

PRAKTIKUM 4

ATOME, MOLEKÜLE, KONDENSIERTE MATERIE

Versuch 401: Elektronische Übergänge in Atomen

GRUPPE A201

PARTH GADHAVI

JAFFAR AL NAGGAR

Versuchsdurchführung 28/29. April 2025

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Zeemann-Effekt	2
2.1	Theoretischer Hintergrund	2
2.1.1	Subsection	2
3	Franck-Hertz-Versuch	3
3.1	Theoretischer Hintergrund	3
3.2	Aufbau	4
3.2.1	Subsection	5

1 Einleitung

In Versuch 401: *Elektronische Übergängen in Atomen* werden elektronische Übergänge zwischen diskreten Energieniveaus in Atomen anhand zweier experimenteller Methoden untersucht.

Im ersten Versuchsteil wird die Aufspaltung atomarer Spektrallinien im externen Magnetfeld, der *Zeemann*-Effekt, betrachtet. Anhand eines ausgewählten Übergangs im Cadmium(Cd)-Atom ($5^1D_2 \rightarrow 5^1P_1$) wird die Abhängigkeit der Linienaufspaltung von der Magnetfeldstärke sowie die Polarisations-eigenschaften der emmittierten Strahlung untersucht. Zur hochauflösenden Darstellung werden ein Fabry-Pérot-Etalon und eine CCD-Kamera verwendet.

Im Rahmen der Auswertung werden das *Bohrsche-Magneton* sowie die Finesse und das Auflösungsvermögen des Etalons bestimmt.

Der zweite Versuchsteil befasst sich mit dem *Franck-Hertz*-Versuch, der die diskrete Energieaufnahme von Atomen bei Elektronenstößen untersucht.

Durch Aufnahme der Anodenstrom-Spannungs-Kurve und deren Analyse wird die Anregungsenergie von Quecksilber(Hg)-Atomen ermittelt.

Zusätzlich werden die Einflüsse von Temperaturänderung und variabler Gegenspannung auf die Form der Stromkurve untersucht, um die Wechselwirkung zwischen freien Elektronen und Hg-Atomen unter verschiedenen Bedingungen zu analysieren.

Der gesamte Versuch dient dazu, die Quantelung atomarer Eigenschaften experimentell nachzuweisen und daraus charakteristische Größen herzuleiten.

2 Zeemann-Effekt

Für den Übergang von Cadmium $5^1D_2 \rightarrow 5^1P_1$ wird der normale Zeemann-Effekt untersucht. Dafür folgt zunächst ein theoretischer Einschub.

2.1 Theoretischer Hintergrund

Der Zeemann-Effekt beschreibt die Aufspaltung von Spektrallinien, und somit Aufhebung der Entartung der Energieniveaus gleicher Gesamtdrehimpulse J , in einem externen Magnetfeld. Diese Aufspaltung ist auf die Wechselwirkung des magnetischen Moments der Atome mit dem äußeren Magnetfeld zurückzuführen. Unterschieden wird zwischen dem *normalen* ($S = 0$) und dem *anormalen* ($S \neq 0$) Zeemann-Effekt.

Da beide Niveaus des Cd einen Gesamtspin von $S = 0$ besitzen, ist nur der normale Zeemann-Effekt relevant. Der Hamiltonian des Elektrons im Atom und im Magnetfeld folgt mit:

$$\hat{H} = \underbrace{-\frac{\hbar}{2m} \vec{\nabla}^2 - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r}}_{H_0} + \underbrace{\beta \frac{\hat{\vec{L}} \cdot \hat{\vec{S}}}{\hbar^2}}_{H_{\text{Spin-Bahn}}} + \underbrace{\mu_B \frac{\hat{\vec{L}} + 2\hat{\vec{S}}}{\hbar} \vec{B}}_{H_{\text{Zeemann}}} \quad (2.1)$$

mit dem *Spin-Bahn*-Kopplungsterm $H_{\text{Spin-Bahn}}$ aus der Feinstruktur und dem *Zeemann*-Kopplungsterm H_{Zeemann} aus der Wechselwirkung mit dem äußeren Magnetfeld mit Richtung $\vec{B} = B\vec{e}_z$.

