

## 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

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Der Photoeffekt</b>	<b>2</b>
2.1. Aufbau . . . . .	2
2.2. Durchführung . . . . .	2
2.2.1. Energiebilanz der Photoelektronen . . . . .	3
2.3. Abschätzung des Plankschen Wirkungsquantums und der Austrittsarbeit . . . . .	5
2.3.1. Bestimmung der Grenzspannung $U_0$ . . . . .	5
2.3.2. Bestimmung des Plankschen Wirkungsquantums $h$ . . . . .	5
2.3.3. Bestimmung der Austrittsarbeit $W_A$ . . . . .	5
2.3.4. Vergleich der Lambda-Kennlinie für unterschiedliche Intensitäten . . . . .	5
<b>3. Die Balmer-Serie</b>	<b>6</b>
3.1. Grundlagen . . . . .	6
3.1.1. Bohrsche Atommodell . . . . .	6
3.1.2. Balmer-Serie . . . . .	6
3.1.3. Quantenmechanische Betrachtung der Balmer-Serie . . . . .	6
3.1.4. Isotopieaufspaltung . . . . .	6
3.1.5. Natürliche Linienbreite und Linienverbreiterungen . . . . .	6
3.1.6. Reflexionsgitter . . . . .	6
3.2. Aufbau . . . . .	7
3.3. Durchführung . . . . .	7
3.4. Bestimmung der Gitterkonstanten . . . . .	7
3.5. Bestimmung der Balmerlinien . . . . .	7
3.5.1. Bestimmung der Isotopieaufspaltung . . . . .	7
3.5.2. Bestimmung der Rydberg-Konstante und des Plankschen Wirkungsquantum . . . . .	7
3.6. Weitergehende Überlegungen . . . . .	7
3.6.1. Möglicher Ursprung der anderen auftretenden Spektrallinien . . . . .	7
3.6.2. Doppler-Verbreiterung . . . . .	7
3.6.3. Auflösungsvermögen des Gitters . . . . .	7
<b>4. Fazit</b>	<b>8</b>
<b>5. Formeln: To be deleted at the end</b>	<b>9</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>12</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>13</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>14</b>

# 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

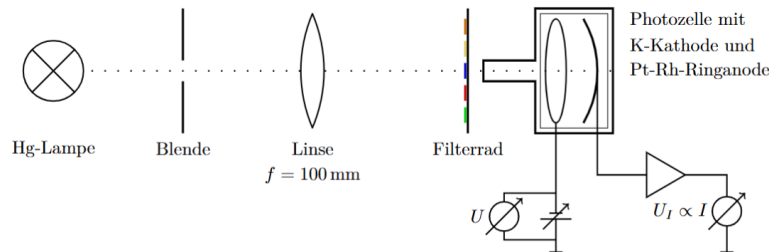


Abbildung 2.1.: Aufbau für die Messung des Photoeffektes [1]

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 2.1 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 2.2) aus einem  $330\Omega$  und  $100\Omega$  Widerstandes um den Messbereich zu skalieren und genauere Messungen durchzuführen.

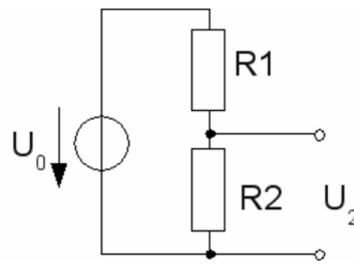


Abbildung 2.2.: Spannungsteiler [2]

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  $U_0$ :

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

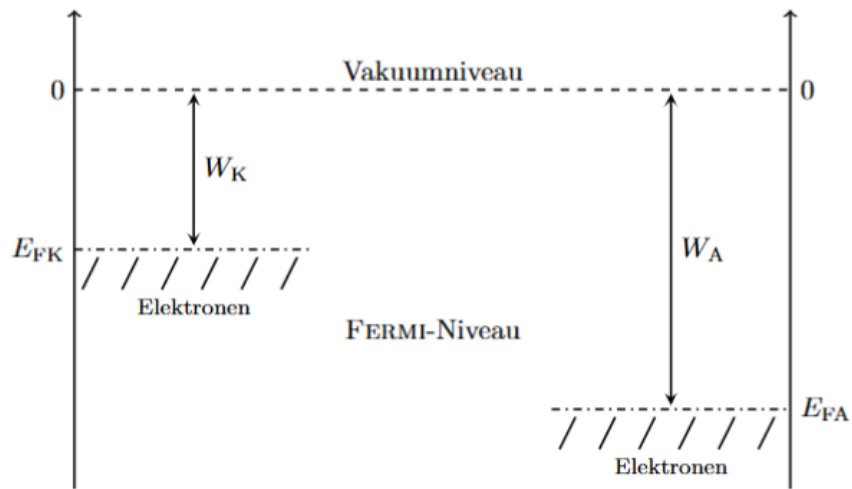
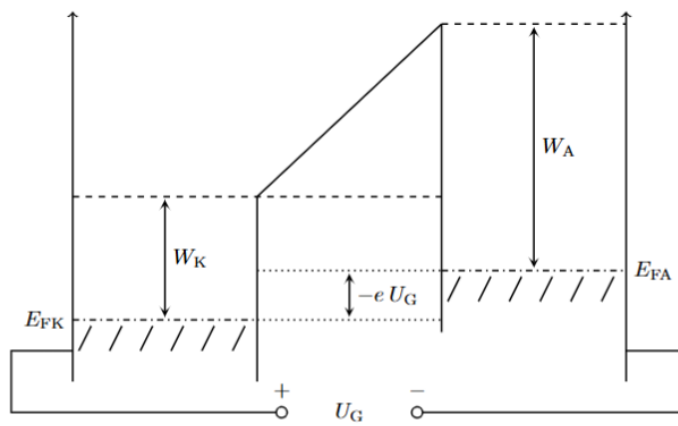
Somit wird der Spannungsbereich auf  $[0, 2,8]$  V skaliert.

