

PRAKTIKUM 4

ATOME, MOLEKÜLE, KONDENSIERTE MATERIE

Versuch 401: Elektronische Übergänge in Atomen

Gruppe A202

PARTH GADHAVI NOEMI RUPPERT ARIEH THILL

Versuchsdurchführung: 12. / 13. Mai 2025

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung

Ein zentraler Versuch zur Bestätigung des Zusammenhangs zwischen der Quantelung von Energien und Emissions -und Absorptionslinien ist die Untersuchung des Photoeffekts. Die Spektroskopie ermöglicht die Untersuchung des Atomaufbaus, insbesondere durch die Analyse von Spektrallinien, welche einen Ausdruck der Quantelung von Energie sind und in direktem Zusammenhang mit Lichtfrequenzen stehen.

Im ersten Versuchsteil beobachtet man die Energieabhängigkeit des Photoeffekts und es werden das Planksche Wirkungsquantum, sowie die Austrittsarbeit abgeschätzt.

Im zweiten Versuchsteil wird durch Ausmessung der Balmer-Linien das Planksche Wirkungsquantum erneut bestimmt und mit dem Ergebnis aus dem ersten Versuchsteil verglichen.

2 Der Photoeffekt

2.1 Aufbau

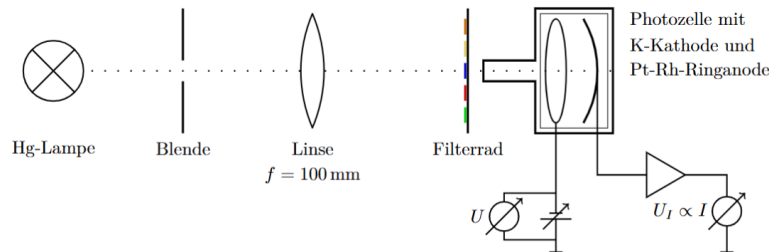


Abbildung 2.1: Aufbau für die Messung des Photoeffektes [1]

Links ist die Hg-Lampe zu sehen, in der Mitte Optik-Elemente zum Fokussieren und Filtern des Lichtes und rechts ist die Photozelle mit Gegenspannung und Strommessung. Die Quecksilber-Spektrallampe und die Photozelle werden gemäß Abbildung ?? gegenüberliegend auf dem Reiter angeordnet. Eine Irisblende vor der Lampe ermöglicht die Regulierung der Lichtintensität. Eine Linse mit einer Brennweite von $f=100\text{ mm}$ wird in diesem Abstand vor die Blende positioniert, sodass sie das Licht parallel auf den nachfolgenden Interferenzfilter mit fünf Filtern sowie eine zusätzliche Blende lenkt.

2.2 Durchführung

Eine Abschirmvorrichtung mit einem röhrenförmigen Element verhindert Streulicht. Ein Lichtfleck wird gezielt auf die Kathode projiziert, ohne ,dass die Anode beleuchtet wird.

Wenn Photonen aus der Hg-Lampe auf die Photokathode treffen, interagieren sie mit den Elektronen in dieser und überträgt dabei seine gesamte Energie $E = h\nu$ auf eines der Elektronen. Falls die übertragene Energie größer als die Austrittsarbeit W_A ist, dann kann sich das Elektron aus der Kathode lösen und zur Ringanode gelangen. Dadurch entsteht ein Stromfluss: der Photostrom I_{ph} . Durch den Einsatz der Gegenfeldmethode wird die maximale kinetische Energie, die die Elektronen beim verlassen der Kathode besitzen, bestimmt.

Bei dieser Methode wird eine Gegenspannung U_G zwischen Kathode und Anode angelegt, wodurch die Kathode im Vergleich zur Anode ein positives Potential erhält. Das dadurch erzeugte elektrische Feld verlangsamt die emittierten Elektronen auf ihrem Weg zur Anode, wodurch der Photostrom reduziert wird. Sobald die Grenzspannung U_0 erreicht ist, kommt der Photostrom vollständig zum Erliegen. Dies bedeutet, dass selbst die energiereichsten Elektronen die Anode nicht mehr erreichen können. In diesem Fall gilt die Beziehung: $E_{kin,max} = eU_0$.

Man lässt das Gegenfeld mit Hilfe einer variablen Spannungsquelle, welche sich zwischen der Kathode und der Anode befindet, ansteigen. Man erweitert die Schaltung mit Hilfe eines Spannungsteilers (Abbildung ??) aus einem 330Ω und 100Ω Widerstandes um den Messbereich zu skalieren und genauere Messungen durchzuführen.

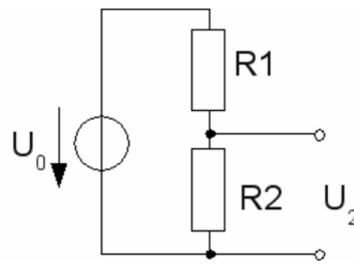


Abbildung 2.2: Spannungsteiler [2]

Die verwendete Spannungsquelle kann Spannungen von 0 V bis 12 V bereitstellen. Der Photostrom erreicht jedoch bereits bei deutlich geringeren Gegenspannungen seinen Nullpunkt, typischerweise im Bereich von wenigen Volt. Für die Messung der Grenzspannung U_0 genügt daher ein kleiner Teil des gesamten Spannungsbereichs. Die feine Justierung der Gegenspannung ist entscheidend, um den Punkt zu bestimmen, an dem der Photostrom gerade verschwindet.

Es gilt folgender Zusammenhang zwischen der abgefangenen Spannung U_2 , den Widerständen $R_1 = 330\Omega$, $R_2 = 100\Omega$ und U_0 :

$$U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_0 \quad (2.1)$$

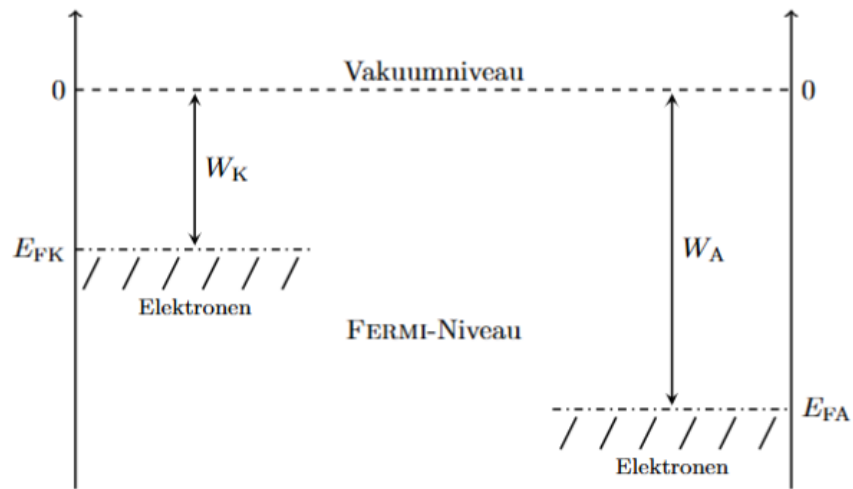
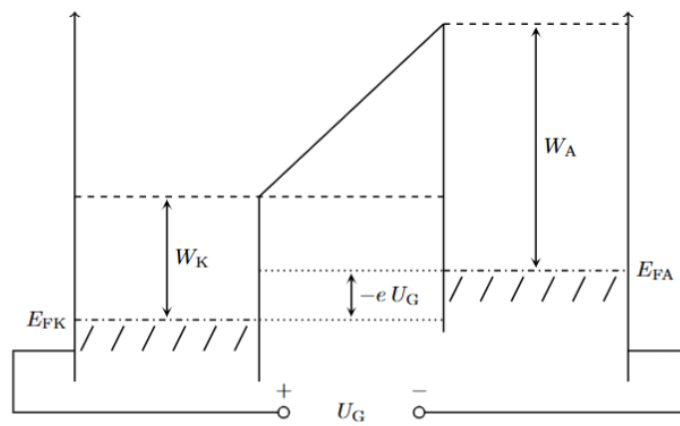
Somit wird der Spannungsbereich auf $[0, 2,8]$ V skaliert.

