00	32
22	30,00	33
23	35,00	33
24	40,00	33
25	50,00	33
26	60,00	33

Tabelle 4.1-1

Darstellung der Kennlinie des gelben Lichtes

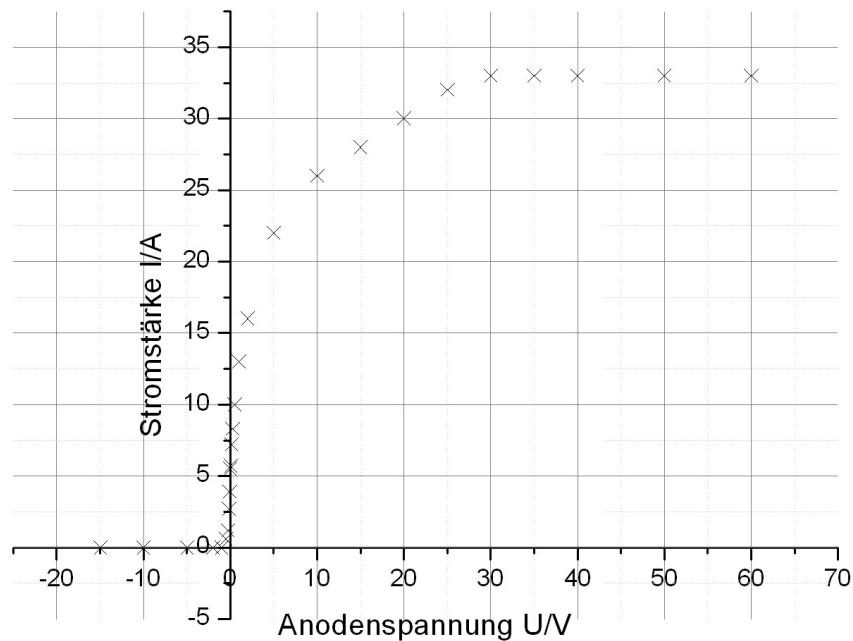


Abbildung 4.2-1: Darstellung der Kennlinie für alle U

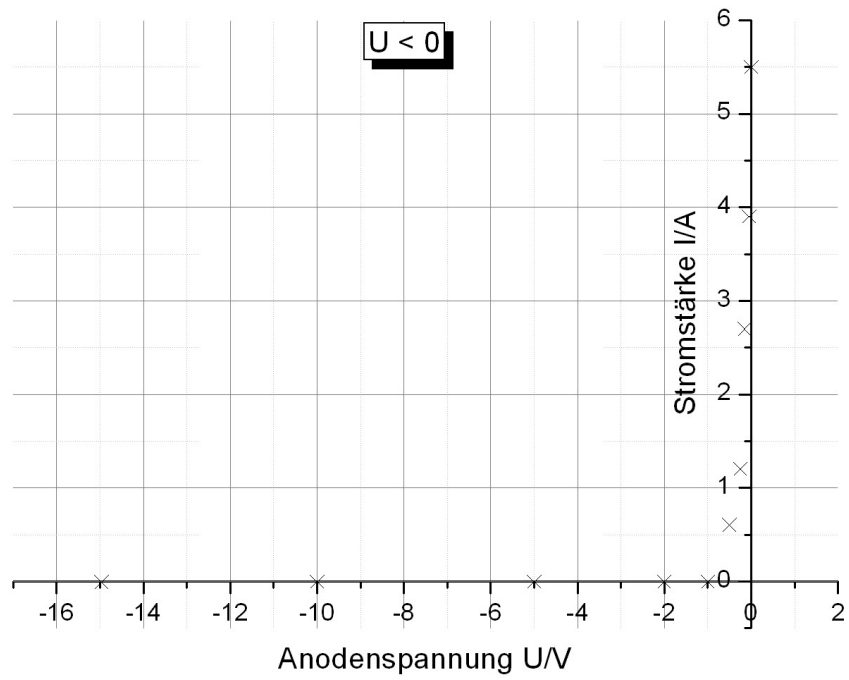


Abbildung 4.2-2: Darstellung der Kennlinie für $U < 0$ (Bremsspannung)