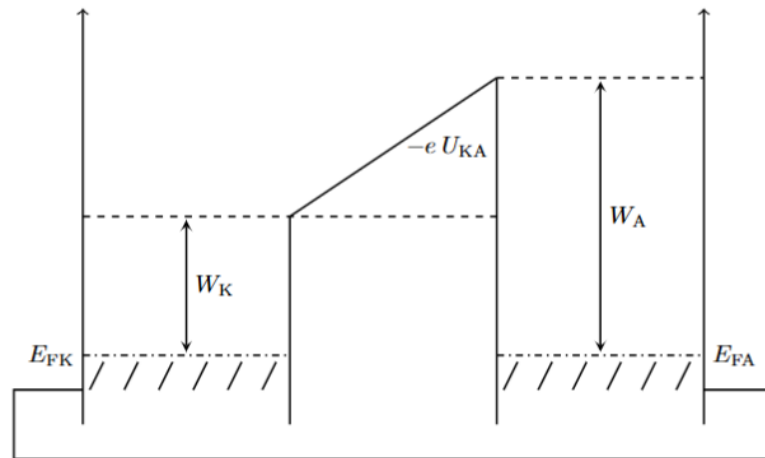
Der Anodenstrom wird über einen Messverstärker erfasst, wobei eine zum Strom proportionale Spannung mit einem Digitalmultimeter (DMM) gemessen wird. Die Gegenspannung stammt aus einem 12V-Gleichspannungsnetzteil, wobei der negative Pol mit der Anode verbunden ist, um die Elektronen abzubremesen. Diese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

Dieser Vorgang wird für je eine unterschiedliche Wellenlänge  $\lambda$  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 2.3, 2.4 und 2.5 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 2.3 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 $h$

### 2.3.3. Bestimmung der Austrittsarbeit $W_A$

### 2.3.4. Vergleich der Lambda-Kennlinie für unterschiedliche Intensitäten

# 3. Die Balmer-Serie

## 3.1. Grundlagen

### 3.1.1. Bohrsche Atommodell

Im Bohrschen Atommodell bewegen sich die Elektronen auf bestimmten Kreisbahnen. Diese Kreisbahnen sind ein ganzzahliges Vielfaches der De Broglie Wellenlänge. Wegen dem Kräftegleichgewichts zwischen Coulombkraft und Zentripetalkraft ergeben sich für die Radien der Kreisbahnen der Elektronen:

$$r = \frac{n^2 h^2 \epsilon_0}{\pi \mu Z e^2} = \frac{n^2}{Z} a_0 \quad (3.1)$$

Wobei  $h$  das Plancksche Wirkungsquantum,  $\mu$  die reduzierte Masse des Elektrons,  $Z$  die Ladungsmenge,  $e$  die Elementarladung,  $n \in \mathbf{N}$ ,  $a_0$  der Bohrsche Radius ist.

### 3.1.2. Balmer-Serie

Elektronen können ihre Bahn wechseln, indem sie Energie in Form elektromagnetischer Wellen mit der Frequenz  $\nu$  absorbieren oder emittieren, wobei ihre Energie durch  $E = h\nu$  bestimmt wird. Die Lichtfrequenz während der Anregung oder Abregung eines Elektrons von einem Energieniveau zu einem Niveau folgt dem Zusammenhang:

$$\nu = R_\infty c Z^2 \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad (3.2)$$

Dadurch wird die Energiedifferenz zwischen den beiden Zuständen mit Quantenzahlen  $n$  und  $m$  gegeben. Wobei  $R_\infty$  der Rydberg-Konstante entspricht.

Für ein Wasserstoffatom gilt  $Z = 1$  und mit  $n = 2$  und  $m > 2$  und man erhält die Balmer-Serie an Frequenzen die beobachtet werden und welche im sichtbaren Bereich sind.

### 3.1.3. Quantenmechanische Betrachtung der Balmer-Serie

### 3.1.4. Isotopieaufspaltung

Ein Isotop von Wasserstoff ist Deuterium: sein Kern besteht aus einem Proton und einem extra Neutron. Bei der Rydberg-Konstante muss dies berücksichtigt werden. Daraus folgt eine Verschiebung der Energie des emittierten Lichtstrahls. Bei diesen Kernen weist sich der relative Massenunterschied besonders groß auf, wodurch die Verschiebung besonders deutlich sichtbar ist.