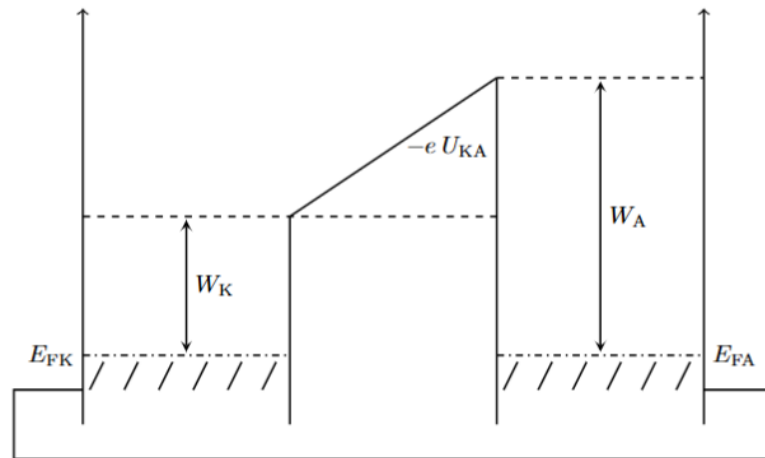
Der Anodenstrom wird über einen Messverstärker erfasst, wobei eine zum Strom proportionale Spannung mit einem Digitalmultimeter (DMM) gemessen wird. Die Gegenspannung stammt aus einem 12V-Gleichspannungsnetzteil, wobei der negative Pol mit der Anode verbunden ist, um die Elektronen abzubremesen. Diese Spannung wird mit einem weiteren DMM gemessen.

Dieser Vorgang wird für je eine unterschiedliche Wellenlänge λ des Lichtes zwei mal wiederholt (zum Ausgleich der Schwankungen), wobei die Wellenlängen mit Hilfe von Interferenzfiltern einstellbar sind.

2.2.1 Energiebilanz der Photoelektronen

Ein Elektron, dass sich in der Kathode befindet, absorbiert ein Photon mit der Energie $E = h\nu$ und verlässt die Kathode, wenn die Energie des Photons größer ist als eine bestimmte Potentialdifferenz sein: die Austrittsarbeit W_K . In Abbildung ??, ?? und ?? sind die Austrittsarbeit W_K der Kathode und die Austrittsarbeit W_A der Anode für unterschiedliche elektrische Anordnungen dargestellt.

Abbildung 2.3: Fermi-niveaus von Kathode und Anode mit Austrittsarbeit W_A [1]Abbildung 2.4: Kontaktpotential $-eU_{KA}$ [1]

Abbildung 2.5: Potential dass von der Gegenspannung $-eU_G$ induziert wird[1]

Laut der Abbildung der Fermi-niveaus ?? gilt für die Energiebilanz:

$$E = h\nu = W_K + eU_{KA} + eU_{G,0} = W_K + W_A - W_K + eU_{G,0} = W_A + eU_{G,0} \quad (2.2)$$

Aus der Frequenz des Lichtes können schließlich die Austrittsarbeit der Anode W_A und das Planck'sche Wirkungsquantum h bestimmt werden:

$$eU_{G,0} = h\nu - W_A \quad (2.3)$$

2.3 Abschätzung des Plankschen Wirkungsquantums und der Austrittsarbeit

2.3.1 Bestimmung der Grenzspannung U_0

2.3.2 Bestimmung des Plankschen Wirkungsquantums h

λ [nm]	ν [Hz]	$\overline{U_0}$ [mV]	$\Delta\overline{U_0}$ [mV]
365,00 nm	$8,21 \times 10^{14}$	2124,19	45,39
405,00 nm	$7,40 \times 10^{14}$	1605,23	47,04
463,00 nm	$6,47 \times 10^{14}$	1341,51	57,42
546,00 nm	$5,49 \times 10^{14}$	638,22	59,13
578,00 nm	$5,19 \times 10^{14}$	458,70	24,80

Tabelle 2.1: Gemittelte Abbremsspannungen $\overline{U_0}$ und deren Unsicherheiten gegen die jeweiligen Frequenzen.

Parameter	Wert
Steigung m [mV Hz ⁻¹]	$5,457 \times 10^{-12} \pm 2,953 \times 10^{-13}$
Achsenabschnitt b [mV]	$-2,360 \times 10^3 \pm 1,842 \times 10^2$
χ^2	11,56
Freiheitsgrade (dof)	3
χ^2/dof	3,85

Tabelle 2.2: Ergebnisse des gewichteten linearen χ^2 -Fits von $\overline{U_0}$ gegen ν .

$$h = (8,743 \pm 0,473) \times 10^{-34} \text{ J s}$$

2.3.3 Bestimmung der Austrittsarbeit W_A

$$W_A = (3,781 \pm 0,295) \times 10^{-19} \text{ J } ((2,360 \pm 0,184) \text{ eV})$$

2.3.4 Vergleich der Lambda-Kennlinie für unterschiedliche Intensitäten

Abbildung 2.6: Emissionslinien für mehrere Emissions Serien

2.4 Die Balmer-Serie

Das Bohrsche Atommodell beschreibt ein Atom als einen Kern, mit Elektronen die sich auf bestimmte Kreisbahnen/Energie Niveaus um den Kern bewegen. Durch Hinzugabe von Energie, so wie Photonenabsorption oder durch andere äußere Kräfte, können diese Elektronen angeregt werden, welches nun ein höheres Energieniveau hat. Um auf ein niedrigeres Energieniveau zurückzukommen muss dieses Elektron Energie, in Form eines Photons, abgeben. Diese Energie entspricht der Differenz der angeregten Ebene m und Endniveau n , wobei $m > n$, siehe ???. Es gibt für jeden Übergang einen bestimmten Namen.

Für die Übergänge der Schale lauten: Lyman-Serie ($n=1$), Balmer-Serie ($n=2$), Paschen-Serie ($n=3$), ... Diese Serien sind aber nicht alle sichtbar, die Lyman-Serie strahlt nämlich im Ultraviolett-Bereich, und ab der Paschen-Serie sind die Emissionslinien im Infrarot-Bereich. Hier zwischen liegt die Balmer-Serie, die ihre Emissionslinien im sichtbaren Bereich hat. So soll in diesem Versuchsteil die Emissionslinien der Balmer-Serie untersucht werden. Hierzu wird zuerst experimentell die Gitterkonstante des benutzten Reflexionsgitters bestimmt und anschließend die Rydberg-Konstante und Plancksche Wirkungsquantum, anhand von einem Wasserstoffatom, bestimmt werden. Zusätzlich sollen die Emissionslinien von der Deuteriumlampe untersucht werden und die Genauigkeit mit Literaturwerten verglichen werden.

2.5 Aufbau

Es wurde folgender Versuchsaufbau von ??? verwendet.

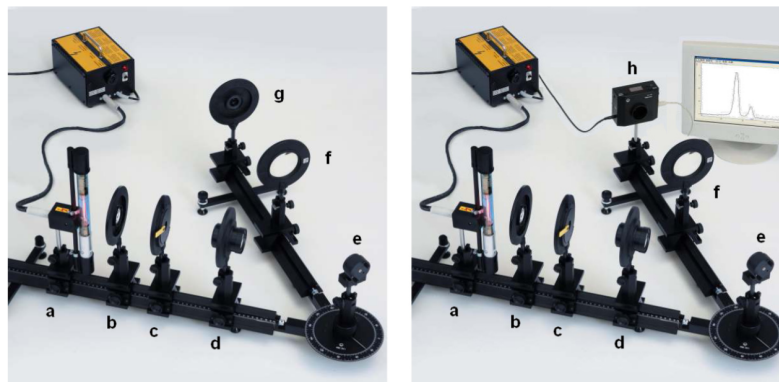


Abbildung 2.7: Versuchsaufbau mit Okular(links) und CCD-Kamera(rechts) ???