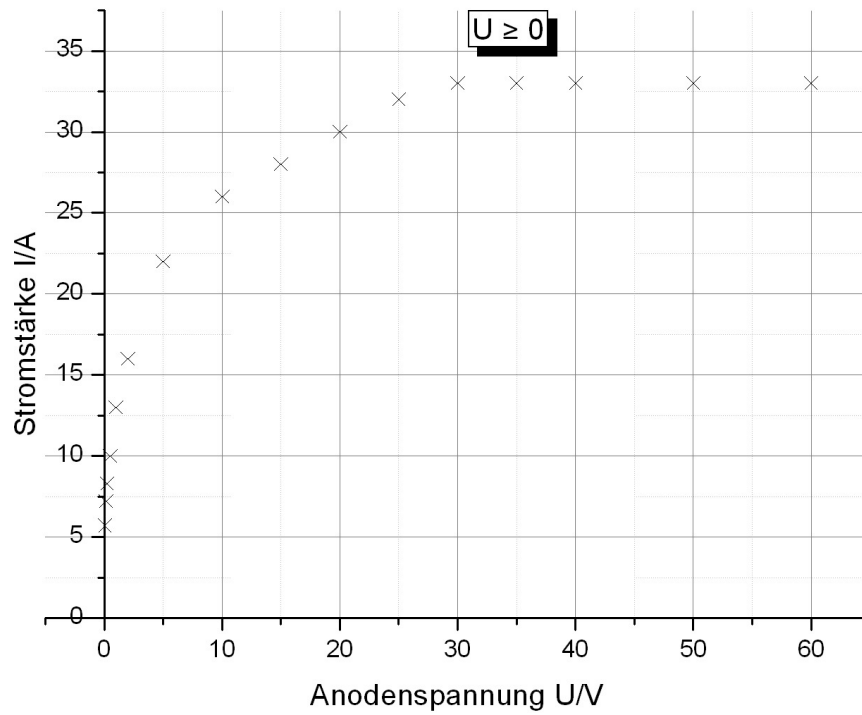


Abbildung 4.2-3: Darstellung der Kennlinie für $U \geq 0$ (Saugspannung)

Hinweis: Eine auf Millimeterpapier manuell angefertigte Version der Abbildungen 4.2-2 und 4.2-3 findet sich im Anhang.

Interpretation

Für das Intervall der Anodenspannung von -15V bis -1V wird ein kleiner negativer Strom, d.h. ein Strom von Anode zu Kathode, wahrgenommen, dieser bewegt sich im Bereich weniger Picoampere. Dies kann durch das zusätzliche Herauslösen von Elektronen – wohl möglich durch Streulicht – aus der Anode der Photozelle erklärt werden, welche durch die Bremsspannung zur Kathode hin beschleunigt werden.

Ab -1V lässt sich ein positiver Strom messen. Dabei ist im Bereich von -0,5V bis 0,0V die Bremsspannung nicht mehr groß genug um die kinetische Energie der Elektronen (aus der Kathode) vollständig in potentielle Energie umzuwandeln, wodurch bei Verkleinerung der Bremsspannung die Stromstärke kräftig ansteigt.

Ebenso ist im Bereich von 0V bis 30V ein positiver Anstieg zu beobachten, welcher jedoch bis zum Erreichen von 30V kleiner wird und bei 30V sogar auf Null sinkt. Jener Anstieg ist mit der Beschleunigung der Photoelektronen in Richtung Anode durch die angelegte positive Spannung (Saugspannung) zu erklären. Bei kleineren Saugspannungen reicht dabei die elektrische Feldstärke nicht aus um alle herausgelösten Photoelektronen in Richtung der Anode zu beschleunigen, es wird hier daher ein geringerer Photostrom gemessen als bei höheren Saugspannungen. Es stellt sich jedoch ab einer Spannung von 30V eine Sättigung ein, der Anstieg sinkt wie bereits erwähnt auf Null. Ist nämlich die Spannung hoch genug, können nun alle Photoelektronen zur Anode beschleunigt werden. Wird die Spannung dann erhöht, stellt sich auch dann kein größerer Photostrom ein, da nicht mehr Photoelektronen an der Anode ankommen können als herausgelöst werden.

5. Bestimmung des planckschen Wirkungsquantums

Geht man nun also von dem Teilchencharakter des Lichtes aus, so gilt nach der Einsteinschen Energiebilanz:

$$E_{kin} = eU_0 = h\nu - W_A \quad (\text{Gl. 5-1})$$

E_{kin} : kinetische Energie

e : Elementarladungⁱⁱⁱ ($1,602 \cdot 10^{-19}\text{C}$)

U_0 : Bremsspannung (Spannung für die Stromstärke $I = 0\text{A}$)

ν : Frequenz

W_A : Achsenabschnitt (Austrittsarbeit bei zwei gleichartigen Elektroden)

Mit dieser Gleichung lässt sich dann das plancksche Wirkungsquantum h bestimmen.