Da jedoch $S = 0$ fallen einige Terme weg. Die guten Quantenzahlen, also die, die sich nicht ändern, sind L, S, J und M_J (wobei $J = L + S = L$) und die Energiekorrektur zum Hamiltonian ist:

$$\Delta E = \mu_B g_J M_J B \quad (2.2)$$

mit dem Landé-Faktor g_J :

$$g_J = 1 + \frac{J(J+1) + S(S+1) - L(L+1)}{2J(J+1)} \quad (2.3)$$

Die Aufspaltung der Energieniveaus ist also linear in B und die Änderung der Energie ist proportional zu M_J .

2.1.1 Subsection

Subsubsection

3 Franck-Hertz-Versuch

3.1 Theoretischer Hintergrund

Der Franck-Hertz-Versuch, erstmals 1914 von James Franck und Gustav Hertz durchgeführt, lieferte den ersten direkten experimentellen Nachweis für quantisierte Energieniveaus in Atomen. Er bestätigte die entstehende Quantentheorie, indem er zeigte, dass Elektronen nur diskrete Energiemengen an Atome übertragen können, um diese in angeregte Zustände zu versetzen.

In diesem Versuch werden Elektronen durch eine glühende Kathode über Thermoemission freigesetzt und durch eine Beschleunigungsspannung U_B durch mit Quecksilberdampf gefülltes Gas beschleunigt. Auf ihrem Weg durch das Gas können die Elektronen mit Quecksilberatomen zusammenstoßen. Abhängig von ihrer Energie verlaufen diese Stöße entweder elastisch oder inelastisch.

Solange die Elektronen nicht genügend kinetische Energie haben, um ein Atom anzuregen, finden nur elastische Stöße statt, bei denen die Elektronen nahezu keine Energie verlieren. Überschreiten sie jedoch die Anregungsenergie des Atoms, kommt es zu inelastischen Stößen, bei denen ein Elektron eine definierte Energiemenge an das Atom abgibt und dieses in einen angeregten Zustand überführt. Das Atom kehrt anschließend durch Emission eines Photons in den Grundzustand zurück, während das Elektron mit verminderter kinetischer Energie weiterfliegt.

Die niedrigste Anregungsenergie des Quecksilberatoms liegt bei etwa

$$\Delta E \approx 4,67 \text{ eV} \quad (3.1)$$

und entspricht dem Übergang vom Grundzustand 6^1S_0 in den angeregten Zustand 6^3P_1 [1].

Bevor die Elektronen die Anode erreichen, müssen sie eine kleine Gegenspannung U_G überwinden. Elektronen, die durch inelastische Stöße zu viel Energie verlieren, können diese Barriere nicht überwinden und tragen daher nicht zum gemessenen Anodenstrom I_A bei.

Wenn die Beschleunigungsspannung U_B schrittweise erhöht wird, steigt der Anodenstrom zunächst an, da mehr Elektronen die Anode erreichen. Sobald $eU_B \geq 4,67 \text{ eV}$ ist, beginnen inelastische Stöße \rightarrow einige Elektronen verlieren Energie \rightarrow weniger Elektronen überwinden $U_G \rightarrow I_A$ sinkt. Mit weiter steigender Spannung gewinnen die Elektronen erneut genug Energie $\rightarrow I_A$ steigt wieder, bis eine zweite Anregung möglich wird \rightarrow zweites Minimum. So entsteht eine periodische Folge von Maxima und Minima im Strom-Spannungs-Diagramm.

Der Abstand zwischen zwei benachbarten Maxima oder Minima entspricht der Anregungsenergie:

$$\Delta E = e \cdot \Delta U \quad (3.2)$$

Die kinetische Energie der Elektronen ergibt sich aus:

$$E_{\text{kin}} = e \cdot U_B \quad (3.3)$$

Die Temperatur beeinflusst über den Dampfdruck die mittlere freie Weglänge der Elektronen. Ein höherer Dampfdruck (bei höherer Temperatur) führt zu häufigeren Stößen, wodurch die Maxima in der Stromkurve unschärfer werden. Ist die Temperatur zu niedrig, finden kaum Stöße statt und

es erscheint keine Struktur im Stromverlauf.