Dieser ist wie folgt aufgebaut:

Es befindet sich eine Deuteriumlampe (a), welche durch eine Sammellinse (b) mit Brennweite $f = 50\text{mm}$ auf einen verstellbaren Spalt (c) abgebildet wird. Dies soll die einfallende Lichtstrahl begrenzen. Hinter dem Spalt befindet sich ein Projektionsobjektiv (d), mit Brennweite $f = 150\text{mm}$. Dieses soll genau in Abstand seiner Brennweite zu dem Spalt stehen, damit der Lichtstrahl parallel zu dem Holographischen Gitter (e) einfallen. Dieses Holographische Gitter ist ein Reflexionsgitter, was sich auf der drehbaren Säule des Drehgelenks befindet und genutzt wird, um die Spektrallinien der Lampe aufzuspalten. Das reflektierte Licht wird anschließend mit einer Sammellinse (f) der Brennweite $f = 300\text{mm}$ auf ein Okular (g) abgebildet. Das Okular kann alternativ mit einer CCD-Kamera (h) für exaktere Messungen ersetzt werden.

2.6 Durchführung

Justierung Damit die Gitterkonstante bestimmt werden kann, muss von einem bekannten Element die Spektrallinien untersucht werden. Dazu wird die Deutrium lampe (Balmer-Lampe) mit einer Quecksilber Lampe (Hg-Lampe) ersetzt. Hierzu muss darauf geachtet werden das alle Bauteile des Aufbaus auf der gleichen Höhe bleiben, damit es keine Veränderungen der optischen Achse mit der Balmer-Lampe geben würde. Es wird nun die Linse **b** so justiert, dass es einen scharfen Lichtfleck von der Lampe auf der Platte abgebildet wird. Das Projektionsobjektiv **d** wird auf ungefähre Brennweite hinter den Spalt positioniert. Es wird nun das Drehgelenk des Gitters (**e**) auf die 0° position gebracht und das Projektionsobjektiv so verschoben, dass ein scharfes Bild des Spaltes auf dem Spalt erkennbar ist, so wird der Spalt im unendlichen abgebildet. Zuletzt wird die Linse **f** so justiert, dass im Okular ein scharfes Bild, im Spektrum, zu erkennen ist. Dieses Bild soll eine beliebige Spektrallinie der ersten Ordnung sein. Nun soll, für den folgenden Versuchsteil, die Winkel des optischen Bank (ω_B) und der Winkel des Gitters (ω_G) abgelesen werden. Damit diese Werte benutzt werden können, müssen diese in die relevanten Winkel für das Gitter umgerechnet werden, siehe ???. Mit Hilfe von ??? können

$$\alpha = \omega_G \quad (2.4)$$

$$\beta = \omega_B + \omega_G - 180^\circ \quad (2.5)$$

Dieses soll nach dem Zurücktatsch der Hg-Lampe und der Balmer-Lampe wiederholt werden.

Bestimmung der Gitterkonstante Die Gitterkonstante wird mithilfe der Hg-Lampe bestimmt. Es wird nach der ersten Spektrallinie gesucht, bis diese gefunden ist. Hier zu wird die Helligkeit der Spektrallinie über den Spalt aufgedreht, wenn diese nicht sichtbar sind und dann auf etwa 1 Skalen Teil (0,1mm) eingestellt, aber dass die nicht verschwindet. Um zu vergleichen welche Wellenlänge gesehen werden konnte für die Auswertung wurde die Hg-Linien von dem Anhang ??? zu nutzen. Es werden nun ω_B und ω_G abgelesen und mit ??? zugeordnet.

Untersuchung der Balmer-Linien Nach dem Tauschen der Lampen wird erstmal die Justierung wiederholt. Nach der Justierung werden für jede Spektrallinie wiederum die Winkel ω_B und ω_G gemessen und der Abstand der Aufspaltung d , der Spektrallinien, abgeschätzt.

Ersätzen Okular mit CCD-Kamera Es wird nun das Okular mit einer CCD-Kamera ersetzt, damit eine genauere Bestimmung der Spektrallinien stattfinden kann. Es wird ein Programm genutzt, welches die Intensität und Pixelkoordinate (Position der Intensität) aufnimmt und gegen einander aufträgt. Falls die Intensität zu klein ist, kann im Programm die Schaltfläche vergrößert werden. Das Programm gibt aber einen Winkel aus, den Ausfallswinkel, welches es aus den Pixelkoordinaten entnimmt, mit

$$\beta = \arctan\left(\frac{(1024 - p) \cdot 0,014\text{mm}}{f}\right) \quad (2.6)$$

wobei, p die Pixelkoordinate und f die Brennweite der abbildenden Sammellinse sind. Diese Linse wird noch verschoben, bis die Darstellung des Programmes scharf dargestellt werden kann (die Peaks sollen so dünn wie möglich sein). Da die Intensität sehr sensitive ist, wird mit Hilfe des Programms ein Mittelwert der Bildung der Intensität gemacht. Diese Werte werden gespeichert und der Winkel des Gitters aufgenommen. Es wird der gleiche Vorgang für die weiteren Balmer-Linien verhandelt.

2.7 Bestimmung der Gitterkonstanten

Um die Gitterkonstante zu berechnen wird die Gittergleichung für ein Reflexionsgitter

$$g(\sin \alpha + \sin \beta) = m \lambda \quad \Rightarrow \quad g = \frac{m \lambda}{\sin \alpha + \sin \beta} \quad (2.7)$$

genutzt, mit m die Ordnung, λ die Wellenlänge, α der Einfallswinkel und β der Ausfallswinkel, mit Fehler

$$\Delta g = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial \alpha} \Delta \alpha\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial \beta} \Delta \beta\right)^2} \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial g}{\partial \theta_m} = \frac{m \lambda \cos \theta_m}{(\sin \theta_m + \sin \beta)^2}, \quad \frac{\partial g}{\partial \beta} = \frac{m \lambda \cos \beta}{(\sin \theta_m + \sin \beta)^2} \quad (2.9)$$

$$\Rightarrow \Delta g = \sqrt{\left(\frac{m \lambda \cos \alpha}{(\sin \alpha + \sin \beta)^2} \Delta \alpha\right)^2 + \left(\frac{m \lambda \cos \beta}{(\sin \alpha + \sin \beta)^2} \Delta \beta\right)^2} \quad (2.10)$$

Es wird $m = 1$ gesetzt, da dies die Ordnung ist, die untersucht wird.

Dies ausgerechneten Werte befinden sich in ?? mit den Entsprechenden abhängigen Werten und deren Fehler. Es ist zu bemerken, dass für die roten Spektrallinien für $\omega_B = 145^\circ$ nicht sichtbar

|

Tabelle 2.3: Caption

waren wurde diese geändert und zur Überprüfung, schon gemessene Spektrallinien nochmals aufgenommen. Zu beachten, ist dass diese Werte nicht genau übereinstimmen, was mit schlechtem abschätzen zu tun haben könnte, da zum Beispiel $61,2^\circ$ und $61,0^\circ$ kaum zu unterscheiden waren. Mit der Annahme dieses Fehlers sind die Werte angemessen. Zusätzlich waren manche Linien so blass, dass diese kaum erkannt wurden und mehr Linien gesehen wurden. Diese wurden aber nicht genommen, da diese sehr schlecht zu sehen waren. Um einen festen Wert zu haben um für die Balmer-Linien zu berechnen, wurde der Mittelwert von den ausgerechneten Gitterkonstanten genommen mit

$$\bar{g} = \frac{\sum_{i=1}^N (g_i / \Delta g_i)}{\sum_{i=1}^N (1 / \Delta g_i)}, \quad \Delta \bar{g} = \sqrt{\frac{N}{\sum_{i=1}^N 1 / (\Delta g_i)^2}} \quad (2.11)$$

Es ergibt sich nun die Gitterkonstante mit:

$$\bar{g} = (420.76 \pm 1.51) \text{ nm} \quad (2.12)$$

Dieser Wert passt nicht zu allen g -Werten, aber mit mehr als $2/3$ und ist somit ein sinnvoller Wert.

2.8 Bestimmung der Balmerlinien

Mit der Gitterkonstante kann nun die Wellenlängen der Balmer-Lampe berechnet werden. Dies kann durch die Gittergleichung ?? mit der Ersten Ordnung berechnet werden. Die dazu gehörige Wellenlänge ist zwischen 388 nm und 656 nm sichtbar ([Uni Ulm]) und mit den Messungen zuzuordnen. Die Emissionslinien sind dabei die Übergänge von Energieniveau $n > 2 \rightarrow n = 2$. Die Photonen, die den Übergang beschreiben, kann durch die Rydberg-Formel ([Demtröder Ex3], S.100)

$$\frac{1}{\lambda} = R_y \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 3, 4, 5, \dots \quad (2.13)$$

gezeigt werden. Diese wird noch im ?? bestimmt. Es wird nochmals die Winkel für die bestimmten Emissionslinien aufgenommen werden und die Ausgerechneten Werte in ??, so wie deren Literaturwert aufgelistet.