Hierzu wird die Bremsspannung in Abhängigkeit von der Frequenz bzw. von der Wellenlänge gemessen.

Messdaten

Messung i	U₀(Gelb) λ = 579,1nm ν=5,17687·10 ¹⁴	U₀(Grün) λ = 546,1nm ν=5,4897·10 ¹⁴	U₀(Blaugrün) λ = 491,6nm ν=6,0983·10 ¹⁴	U₀(Blau) λ = 435,8nm ν=6,87913·10 ¹⁴	U₀(Violett) λ = 404,7nm ν=7,40777·10 ¹⁴	U₀(Ultraviolett) λ = 365,0nm ν=8,2135·10 ¹⁴
1	-0,657	-0,784	-1,232	-1,343	-1,518	-2,65
2	-0,652	-0,784	-1,233	-1,342	-1,516	-2,56
3	-0,653	-0,785	-1,237	-1,338	-1,519	-2,61
4	-0,657	-0,785	-1,232	-1,328	-1,517	-2,65
5	-0,659	-0,785	-1,238	-1,339	-1,518	-2,61
6	-0,657	-0,784	-1,121	-1,337	-1,516	-2,61

Tabelle 5.1-1

Darstellung der Bremsspannung in Abhängigkeit von der Frequenz

Aus den Bremsspannungen der jeweiligen Frequenzen kann nun als bester Wert für U₀ das arithmetische Mittel gebildet werden. Anschließend wird der Vertrauensbereich, d.h. die statistische Messunsicherheit, bestimmt:

	U₀(Gelb) λ = 579,1nm ν=5,17687·10 ¹⁴	U₀(Grün) λ = 546,1nm ν=5,4897·10 ¹⁴	U₀(Blaugrün) λ = 491,6nm ν=6,0983·10 ¹⁴	U₀(Blau) λ = 435,8nm ν=6,87913·10 ¹⁴	U₀(Violett) λ = 404,7nm ν=7,40777·10 ¹⁴	U₀(Ultraviolett) λ = 365,0nm ν=8,2135·10 ¹⁴
arithmetischer Mittelwert \bar{U}_0 / V	-0,655833333	-0,7845	-1,2155	-1,337833333	-1,517333333	-2,615
Vertrauensbereich $\bar{\sigma} / V$	0,001108051	0,00022361	0,018929254	0,002181997	0,000494413	0,01360147

Tabelle 5.2-1

Die systematische Messabweichung der Bremsspannung wird entsprechend Abschnitt 2 angenommen.

Die jeweiligen Messunsicherheiten für U₀ – u_{U₀} – ergeben sich dann aus der pythagoreischen Fehlerfortpflanzung von systematischer e_s(U₀) und statistischer (zufälliger) Messabweichung e_z(U₀):

$$u_{U_0} = \sqrt{e_s^2(U_0) + e_z^2(U_0)} \quad (\text{Gl. 5.2-1})$$

Mit den berechneten Messunsicherheiten u_{U₀} lassen sich dann Fehlerbalken für die graphische Darstellung von U₀(ν) erzeugen, sodass beim Fit eine Gewichtung vorgenommen werden kann. Die Frequenzen bzw. die Wellenlängen werden hier als fehlerfrei angenommen.