### 3.1.5. Natürliche Linienbreite und Linienverbreiterungen

### 3.1.6. Reflexionsgitter

Funktionsweise

Auflösevermögen



### **3.2. Aufbau**

### **3.3. Durchführung**

### **3.4. Bestimmung der Gitterkonstanten**

### **3.5. Bestimmung der Balmerlinien**

#### **3.5.1. Bestimmung der Isotopieaufspaltung**

Ermittlung des Peakschwerpunktes

Ermittlung der Halbwertsbreite

#### **3.5.2. Bestimmung der Rydberg-Konstante und des Plankschen Wirkungsquantum**

Rydberg-Konstante

Planksche Wirkungsquantum

### **3.6. Weitergehende Überlegungen**

#### **3.6.1. Möglicher Ursprung der anderen auftretenden Spektrallinien**

#### **3.6.2. Doppler-Verbreitung**

#### **3.6.3. Auflösevermögen des Gitters**

## 4. Fazit

## 5. Formeln: To be deleted at the end

### Spannungsteiler

$$U = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{\text{ges}} \quad (5.1)$$

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

### Energieerhaltung

$$h f = E_{\text{kin}} + W_A, \quad E_{\text{kin}} = e U_G \quad (5.2)$$

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

### Fehlerfortpflanzung I

$$\Delta(\sqrt{I - I_0}) = \sqrt{\left(\frac{\Delta I}{2\sqrt{I - I_0}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_0}{2\sqrt{I - I_0}}\right)^2}. \quad (5.3)$$

### Beugungsgitter

$$g(\sin \theta_m + \sin \beta) = m \lambda \quad \Rightarrow \quad g = \frac{m \lambda}{\sin \theta_m + \sin \beta} \quad (5.4)$$

$$\Delta g = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial \theta_m} \Delta \theta_m\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial \beta} \Delta \beta\right)^2}. \quad (5.5)$$

$$\frac{\partial g}{\partial \theta_m} = \frac{m \lambda \cos \theta_m}{(\sin \theta_m + \sin \beta)^2}, \quad \frac{\partial g}{\partial \beta} = \frac{m \lambda \cos \beta}{(\sin \theta_m + \sin \beta)^2}. \quad (5.6)$$

### Mittelwert der Gitterkonstante

$$\bar{g} = \frac{\sum_{i=1}^N (g_i / \Delta g_i)}{\sum_{i=1}^N (1 / \Delta g_i)}, \quad \Delta \bar{g} = \sqrt{\frac{N}{\sum_{i=1}^N 1 / (\Delta g_i)^2}}. \quad (5.7)$$

### Isotopenverhältnis

$$\lambda = g(\sin \theta_m + \sin \beta), \quad \frac{\partial \lambda}{\partial \beta} = g \cos \beta, \quad \Delta \beta \approx \frac{d}{f}. \quad (5.8)$$

### Fehlerfortpflanzung II

$$\Delta \lambda = \sqrt{\left(\frac{\lambda}{g} \Delta g\right)^2 + \left(g \cos \alpha \Delta \alpha\right)^2 + \left(g \cos \beta \Delta \beta\right)^2}. \quad (5.9)$$

$$\Delta(\Delta \lambda) = \sqrt{\left(\frac{d \cos \beta}{f} \Delta g\right)^2 + \left(\frac{-d \sin \beta}{f g} \Delta \beta\right)^2 + \left(\frac{g \cos \beta}{f} \Delta d\right)^2}. \quad (5.10)$$

**Balmer-Formel**

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 3, 4, 5, \dots \quad (5.11)$$

$$R_H = \frac{1/\lambda}{\left( \frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right)}, \quad \Delta R_H = \frac{\Delta \lambda}{\lambda^2 \left( \frac{1}{4} - \frac{1}{n^2} \right)}. \quad (5.12)$$

**Plancksches Wirkungsquantum**

$$h = \left( \frac{m_e e^4}{8 \varepsilon_0^2 c R_H} \right)^{1/3}, \quad \Delta h = \frac{1}{3} \left( \frac{m_e e^4}{8 \varepsilon_0^2 c} \right)^{1/3} R_H^{-4/3} \Delta R_H. \quad (5.13)$$

# 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](https://www.homofaciens.de/technics-base-circuits-voltage-divider_ge.htm).

# Abbildungsverzeichnis

2.1. Aufbau für die Messung des Photoeffektes [1] . . . . .	2
2.2. Spannungsteiler [2] . . . . .	3
2.3. Fermi-niveaus von Kathode und Anode mit Austrittsarbeit $W_A$ [1] . . . . .	4
2.4. Kontaktpotential $-eU_{KA}$ [1] . . . . .	4
2.5. Potential dass von der Gegenspannung $-eU_G$ induziert wird[1] . . . . .	5

# Tabellenverzeichnis

## A. Anhang