Während des Versuches, wurden nur 3 Emissionslinien gesichtet, dies könnte an dem Fehlenden Abschirmung der Lampe liegen könnte welches durch Reflexion an der Linse vor dem Okular, die schwer zu sehenden Emissionslinien, überleuchtet hat. Dieses könnte zu H_α , H_β und H_γ zugeordnet werden.



Tabelle 2.4: Deuterium

Es ist zu sehen, dass die berechneten Wellenlängen nicht mit den Literaturwert übereinstimmt. Dies könnte an der Näherung der Winkel liegen, da diese zum Beispiel als $55,3^\circ \approx 55,5^\circ$. Zusätzlich hätten die Fehler auch zu klein geschätzt werden können. Obwohl die Werte nicht mit den Fehler mit den Literaturwerte übereinstimmen, sind die Werte genau genug, um die Werte zuzuordnen.

2.8.1 Bestimmung der Isotopieaufspaltung

Bei der Untersuchung der Emissionslinien der Balmer-Linien, wurde gesehen, dass die Emissionslinien eine zweite Emissionslinie existiert. Der Grund hierfür ist an der Balmer-Lampe. Da diese nicht rein aus Deuterium, sondern auch Wasserstoff besteht, im Verhältnis von $\approx 1 : 2$ ([Praktikum]). Dies weist darauf hin, dass konstante zusätzlich mit $Ry = \frac{\mu e^4}{8c\epsilon_0^2 h^3}$ (2.14) beschrieben werden ([Demtröder Ex3], S.101). Dabei ist zu beachten, dass dieser Wert von der Reduzierten Masse abhängt. Durch

$$\mu = \frac{m_e \cdot m_K}{m_e + m_K} = \frac{m_e}{1 + \frac{m_e}{m_K}} \quad (2.15)$$

mit m_e die Elektronen Masse und die Kernmasse m_K . Somit kann ein fester Rydbergkonstante (Ry_∞) bestimmt werden:

$$Ry = \frac{1}{1 + \frac{m_e}{m_K}} \cdot \frac{\mu m_e e^4}{8c\epsilon_0^2 h^3} = \frac{1}{1 + \frac{m_e}{m_K}} \cdot Ry_\infty \quad (2.16)$$

Da das Deuterium ein extra Neutron hat ist dieses Schwächer, somit ist die Ry kleiner und so auch proportional die Wellenlänge. Dieses wurde auch für größere Wellenlänge deutlicher sichtbar. Diese Aufspaltung wird als Isotopieaufspaltung bezeichnet, wobei es sich in diesem Fall über ein Masseneffekt der Isotopieaufspaltung handelt.

Mit der Skala in dem Okular kann die Größe d der Isotopieaufspaltung für die Emissionslinien geschätzt werden. Diese befinden sich in ??.

Dies kann durch die ??

$$\lambda = g (\sin \alpha + \sin \beta), \quad \frac{\Delta \lambda}{\Delta \beta} \approx \frac{\partial \lambda}{\partial \beta} = g \cos \beta, \quad \Delta \beta \approx \frac{d}{f}, \quad (2.17)$$

und mit der Brennweite der Abbildungslinse kann sich der Winkel $\Delta \beta$ durch

$$\Delta \beta = \arctan\left(\frac{d}{f}\right) \approx \frac{d}{f} \quad \text{für } d \ll f \quad (2.18)$$

berechnen lassen.

Diese Werte sind aber nicht genau, da diese aufspaltung sehr schwer zu sehen war und nur mit Mühe versucht abzuschätzen.

Die CCD-Kamera hat dieses Problem aber nicht und kann genauer die Isotopieaufspaltung messen.

Die Gemessenen Intensitäten bilden Peaks die in ??,?? und ?? dargestellt sind. Hierbei sind mehrere Peaks zu erkennen und können durch folgende Gauß-Peak Funktion

$$I(\beta) = \sum_i^2 A_i \cdot \exp\left(-\frac{\beta - \mu_i}{2\sigma_i}\right) + b \quad (2.19)$$

berechnet werden, mit b, dem Offset und dem Winkel β .

3 Fazit

4 Formeln: To be deleted at the end

Spannungsteiler

$$U = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{\text{ges}} \quad (4.1)$$

mit U als Spannung am Widerstand R_2 , R_1 und R_2 als Widerstände und U_{ges} als Gesamtspannung.

Energieerhaltung

$$h f = E_{\text{kin}} + W_A, \quad E_{\text{kin}} = e U_G \quad (4.2)$$

mit h dem Planckschen Wirkungsquantum, f der Photonfrequenz, e der Elementarladung, U_G der Gegenspannung und W_A der Austrittsarbeit.

Fehlerfortpflanzung I

$$\Delta(\sqrt{I - I_0}) = \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{2\sqrt{I - I_0}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_0}{2\sqrt{I - I_0}}\right)^2}. \quad (4.3)$$

Beugungsgitter

$$g(\sin \theta_m + \sin \beta) = m \lambda \quad \Rightarrow \quad g = \frac{m \lambda}{\sin \theta_m + \sin \beta} \quad (4.4)$$

$$\Delta g = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial \theta_m} \Delta \theta_m\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial \beta} \Delta \beta\right)^2}. \quad (4.5)$$

$$\frac{\partial g}{\partial \theta_m} = \frac{m \lambda \cos \theta_m}{(\sin \theta_m + \sin \beta)^2}, \quad \frac{\partial g}{\partial \beta} = \frac{m \lambda \cos \beta}{(\sin \theta_m + \sin \beta)^2}. \quad (4.6)$$

Mittelwert der Gitterkonstante

$$\bar{g} = \frac{\sum_{i=1}^N (g_i / \Delta g_i)}{\sum_{i=1}^N (1 / \Delta g_i)}, \quad \Delta \bar{g} = \sqrt{\frac{N}{\sum_{i=1}^N 1 / (\Delta g_i)^2}}. \quad (4.7)$$

Isotopenverhältnis

$$\lambda = g(\sin \theta_m + \sin \beta), \quad \frac{\partial \lambda}{\partial \beta} = g \cos \beta, \quad \Delta \beta \approx \frac{d}{f}. \quad (4.8)$$

Fehlerfortpflanzung II

$$\Delta \lambda = \sqrt{\left(\frac{\lambda}{g} \Delta g\right)^2 + \left(g \cos \alpha \Delta \alpha\right)^2 + \left(g \cos \beta \Delta \beta\right)^2}. \quad (4.9)$$

$$\Delta(\Delta \lambda) = \sqrt{\left(\frac{d \cos \beta}{f} \Delta g\right)^2 + \left(\frac{-d \sin \beta}{f g} \Delta \beta\right)^2 + \left(\frac{g \cos \beta}{f} \Delta d\right)^2}. \quad (4.10)$$

Balmer-Formel

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 3, 4, 5, \dots \quad (4.11)$$

$$R_H = \frac{1/\lambda}{\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right)}, \quad \Delta R_H = \frac{\Delta \lambda}{\lambda^2 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right)}. \quad (4.12)$$

Plancksches Wirkungsquantum

$$h = \left(\frac{m_e e^4}{8 \varepsilon_0^2 c R_H} \right)^{1/3}, \quad \Delta h = \frac{1}{3} \left(\frac{m_e e^4}{8 \varepsilon_0^2 c} \right)^{1/3} R_H^{-4/3} \Delta R_H. \quad (4.13)$$

$$U_0 = -\frac{b}{m} \quad (4.14)$$

$$\frac{\partial U_0}{\partial b} = -\frac{1}{m}, \quad \frac{\partial U_0}{\partial m} = \frac{b}{m^2}. \quad (4.15)$$

$$\text{Var}(U_0) = \left(\frac{\partial U_0}{\partial b} \right)^2 \sigma_b^2 + \left(\frac{\partial U_0}{\partial m} \right)^2 \sigma_m^2 + 2 \frac{\partial U_0}{\partial b} \frac{\partial U_0}{\partial m} \text{Cov}(b, m). \quad (4.16)$$

$$\sigma_{U_0} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_b}{m} \right)^2 + \left(\frac{b \sigma_m}{m^2} \right)^2 - 2 \frac{b}{m^3} \text{Cov}(m, b)}. \quad (4.17)$$

$$y = m U + b$$

Literatur

- [1] *Physikalisches Praktikum Teil IV:
Atome, Moleküle, Festkörper*. 15. Apr. 2025. Uni Bonn.
- [2] „Spannungsteiler“. In: (). URL: https://www.homofaciens.de/technics-base-circuits-voltage-divider_ge.htm.