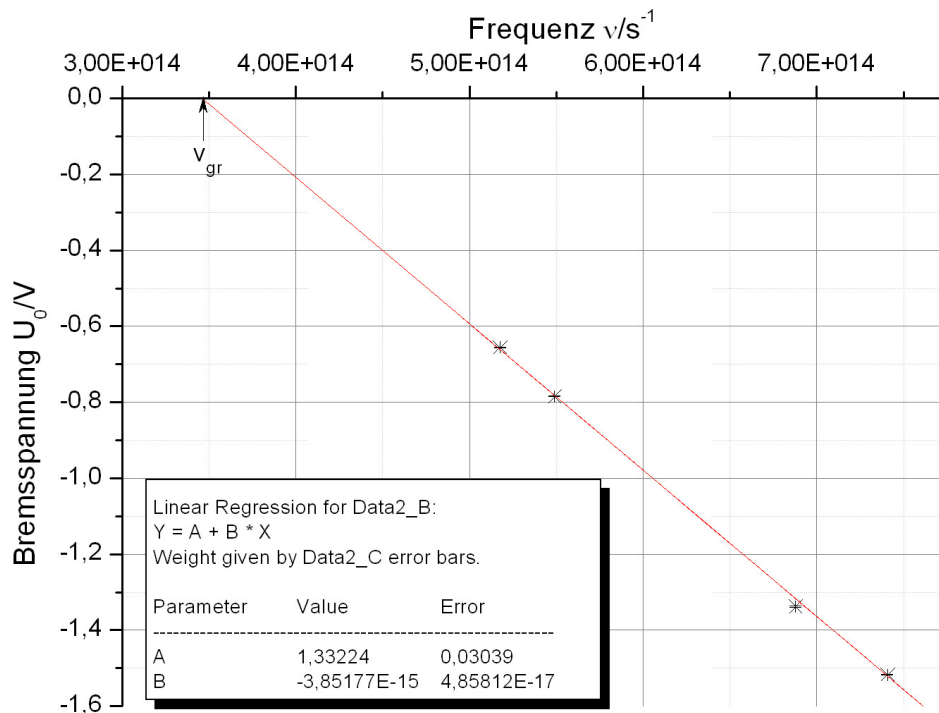


Abbildung 5.2-1

Anmerkung: Auf die Verwendung der für blaugrünes und ultraviolettes Licht verwendeten Datenpunkte wurde verzichtet, da diese das Ergebnis des Fits zu sehr verfälscht hätten. Es liegt demnach wohlmöglich ein grober Fehler bezüglich der Messungen für jene Lichtfarben vor. Mehr hierzu finden sie in Abschnitt 5.6.

$$U_0(\nu) = B\nu - A = (-3,85 \pm 0,05) \cdot 10^{-15} \text{Vs} \cdot \nu - (1,33 \pm 0,03) \text{V}$$

B: Geradenanstieg

A: Ordinatenabschnitt

Abgelesene Grenzfrequenz:

$$\nu_{gr} = (3,49 \pm 0,25) \text{s}^{-1}$$

Berechnung des planckschen Wirkungsquantums und der Grenzfrequenz

Für die Bremsspannung gilt dann nach Gl. 5-1:

$$U_0(\nu) = \frac{h}{e} \cdot \nu - \frac{W_A}{e} = B\nu - A \quad (\text{Gl. 5.3-1})$$

Somit berechnet sich h folgendermaßen:

$$h = eB \quad (\text{Gl. 5.3-2})$$

$$\underline{\underline{\tilde{h} = 6,171 \cdot 10^{-35} \text{ Js}}}$$

Die Grenzfrequenz ν_{gr} , also jene Frequenz, für die die Photoenergie groß genug ist, um Elektronen aus der Kathode herauszulösen, ist dabei die Schnittstelle des linearen Fits von Abbildung 5.2-1 mit der Abszisse (Frequenzachse).

$$U_0(\nu) = 0 = B \nu_{gr} - A$$

$$\nu_{gr} = \frac{A}{B} \quad (\text{Gl. 5.3-3})$$

$$\underline{\underline{\tilde{\nu}_{gr} = 3,459 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}}}$$

Messunsicherheit

Die Messunsicherheit von h ergibt sich folgendermaßen, sofern der Wert der Elementarladung gegenüber dem Geradenanstieg als fehlerfrei angenommen wird:

$$u_h = |e \cdot u_B| \quad (\text{Gl. 5.4-1})$$

$$\underline{\underline{u_h \approx 7,78 \cdot 10^{-36} \text{ Js}}}$$

Aus der pythagoreischen Fehlerfortpflanzung folgt für die Messunsicherheit von ν_{gr} :

$$u_{\nu_{gr}} = \sqrt{\left(-\frac{A}{B^2} \cdot u_B\right)^2 + \left(\frac{1}{B} \cdot u_A\right)^2} \quad (\text{Gl. 5.4-2})$$

$$\underline{\underline{u_{\nu_{gr}} = 9,02 \cdot 10^{12} \text{ s}^{-1}}}$$

Ergebnis

$$h = \tilde{h} \pm u_h = (6,2 \pm 0,8) \cdot 10^{16} \text{ Js}$$

$$\nu_{gr} = \tilde{\nu}_{gr} \pm u_{\nu_{gr}} = (3,46 \pm 0,09) \cdot 10^{16} \text{ Js}$$

Kritische Betrachtung

Für die Planckkonstante h wurde folgender Referenzwert^{iv} gefunden:

$$h = (6,626\ 068\ 96 \pm 0,000\ 000\ 33) \cdot 10^{-34} \text{ J s}$$

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$$

(Die Messunsicherheit wird hier gegenüber der in 5.4 errechneten Messunsicherheit von h vernachlässigt.)