Die mittlere freie Weglänge λ lässt sich näherungsweise berechnen durch:

$$\lambda = \frac{k_B T}{\sqrt{2} \pi d^2 p} \quad (3.4)$$

mit k_B als Boltzmann-Konstante, T der Temperatur, d dem Atomdurchmesser und p dem Dampfdruck.

Die Gegenspannung U_G wirkt als Filter für langsame Elektronen. Eine Erhöhung von U_G reduziert den gemessenen Strom, verändert jedoch nicht die Lage der Maxima.

Der Franck-Hertz-Versuch stellt einen Meilenstein der Atomphysik dar. Er zeigte experimentell, dass Energieübertragungen zwischen Elektronen und Atomen in diskreten Beträgen erfolgen und bestätigte die Annahmen des Bohrschen Atommodells.

3.2 Aufbau

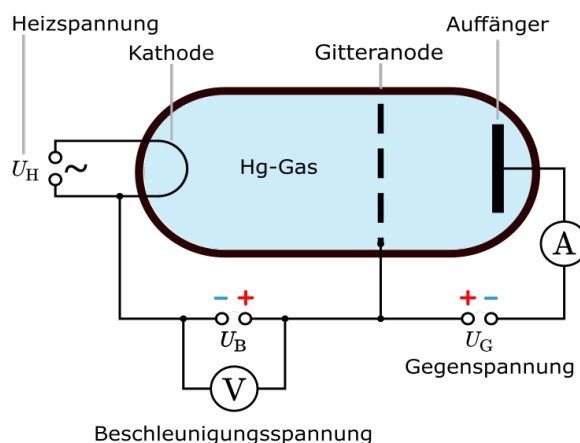


Abbildung 3.1: Franck-Hertz-Schaltung [2]

Der experimentelle Aufbau (schematisch in Abb. 3.1) besteht aus einer mit Quecksilberdampf (Hg-Gas) gefüllten Franck-Hertz-Röhre, die sich in einem temperaturgeregelten Ofen befindet. Elektronen werden durch Glühemission aus einer beheizten Kathode freigesetzt und mit einer einstellbaren Beschleunigungsspannung U_B in Richtung eines Gitters beschleunigt. Nach dem Passieren des Gitters stoßen die Elektronen auf eine kleine Gegenspannung U_G , bevor sie die Anode erreichen.

Die Gegenspannung U_G stellt sicher, dass nur Elektronen mit ausreichend kinetischer Energie - also solche, die keine oder nur elastische Stöße erfahren haben - die Anode erreichen können. Der resultierende Anodenstrom I_A wird mit einem empfindlichen Amperemeter gemessen. Die Beschleunigungsspannung U_B wird mit einem Voltmeter überwacht.

Der Ofen ermöglicht die präzise Temperaturregelung des Quecksilberdampfes, was entscheidend ist, da die Dampfdruckabhängigkeit die mittlere freie Weglänge der Elektronen beeinflusst. Eine konstante Temperatur ist notwendig, um reproduzierbare und deutlich sichtbare Maxima in der

Franck-Hertz-Kurve zu erhalten.

Die gesamte Apparatur wird über eine externe Steuereinheit betrieben, die das automatische Hochfahren der Beschleunigungsspannung sowie eine synchrone Datenaufnahme über die Messsoftware erlaubt.

3.2.1 Subsection

Subsubsection

Literatur

- [1] Klaus Sengstock Gerald Rapior und Valery Baeva. „New features of the Franck-Hertz experiment“. In: *American Journal of Physics* (2006), S. 423–428. DOI: 10.1119/1.2174033.
- [2] LEIFiPhysik. *Atomarer Energieaustausch*. Zugriff am: 1. Mai 2025. 2025. URL: <https://www.leifiphysik.de/atomphysik/atomarer-energieaustausch/versuche/franck-hertz-versuch-mit-hg>.