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

A Anhang

A.1 Abbildungen

Photoeffekt

A.2 Tabellen

Photoeffekt

$\lambda = 365 \text{ nm}$				$\lambda = 405 \text{ nm}$			
Messung 1		Messung 2		Messung 1		Messung 2	
$U_G [\text{mV}]$	$U_{ph} [\text{mV}]$	$U_G [\text{mV}]$	$U_{ph} [\text{mV}]$	$U_G [\text{mV}]$	$U_{ph} [\text{mV}]$	$U_G [\text{mV}]$	$U_{ph} [\text{mV}]$
0,5	2380,0	0,5	2382,0	0,5	900,0	0,5	914,0
30,5	2070,0	35,6	2065,0	41,5	722,0	36,0	740,0
84,2	1630,0	84,6	1624,0	49,4	680,0	53,9	665,0
121,0	1325,0	120,5	1334,0	105,4	450,0	102,0	464,0
152,9	1071,0	156,3	1061,0	149,6	293,8	152,9	286,9,0
160,7	1025,0	170,3	951,0	167,7	245,0	165,6	250,5
182,4	883,0	180,8	892,0	174,5	226,9	178,2	215,6
190,7	823,0	194,8	795,0	201,7	161,2	200,3	164,8
217,9	655,0	219,4	653,0	213,7	139,5	217,5	230,0
270,0	396,0	271,1	392,0	247,4	86,1	254,1	78,8
287,0	333,3	287,4	325,0	267,7	63,5	273,2	58,2
355,7	152,7	359,2	148,8	289,6	45,8	293,0	24,8
396,3	79,9	397,2	95,6	301,9	38,8	304,7	36,5
452,0	32,9	455,0	29,2	352,9	14,8	345,3	17,6
472,0	14,1	477,0	11,7	378,1	5,1	384,8	3,2
517,0	1,1	516,0	1,4	410,0	1,1	405,0	1,1

Tabelle A.1: Messwerte der Photospannung U_{ph} bei Gegenspannung U_G für $\lambda = 365 \text{ nm}$ und $\lambda = 405 \text{ nm}$, wobei $\Delta U_{ph} = 0.1 \cdot U_{ph} + 10 \text{ mV}$, $\Delta U_G = 10 \text{ mV}$

$\lambda = 463 \text{ nm}$			
Messung 1		Messung 2	
$U_G [\text{mV}]$	$U_{ph} [\text{mV}]$	$U_G [\text{mV}]$	$U_{ph} [\text{mV}]$
0,5	1107,0	0,5	1130,0
31,1	901,0	34,3	866,0
87,5	537,0	91,9	522,0
133,2	313,1	135,0	307,4
152,1	236,9	152,1	242,8
192,5	126,6	190,6	130,0
227,5	68,5	227,0	68,8
291,0	18,8	287,4	21,1
334,9	1,9	329,2	2,8
345,9	0,6	349,4	0,0

Tabelle A.2: Messwerte der Photospannung U_{ph} bei Gegenspannung U_G für $\lambda = 463 \text{ nm}$, mit $\Delta U_{ph} = 0.1 \cdot U_{ph} + 10 \text{ mV}$ und $\Delta U_G = 10 \text{ mV}$.

$\lambda = 546 \text{ nm}$				$\lambda = 578 \text{ nm}$			
Messung 1		Messung 2		Messung 1		Messung 2	
$U_G [\text{mV}]$	$U_{ph} [\text{mV}]$	$U_G [\text{mV}]$	$U_{ph} [\text{mV}]$	$U_G [\text{mV}]$	$U_{ph} [\text{mV}]$	$U_G [\text{mV}]$	$U_{ph} [\text{mV}]$
0,5	5700,0	0,5	5390,0	0,5	644,0	0,5	565,0
32,7	2155,0	29,0	2444,0	10,7	406,0	10,2	406,0
12,4	3900,0	9,1	4230,0	21,6	287,5	23,6	276,8
52,9	1165,0	51,0	1206,0	31,1	217,2	29,6	225,1
69,9	677,0	61,7	874,0	39,6	169,3	39,6	169,6
60,4	949,0	71,8	645,0	54,9	117,2	50,5	122,7
103,2	212,9	101,0	242,1	62,1	82,6	60,8	84,4
130,7	77,7	128,7	82,2	73,3	55,7	69,6	63,7
150,8	13,8	150,8	18,3	82,2	39,6	83,2	37,6
162,4	6,2	158,7	0,1	119,8	0,0	116,6	2,4

Tabelle A.3: Messwerte der Photospannung U_{ph} bei Gegenspannung U_G für $\lambda = 546 \text{ nm}$ und $\lambda = 578 \text{ nm}$, wobei $\Delta U_{ph} = 0.1 \cdot U_{ph} + 10 \text{ mV}$ und $\Delta U_G = 10 \text{ mV}$.

$\lambda = 365 \text{ nm}$			
Messung max		Messung 50%	
$U_G [\text{mV}]$	$U_{ph} [\text{mV}]$	$U_G [\text{mV}]$	$U_{ph} [\text{mV}]$
0,4	9200,0	0,5	4040,0
100,2	5760,0	106,6	2417,0
200,8	2939,0	203,3	1296,0
259,3	1806,0	235,6	974,0
299,3	1172,0	255,8	806,0
330,4	823,0	279,8	630,0
364,5	549,0	303,6	491,0
402,0	337,6	350,8	282,4
453,0	111,6	404,0	147,8
504,0	12,2	450,0	58,8
1020,0	1,5	510,0	10,0

Tabelle A.4: Messwerte der Photospannung U_{ph} bei Gegenspannung U_G für $\lambda = 365 \text{ nm}$ (Maximalwerte und 50%-Punkt), wobei $\Delta U_{ph} = 0.1 \cdot U_{ph} + 10 \text{ mV}$ und $\Delta U_G = 10 \text{ mV}$.

$U [\text{mV}]$	$\Delta U [\text{mV}]$	$I [\text{pA}]$	$\Delta I [\text{pA}]$	$\sqrt{I - I_0} [\sqrt{\text{pA}}]$	$\Delta\sqrt{I - I_0} [\sqrt{\text{pA}}]$
2.15	43.00	2380.00	248.00	48.77	2.54
131.15	43.00	2070.00	217.00	45.49	2.39
362.06	43.00	1630.00	173.00	40.36	2.14
520.30	43.00	1325.00	142.50	36.39	1.96
657.47	43.00	1071.00	117.10	32.71	1.79
691.01	43.00	1025.00	112.50	32.00	1.76
784.32	43.00	883.00	98.30	29.70	1.66
820.01	43.00	823.00	92.30	28.67	1.61
936.97	43.00	655.00	75.50	25.57	1.48
1161.00	43.00	396.00	49.60	19.87	1.25
1234.10	43.00	333.30	43.33	18.23	1.19
1529.51	43.00	152.70	25.27	12.31	1.03
1704.09	43.00	79.90	17.99	8.88	1.01
1943.60	43.00	32.90	13.29	5.64	1.18
2029.60	43.00	14.10	11.41	3.61	1.58
2223.10	43.00	1.10	10.11	0.00	0.00

Tabelle A.5: Gemessenen Werte für die erste Messung bei $\lambda = 365 \text{ nm}$. Die Sättigungsspannung liegt bei $U_G = 517,00 \text{ mV}$, daraus folgt $I_0 = (1,10 \pm 10,11) \text{ pA}$.