Dies ergibt eine Abweichung des errechneten Wertes vom Referenzwert von ca. -7%. Jedoch stimmt der berechnete Wert innerhalb seiner Fehlergrenzen mit dem Referenzwert überein. Eine mögliche Fehlerquelle für jene Abweichung könnte die fehlerhafte Justierung insbesondere der Photozelle sein,

sodass die jeweilige gewählte Spektrallinie nicht ordentlich auf die Photozelle abgebildet wurde. Dies war wohl auch speziell bei der blaugrünen und ultravioletten Linie der Fall, wobei sich die Justierung bei beiden Linien aufgrund ihrer geringen Intensität im Vergleich zu den anderen Spektrallinien als besonders schwierig erwies. Es konnte nicht genau erkannt werden ob die Photozelle auch „getroffen“ wurde. Für eine aussagekräftigere Grafik bzw. Fit wären jedoch mehr Datenpunkte als die letztlich verwendbaren von Vorteil gewesen.

Des Weiteren wurde die Justierung durch das Schließen des Rohres (s. Abbildung 3-1), welches eine Verschiebung der Photozelle bewirkte, oft wieder zunichte gemacht. Eine weniger Empfindliche Anordnung bezüglich des Schließens des Rohres bzw. eine bessere Befestigung der Photozelle nach der Justierung wäre daher wünschenswert.

6. Messung der Bremsspannung als Funktion der Lichtintensität

Für verschiedene Lichtintensitäten wird jeweils die Bremsspannung gemessen. Dies geschieht für drei verschiedene Lichtfrequenzen (grün, violett, blau).

Anmerkung: Die Aufgabenstellung sieht vor, dass mit Hilfe eines gestuften Graufilters die Intensität verändert wird. Jedoch war es am verwendeten Versuchsplatz am Ende nicht mehr möglich die Photozelle ausreichend gut zu justieren, sodass sich beim Aufsetzen des Graufilters die Photozelle derart verschob, dass eine anständige Messung der Bremsspannung nicht mehr möglich war. Statt der Benutzung des Graufilters wurde daher die Spaltöffnung/Blende zur Änderung der Lichtintensität verwendet. Die dritte Spaltöffnung entspricht dabei einer Lichtdurchlässigkeit von 100%. Aus Zeitgründen wurden lediglich jeweils drei Messungen für drei verschiedene Spaltöffnungen durchgeführt.

Messdaten

Spaltöffnung	Öffnung/mm	U ₀ (Violett) λ = 404,7nm ν=7,40777·10 ¹⁴	U ₀ (Blau) λ = 435,8nm ν=6,87913·10 ¹⁴	U ₀ (Grün) λ = 546,1nm ν=5,4897·10 ¹⁴
1	0,4	-1,600	-1,434	-0,810
2	0,8	-1,592	-1,323	-0,783
3	1,0	-1,618	-1,301	-0,798