Parameter	Wert
Steigung m [$\sqrt{\text{pA}}/\text{mV}$]	$-2,22 \times 10^{-2} \pm 5,58 \times 10^{-4}$
Achsenabschnitt b [$\sqrt{\text{pA}}$]	$4,70 \times 10^1 \pm 7,48 \times 10^{-1}$
χ^2	8,28
Freiheitsgrade (dof)	13
χ^2/dof	0,637
Abbremsspannung U_0 [mV]	$2117,12 \pm 62,98$

Tabelle A.6: Ergebnisse des gewichteten linearen χ^2 -Fits zur Bestimmung der Abbremsspannung für die erste Messung bei $\lambda = 365$ nm. Die hier gezeigten Werte stammen aus Tabelle ??.

U [mV]	ΔU [mV]	I [pA]	ΔI [pA]	$\sqrt{I - I_0}$ [$\sqrt{\text{pA}}$]	$\Delta\sqrt{I - I_0}$ [$\sqrt{\text{pA}}$]
2.15	43.00	2382.00	248.20	48.79	2.54
153.08	43.00	2065.00	216.50	45.43	2.38
363.78	43.00	1624.00	172.40	40.28	2.14
518.15	43.00	1334.00	143.40	36.50	1.96
672.09	43.00	1061.00	116.10	32.55	1.78
732.29	43.00	951.00	105.10	30.82	1.71
777.44	43.00	892.00	99.20	29.84	1.66
837.64	43.00	795.00	89.50	28.17	1.59
943.42	43.00	653.00	75.30	25.53	1.47
1165.73	43.00	392.00	49.20	19.76	1.24
1235.82	43.00	325.00	42.50	17.99	1.18
1544.56	43.00	148.80	24.88	12.14	1.02
1707.96	43.00	95.60	19.56	9.71	1.01
1956.50	43.00	29.20	12.92	5.27	1.23
2051.10	43.00	11.70	11.17	3.21	1.74
2218.80	43.00	1.40	10.14	0.00	0.00

Tabelle A.7: Gemessenen Werte für die zweite Messung bei $\lambda = 365$ nm. Die Sättigungsspannung liegt bei $U_G = 516,00$ mV, daraus folgt $I_0 = (1,40 \pm 10,14)$ pA.

Parameter	Wert
Steigung m [$\sqrt{\text{pA}}/\text{mV}$]	$-2,20 \times 10^{-2} \pm 5,73 \times 10^{-4}$
Achsenabschnitt b [$\sqrt{\text{pA}}$]	$4,69 \times 10^1 \pm 7,63 \times 10^{-1}$
χ^2	8,45
Freiheitsgrade (dof)	13
χ^2/dof	0,650
Abbremsspannung U_0 [mV]	$2131,82 \pm 65,47$

Tabelle A.8: Ergebnisse des gewichteten linearen χ^2 -Fits zur Bestimmung der Abbremsspannung für die zweite Messung bei $\lambda = 365$ nm. Die hier gezeigten Werte stammen aus Tabelle ??.

U [mV]	ΔU [mV]	I [pA]	ΔI [pA]	$\sqrt{I - I_0}$ [$\sqrt{\text{pA}}$]	$\Delta\sqrt{I - I_0}$ [$\sqrt{\text{pA}}$]
2.15	43.00	4040.00	414.00	63.48	3.26
458.38	43.00	2417.00	251.70	49.06	2.57
874.19	43.00	1296.00	139.60	35.86	1.95
1013.08	43.00	974.00	107.40	31.05	1.73
1099.94	43.00	806.00	90.60	28.21	1.61
1203.14	43.00	630.00	73.00	24.90	1.47
1305.48	43.00	491.00	59.10	21.93	1.35
1508.44	43.00	282.40	38.24	16.50	1.16
1737.20	43.00	147.80	24.78	11.74	1.06
1935.00	43.00	58.80	15.88	6.99	1.14
2193.00	43.00	10.00	11.00	0.00	0.00

Tabelle A.9: Gemessenen Werte für die Messung bei 50 % Intensität und $\lambda = 365$ nm. Die Sättigungsspannung liegt bei $U_G = 510,00$ mV, daraus folgt $I_0 = (10,00 \pm 11,00)$ pA.

Parameter	Wert
Steigung m [$\sqrt{\text{pA}}/\text{mV}$]	$-2,79 \times 10^{-2} \pm 9,92 \times 10^{-4}$
Achsenabschnitt b [$\sqrt{\text{pA}}$]	$5,96 \times 10^1 \pm 1,45$
χ^2	6,55
Freiheitsgrade (dof)	8
χ^2/dof	0,819
Abbremsspannung U_0 [mV]	$2136,20 \pm 92,03$

Tabelle A.10: Ergebnisse des gewichteten linearen χ^2 -Fits zur Bestimmung der Abbremsspannung für die Messung bei $\lambda = 365$ nm mit 50% Intensität. Die hier gezeigten Werte stammen aus Tabelle ??.

U [mV]	ΔU [mV]	I [pA]	ΔI [pA]	$\sqrt{I - I_0}$ [$\sqrt{\text{pA}}$]	$\Delta\sqrt{I - I_0}$ [$\sqrt{\text{pA}}$]
1.72	43.00	9200.00	930.00	95.91	4.85
430.86	43.00	5760.00	586.00	75.88	3.86
863.44	43.00	2939.00	303.90	54.20	2.80
1114.99	43.00	1806.00	190.60	42.48	2.24
1286.99	43.00	1172.00	127.20	34.21	1.86
1420.72	43.00	823.00	92.30	28.66	1.61
1567.35	43.00	549.00	64.90	23.40	1.39
1728.60	43.00	337.60	43.76	18.33	1.19
1947.90	43.00	111.60	21.16	10.49	1.01
2167.20	43.00	12.20	11.22	3.27	1.72
4386.00	43.00	1.50	10.15	0.00	0.00

Tabelle A.11: Gemessenen Werte für die Messung bei maximaler Intensität und $\lambda = 365$ nm. Die Sättigungsspannung liegt bei $U_G = 1020,00$ mV, daraus folgt $I_0 = (1,50 \pm 10,15)$ pA.

Parameter	Wert
Steigung m [$\sqrt{\text{pA}}/\text{mV}$]	$-4,00 \times 10^{-2} \pm 1,57 \times 10^{-3}$
Achsenabschnitt b [$\sqrt{\text{pA}}$]	$8,76 \times 10^1 \pm 2,64$
χ^2	11,74
Freiheitsgrade (dof)	8
χ^2/dof	1,467
Abbremsspannung U_0 [mV]	$2190,00 \pm 108,37$

Tabelle A.12: Ergebnisse des gewichteten linearen χ^2 -Fits zur Bestimmung der Abbremsspannung für die Messung bei $\lambda = 365 \text{ nm}$ mit maximaler Intensität. Die hier gezeigten Werte stammen aus Tabelle ??.

U [mV]	ΔU [mV]	I [pA]	ΔI [pA]	$\sqrt{I - I_0}$ [$\sqrt{\text{pA}}$]	$\Delta\sqrt{I - I_0}$ [$\sqrt{\text{pA}}$]
2.15	43.00	900.00	100.00	29.98	1.67
178.45	43.00	722.00	82.20	26.85	1.53
212.42	43.00	680.00	78.00	26.06	1.50
453.22	43.00	450.00	55.00	21.19	1.30
643.28	43.00	293.80	39.38	17.11	1.15
721.11	43.00	245.00	34.50	15.62	1.10
750.35	43.00	226.90	32.69	15.03	1.09
867.31	43.00	161.20	26.12	12.65	1.03
918.91	43.00	139.50	23.95	11.76	1.02
1063.82	43.00	86.10	18.61	9.22	1.01
1151.11	43.00	63.50	16.35	7.90	1.03
1245.28	43.00	45.80	14.58	6.69	1.09
1298.17	43.00	38.80	13.88	6.14	1.13
1517.47	43.00	14.80	11.48	3.70	1.55
1625.83	43.00	5.10	10.51	2.00	2.63
1763.00	43.00	1.10	10.11	0.00	0.00

Tabelle A.13: Gemessenen Werte für die erste Messung bei $\lambda = 405 \text{ nm}$. Die Sättigungsspannung liegt bei $U_G = 410,00 \text{ mV}$, daraus folgt $I_0 = (1,10 \pm 10,11) \text{ pA}$.

Parameter	Wert
Steigung m [$\sqrt{\text{pA}}/\text{mV}$]	$-1,81 \times 10^{-2} \pm 5,50 \times 10^{-4}$
Achsenabschnitt b [$\sqrt{\text{pA}}$]	$2,90 \times 10^1 \pm 5,21 \times 10^{-1}$
χ^2	5,80
Freiheitsgrade (dof)	13
χ^2/dof	0,446
Abbremsspannung U_0 [mV]	$1602,21 \pm 56,56$

Tabelle A.14: Ergebnisse des gewichteten linearen χ^2 -Fits zur Bestimmung der Abbremsspannung für die erste Messung bei $\lambda = 405 \text{ nm}$. Die hier gezeigten Werte stammen aus Tabelle ??.

U [mV]	ΔU [mV]	I [pA]	ΔI [pA]	$\sqrt{I - I_0}$ [$\sqrt{\text{pA}}$]	$\Delta\sqrt{I - I_0}$ [$\sqrt{\text{pA}}$]
2.15	43.00	914.00	101.40	30.21	1.68
154.80	43.00	740.00	84.00	27.18	1.55
231.77	43.00	665.00	76.50	25.77	1.48
438.60	43.00	464.00	56.40	21.52	1.31
657.47	43.00	286.90	38.69	16.91	1.14
712.08	43.00	250.50	35.05	15.79	1.11
766.26	43.00	215.60	31.56	14.65	1.08
861.29	43.00	164.80	26.48	12.79	1.03
935.25	43.00	230.00	33.00	15.13	1.09
1092.63	43.00	78.80	17.88	8.81	1.01
1174.76	43.00	58.20	15.82	7.56	1.05
1259.90	43.00	24.80	12.48	4.87	1.28
1310.21	43.00	36.50	13.65	5.95	1.15
1484.79	43.00	17.60	11.76	4.06	1.45
1654.64	43.00	3.20	10.32	1.45	3.56
1741.50	43.00	1.10	10.11	0.00	0.00

Tabelle A.15: Gemessenen Werte für die zweite Messung bei $\lambda = 405$ nm. Die Sättigungsspannung liegt bei $U_G = 405,00$ mV, daraus folgt $I_0 = (1,10 \pm 10,11)$ pA.

Parameter	Wert
Steigung m [$\sqrt{\text{pA}}/\text{mV}$]	$-1,83 \times 10^{-2} \pm 8,30 \times 10^{-4}$
Achsenabschnitt b [$\sqrt{\text{pA}}$]	$2,95 \times 10^1 \pm 7,84 \times 10^{-1}$
χ^2	12,92
Freiheitsgrade (dof)	13
χ^2/dof	0,994
Abbremsspannung U_0 [mV]	$1612,02 \pm 84,74$

Tabelle A.16: Ergebnisse des gewichteten linearen χ^2 -Fits zur Bestimmung der Abbremsspannung für die zweite Messung bei $\lambda = 405$ nm. Die hier gezeigten Werte stammen aus Tabelle ??.

U [mV]	ΔU [mV]	I [pA]	ΔI [pA]	$\sqrt{I - I_0}$ [$\sqrt{\text{pA}}$]	$\Delta\sqrt{I - I_0}$ [$\sqrt{\text{pA}}$]
2.15	43.00	1107.00	120.70	33.26	1.81
133.73	43.00	901.00	100.10	30.01	1.67
376.25	43.00	537.00	63.70	23.16	1.38
572.76	43.00	313.10	41.31	17.68	1.17
654.03	43.00	236.90	33.69	15.37	1.10
827.75	43.00	126.60	22.66	11.22	1.01
978.25	43.00	68.50	16.85	8.24	1.02
1251.30	43.00	18.80	11.88	4.27	1.39
1440.07	43.00	1.90	10.19	1.14	4.47
1487.37	43.00	0.60	10.06	0.00	0.00

Tabelle A.17: Gemessenen Werte für die erste Messung bei $\lambda = 463$ nm. Die Sättigungsspannung liegt bei $U_G = 1487,37$ mV, daraus folgt $I_0 = (0,60 \pm 10,06)$ pA.

Parameter	Wert
Steigung m [$\sqrt{\text{pA}}/\text{mV}$]	$-2,38 \times 10^{-2} \pm 1,22 \times 10^{-3}$
Achsenabschnitt b [$\sqrt{\text{pA}}$]	$3,18 \times 10^1 \pm 9,47 \times 10^{-1}$
χ^2	6,31
Freiheitsgrade (dof)	7
χ^2/dof	0,901
Abbremsspannung U_0 [mV]	$1336,13 \pm 79,21$

Tabelle A.18: Ergebnisse des gewichteten linearen χ^2 -Fits zur Bestimmung der Abbremsspannung für die erste Messung bei $\lambda = 463$ nm. Die hier gezeigten Werte stammen aus Tabelle ??.

U [mV]	ΔU [mV]	I [pA]	ΔI [pA]	$\sqrt{I - I_0}$ [$\sqrt{\text{pA}}$]	$\Delta\sqrt{I - I_0}$ [$\sqrt{\text{pA}}$]
2.15	43.00	1130.00	123.00	33.62	1.83
147.49	43.00	866.00	96.60	29.43	1.64
395.17	43.00	522.00	62.20	22.85	1.36
580.50	43.00	307.40	40.74	17.53	1.16
654.03	43.00	242.80	34.28	15.58	1.10
819.58	43.00	130.00	23.00	11.40	1.01
976.10	43.00	68.80	16.88	8.29	1.02
1235.82	43.00	21.10	12.11	4.59	1.32
1415.56	43.00	2.80	10.28	1.67	3.08
1502.42	43.00	0.01	10.00	0.00	0.00

Tabelle A.19: Gemessenen Werte für die zweite Messung bei $\lambda = 463$ nm. Die Sättigungsspannung liegt bei $U_G = 1502,42$ mV, daraus folgt $I_0 = (0,01 \pm 10,00)$ pA.

Parameter	Wert
Steigung m [$\sqrt{\text{pA}}/\text{mV}$]	$-2,36 \times 10^{-2} \pm 1,26 \times 10^{-3}$
Achsenabschnitt b [$\sqrt{\text{pA}}$]	$3,18 \times 10^1 \pm 9,94 \times 10^{-1}$
χ^2	6,97
Freiheitsgrade (dof)	7
χ^2/dof	0,995
Abbremsspannung U_0 [mV]	$1347,46 \pm 83,36$

Tabelle A.20: Ergebnisse des gewichteten linearen χ^2 -Fits zur Bestimmung der Abbremsspannung für die zweite Messung bei $\lambda = 463$ nm. Die hier gezeigten Werte stammen aus Tabelle ??.

U [mV]	ΔU [mV]	I [pA]	ΔI [pA]	$\sqrt{I - I_0}$ [$\sqrt{\text{pA}}$]	$\Delta\sqrt{I - I_0}$ [$\sqrt{\text{pA}}$]
2.15	43.00	57.00	5.80	7.55	0.38
140.61	43.00	21.55	2.25	4.64	0.24
53.32	43.00	39.00	4.00	6.24	0.32
227.47	43.00	11.65	1.26	3.40	0.19
300.57	43.00	6.77	0.78	2.59	0.15
259.72	43.00	9.49	1.05	3.07	0.17
443.76	43.00	2.13	0.31	1.44	0.11
562.01	43.00	0.78	0.18	0.85	0.11
648.44	43.00	0.14	0.11	0.28	0.21
698.32	43.00	0.06	0.11	0.00	0.00

Tabelle A.21: Gemessenen Werte für die erste Messung bei $\lambda = 546$ nm. Die Sättigungsspannung liegt bei $U_G = 698,32$ mV, daraus folgt $I_0 = (0,06 \pm 0,11)$ pA.