Tabelle 6.1-1

Graphische Darstellung

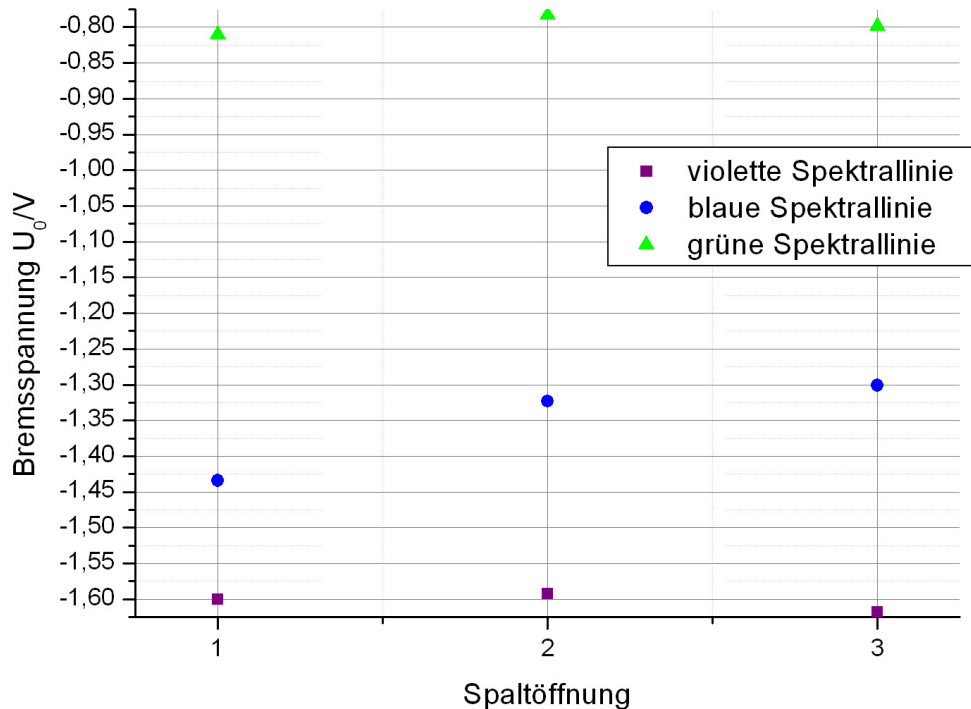


Abbildung 6.2-1

Interpretation und kritische Betrachtung

Für ein aussagekräftigeres Ergebnis wären wesentlich mehr Datenpunkte nötig gewesen. Die Messung von mehr als drei Datenpunkten konnte aus den zu Anfang dieses Abschnitts genannten Gründen nicht erfolgen.

Jedoch lässt sich zumindest ein Trend bzw. eine Erwartung bezüglich der Abbildung 6.2-1 feststellen, wobei jene Tendenz gerade für die blaue Spektrallinie eher schwer einsehbar ist:

Trotz verschiedener Intensitäten, bleibt die Bremsspannung für die jeweilige Spektrallinie die gleiche. Die Bremsspannung und damit die kinetische Energie der Elektronen sind also unabhängig von der Intensität. Gleichzeitig hängt die Höhe der Bremsspannung jedoch von der Frequenz des Lichtes ab.

7. Kritische Betrachtung

Neben den in 5.6 und 6.3 auftretenden Problemen gab es noch weitere Störfaktoren:

- In Abschnitt 4.3 wurde bereits erklärt wie es zu einem „Gegenstrom“ von Anode zu Kathode kommen kann. Dieser bewirkt, dass alle gemessenen Werte für den Photostrom um wenige Picoampere geringer ausfallen als ohne jenen Gegenstrom. Um diesen geringer zu halten wäre es daher Zweckmäßig Anoden mit höherer Austrittsarbeit zu verwenden. Zudem muss verhindert werden, dass überhaupt durch Streulicht insbesondere von Taschenlampen und anderen Versuchsplätzen Elektronen aus der Anode herausgelöst werden können. Eine bessere

Lichtabschirmung wäre daher wünschenswert, zumal das Einfallen von andersfarbigem Licht in die Photozelle die Messungen in Abschnitt 5 und 6, welche jeweils bei monochromatischem Licht durchgeführt werden, verfälschen können.

- Aufgrund möglicherweise unzureichender Isolation der Verkabelungen kann es zu Störströmen kommen, welche die den Stromfluss zwischen Kathode und Anode beeinflussen. Dies betrifft außerdem auch das Netzgerät. Eine bessere Isolation wäre daher von Vorteil.
- Fraglich ist ob die Photozelle ausreichend evakuiert ist. Ist dies nämlich nicht der Fall, so ist die kinetische Energie und somit die gemessene Bremsspannung geringer als im Vakuum, da durch Zusammenstoß der Elektronen mit den Gasatomen/-molekülen die Elektronen abgebremst werden können.
- Da insbesondere in Abschnitt 5 aufgrund der geringen Intensität bei blaugrünem und ultraviolettem Licht die Messungen an diesen Stellen unbrauchbar waren, wäre es sicherlich sinnvoll eine höhere Intensität durch Laserlicht statt dem Licht der Quecksilberhochdrucklampe zu verwenden.

8. Appendix

- Quellenangabe, verwendete Programme
- Manuell angefertigte graphische Darstellung des Photostrom in Abhängigkeit von der Anodenspannung
- Messdatenprotokoll

Quellenangabe:

ⁱ Vgl. [21-26], *Physikalisches Grundpraktikum – Mechanik und Thermodynamik 2005*, Humboldt-Universität, Berlin, August 2005

ⁱⁱ [24], *Physikalisches Grundpraktikum – Mechanik und Thermodynamik 2005*, Humboldt-Universität, Berlin, August 2005

ⁱⁱⁱ CODATA 2006: http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?elsearch_for=e

^{iv} CODATA 2006: http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?hlsearch_for=h

Dieses Protokoll wurde mit Hilfe von Microsoft Word 2003 und Origin7.0 erstellt.