Parameter	Wert
Steigung m [$\sqrt{\text{pA}}/\text{mV}$]	$-9,06 \times 10^{-3} \pm 9,59 \times 10^{-4}$
Achsenabschnitt b [$\sqrt{\text{pA}}$]	$5,71 \pm 4,14 \times 10^{-1}$
χ^2	60,11
Freiheitsgrade (dof)	7
χ^2/dof	8,587
Abbremsspannung U_0 [mV]	$630,24 \pm 80,86$

Tabelle A.22: Ergebnisse des gewichteten linearen χ^2 -Fits zur Bestimmung der Abbremsspannung für die erste Messung bei $\lambda = 546$ nm. Die hier gezeigten Werte stammen aus Tabelle ??.

U [mV]	ΔU [mV]	I [pA]	ΔI [pA]	$\sqrt{I - I_0}$ [$\sqrt{\text{pA}}$]	$\Delta\sqrt{I - I_0}$ [$\sqrt{\text{pA}}$]
2.15	43.00	53.90	5.49	7.34	0.37
124.70	43.00	24.44	2.54	4.94	0.26
39.13	43.00	42.30	4.33	6.50	0.33
219.30	43.00	12.06	1.31	3.47	0.19
265.31	43.00	8.74	0.97	2.96	0.16
308.74	43.00	6.45	0.74	2.54	0.15
434.30	43.00	2.42	0.34	1.56	0.11
553.41	43.00	0.82	0.18	0.91	0.10
648.44	43.00	0.18	0.12	0.43	0.14
682.41	43.00	0.00	0.10	0.00	0.00

Tabelle A.23: Gemessenen Werte für die zweite Messung bei $\lambda = 546$ nm. Die Sättigungsspannung liegt bei $U_G = 682,41$ mV, daraus folgt $I_0 = (0,00 \pm 0,10)$ pA.

Parameter	Wert
Steigung m [$\sqrt{\text{pA}}/\text{mV}$]	$-8,65 \times 10^{-3} \pm 9,51 \times 10^{-4}$
Achsenabschnitt b [$\sqrt{\text{pA}}$]	$5,60 \pm 4,28 \times 10^{-1}$
χ^2	69,41
Freiheitsgrade (dof)	7
χ^2/dof	9,915
Abbremsspannung U_0 [mV]	$647,40 \pm 86,69$

Tabelle A.24: Ergebnisse des gewichteten linearen χ^2 -Fits zur Bestimmung der Abbremsspannung für die zweite Messung bei $\lambda = 546$ nm. Die hier gezeigten Werte stammen aus Tabelle ??.

U [mV]	ΔU [mV]	I [pA]	ΔI [pA]	$\sqrt{I - I_0}$ [$\sqrt{\text{pA}}$]	$\Delta\sqrt{I - I_0}$ [$\sqrt{\text{pA}}$]
2.15	43.00	6.44	0.74	2.54	0.15
46.01	43.00	4.06	0.51	2.01	0.13
92.88	43.00	2.88	0.39	1.70	0.11
133.73	43.00	2.17	0.32	1.47	0.11
170.28	43.00	1.69	0.27	1.30	0.10
236.07	43.00	1.17	0.22	1.08	0.10
267.03	43.00	0.83	0.18	0.91	0.10
315.19	43.00	0.56	0.16	0.75	0.10
353.46	43.00	0.40	0.14	0.63	0.11
515.14	43.00	0.00	0.10	0.00	0.00

Tabelle A.25: Gemessenen Werte für die erste Messung bei $\lambda = 578$ nm. Die Sättigungsspannung liegt bei $U_G = 515,14$ mV, daraus folgt $I_0 = (0,00 \pm 0,10)$ pA.

Parameter	Wert
Steigung m [$\sqrt{\text{pA}}/\text{mV}$]	$-4,81 \times 10^{-3} \pm 3,82 \times 10^{-4}$
Achsenabschnitt b [$\sqrt{\text{pA}}$]	$2,22 \pm 8,54 \times 10^{-2}$
χ^2	8,54
Freiheitsgrade (dof)	7
χ^2/dof	1,219
Abbremsspannung U_0 [mV]	$461,54 \pm 40,73$

Tabelle A.26: Ergebnisse des gewichteten linearen χ^2 -Fits zur Bestimmung der Abbremsspannung für die erste Messung bei $\lambda = 578 \text{ nm}$. Die hier gezeigten Werte stammen aus Tabelle ??.

U [mV]	ΔU [mV]	I [pA]	ΔI [pA]	$\sqrt{I - I_0}$ [$\sqrt{\text{pA}}$]	$\Delta\sqrt{I - I_0}$ [$\sqrt{\text{pA}}$]
2.15	43.00	5.65	0.67	2.37	0.14
43.86	43.00	4.06	0.51	2.01	0.13
101.48	43.00	2.77	0.38	1.66	0.11
127.28	43.00	2.25	0.33	1.49	0.11
170.28	43.00	1.70	0.27	1.29	0.10
217.15	43.00	1.23	0.22	1.10	0.10
261.44	43.00	0.84	0.18	0.91	0.10
299.28	43.00	0.64	0.16	0.78	0.10
357.76	43.00	0.38	0.14	0.59	0.12
501.38	43.00	0.02	0.10	0.00	0.00

Tabelle A.27: Gemessenen Werte für die zweite Messung bei $\lambda = 578 \text{ nm}$. Die Sättigungsspannung liegt bei $U_G = 501,38 \text{ mV}$, daraus folgt $I_0 = (0,02 \pm 0,10) \text{ pA}$.

Parameter	Wert
Steigung m [$\sqrt{\text{pA}}/\text{mV}$]	$-4,77 \times 10^{-3} \pm 2,95 \times 10^{-4}$
Achsenabschnitt b [$\sqrt{\text{pA}}$]	$2,18 \pm 6,37 \times 10^{-2}$
χ^2	4,80
Freiheitsgrade (dof)	7
χ^2/dof	0,685
Abbremsspannung U_0 [mV]	$457,02 \pm 31,26$

Tabelle A.28: Ergebnisse des gewichteten linearen χ^2 -Fits zur Bestimmung der Abbremsspannung. Die hier gezeigten Werte stammen aus Tabelle ??.

Balmer-Serie

Spektrallinie Hg							
ω_B [°]	$\Delta\omega_B$ [°]	Spektrallinien	ω_G [°]	$\Delta\omega_G$ [°]	Farbe	Dicke d [Skt]	Δd [Skt]
145,0	0,5		48,0	0,5	violett	4	1
145,0	0,5		49,0	0,5	violett	2	1
145,0	0,5		49,5	0,5	violett	2	1
145,0	0,5		50,5	0,5	violett/blau	3	1
145,0	0,5		51,0	0,5	violett/blau	3	1
145,0	0,5		51,0	0,5	blau	4	1
145,0	0,5		55,5	0,5	türkis	1	0,1
145,0	0,5		61,0	0,5	grün	3	1
145,0	0,5		64,0	0,5	gelb	5	1
145,0	0,5		64,5	0,5	gelb	5	1
145,0	0,5		69,0	0,5	rot	5	1
135,0	0,5		68,0	0,5	grün	8	1
135,0	0,5		71,0	0,5	gelb	10	1
135,0	0,5		71,5	0,5	gelb	11	1
155,0	0,5		61,0	0,5	rot	1	0,1
155,0	0,5		61,5	0,5	rot	1	0,1
155,0	0,5		62,5	0,5	rot	2	1

Tabelle A.29: Spektrallinien der Hg-Dampfampe 1. Ordnung, gemessen an den Winkelpositionen und beobachteter Farbe. Hierbei ist d die Dicke der Spektrallinien (in Strichpunkten), ω_B der Winkel der optischen Bank und ω_G der Winkel des Gitters.

Spektrallinie H/Deuterium							
ω_B [°]	$\Delta\omega_B$ [°]	Spektrallinien	ω_G [°]	$\Delta\omega_G$ [°]	Farbe	d [Skt]	Δd [Skt]
145,0	0,5		51,0	0,5	violett	3	1
145,0	0,5		55,5	0,5	türkis	1	0,1
155,0	0,5		61,5	0,5	rot	1	0,1

Tabelle A.30: Spektrallinien der H/Deuterium-Lampe in erster Ordnung. Hierbei ist d die Dicke der Spektrallinien (in Strichpunkten), ω_B der Winkel der Blende und ω_G der Beugungswinkel.