

# AUFSPALTUNG VON SPEKTRALLINIEN IM MAGNETFELD

Ausarbeitung von Erik Brambrink

Betreuer: Katja Cornell

## Ziel des Versuches

In diesem Versuch wird der historisch bedeutende Zeeman-Effekt untersucht. Aus den Meßergebnissen soll dann das Bohrsche Magneton bestimmt werden.

## Theoretische Grundlagen

Die Aufspaltung der Spektrallinien im Magnetfeld beruht auf der Wechselwirkung des durch den Drehimpuls  $j$  verursachten magnetischen Moments mit dem äußeren Feld. Der durch  $j$  charakterisierte Elementarkreisellipsoide präzediert im Magnetfeld, wobei jedoch aus quantenmechanischen Gründen nicht jeder Einstellwinkel möglich ist, sondern nur solche, bei denen der Drehimpuls in Feldrichtung ein halbzahliges Vielfaches von  $\hbar$  ist.  $J = m_j \hbar$ , wobei  $m_j$  die magnetische Quantenzahl ist. Dieser zusätzliche Drehimpuls führt zu einem magnetischen Moment, das seinerseits wiederum in einem Magnetfeld  $H$  zu einem zusätzlichen Energieterm führt:  $E = m_j \hbar H$ .

Diese zusätzlichen Energieterme führen zu einer Aufspaltung der Spektrallinien. Ist der Spin in den beiden für die Spektrallinie verantwortlichen Energietermen 0, so führt die Aufspaltung zu 3 Linien (normaler Zeeman-Effekt).

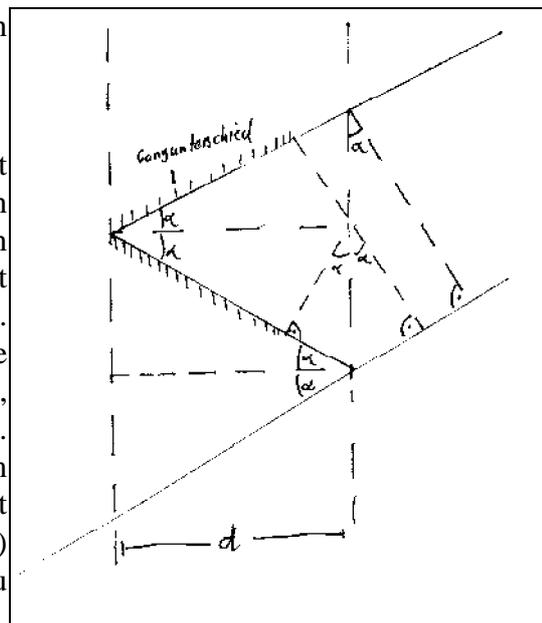
Ist dagegen der Spin ungleich null, so führt dies zu einer Aufspaltung der Energieterme, die jedoch nicht in beiden Energietermen dasselbe magnetische Moment haben. Dadurch kommen weitere Spektrallinien dazu, da es mehr mögliche Energiesprünge gibt (anormaler Zeeman-Effekt).

Ist dagegen die Wechselwirkung mit dem äußeren Feld groß gegen die Spin-Bahn-Kopplung, dann ist  $j$  nicht mehr konstant und die Zusatzterme sind entsprechend zahlreicher, da nun Spin und Bahndrehimpuls unabhängig voneinander zusätzliche Energieterme liefern können. Trotzdem ergeben sich nur 3 Spektrallinien, da die Abstände zwischen den Energietermen wieder gleich sind (Paschen-Back-Effekt).

Die Ausrichtung im Magnetfeld führt außerdem dazu, daß  $\Delta m_j = 0$ - und  $\Delta m_j = \pm 1$ -Spektrallinien senkrecht zueinander polarisiert sind.

## Versuchsaufbau

Zur Bestimmung der Übergangswellenlängen, mit denen man dann die Energiedifferenz bestimmen kann, wurde in diesem Fall ein Fabry-Perot-Interferometer benutzt. Für dieses läßt sich die Beziehung  $z \lambda = 2 d \cos(\alpha)$   $z \in \mathbb{Z}$  herleiten. Daraus könnte man zwar im Prinzip die Wellenlänge direkt aus dem Winkel berechnen, was sich jedoch in der Praxis als schwierig erweist. Deshalb wurde hier die Wellenlänge aus dem Abstand zweier benachbarter Ringe mit Magnetfeld ( $\delta_1$ ) und ohne Magnetfeld ( $\delta_2$ ) bestimmt. Um diesen Abstand gut bestimmen zu



können, wurde versucht, geometrisch einfache Figuren zu erzeugen, nämlich äquidistante Ringe. In Kombination mit dem Polarisationsfilter, mit dem man bestimmte Komponente ausblendet, lassen sich so mehrere  $\delta_1/\delta_2$ -Verhältnisse finden, zu denen man dann das magnetische Feld notiert. Welche Verhältnisse das im einzelnen sind, dazu später mehr. Zusammen mit dem im Text definiertem  $\Delta g_{\text{eff}}$  läßt sich das Bohrsche Magneton sehr direkt bestimmen.

## Versuchsdurchführung

### *Vermessung der roten Helium-Linie*

Hierbei handelt es sich um einen normalen Zeeman-Effekt. Hierbei kann man gut drei verschiedene  $\delta_1/\delta_2$ -Verhältnisse finden, nämlich :

- alle Linien äquidistant ( $\delta_1/\delta_2$ -Verhältnis=1/3)
- die Nebenlinien äquidistant ( $\delta_1/\delta_2$ -Verhältnis=1/4) unter Ausblendung der mittleren Linie mittels Polfilter.
- die Nebenlinien Überlappend ( $\delta_1/\delta_2$ -Verhältnis=1/2), wiederum unter Ausblendung der mittleren Linie.

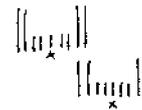
### *Vermessung der gelben Helium-Linie*

Hier wurde genauso verfahren wie bei der roten Helium-Linie

### *Vermessung der blauen Quecksilber-Linie*

Hierbei handelt es sich um einen anormalen Zeeman-Effekt. Der Strahl spaltet sich insgesamt in 6 Linien auf, die jedoch auf 9 „Niveaus“ verteilt sind (verbotener Übergang  $m_j=0$  nach  $m_j=0$ ). Hier ließen sich 2  $\delta_1/\delta_2$ -Verhältnisse gut bestimmen:

- Ausblendung der mittleren Linien, dann Überlagerung der äußeren Linien ( $\delta_1/\delta_2$ -Verhältnis=1/7)



- Ausblendung der äußeren Linien, dann innere Linien äquidistant machen ( $\delta_1/\delta_2$ -Verhältnis=1/4)



Die Überlappung der inneren Linien war leider nicht möglich, da das Magnetfeld nicht ausreichend stark genug war.

### *Vermessung der grünen Quecksilber-Linie*

Auch dies ist ein anormaler Zeeman-Effekt. Der Strahl spaltet sich in 9 Linien auf, jedoch haben diese Unterschiedliche Intensität. Durch Untersuchung der „Rand“-Triplets konnten zwei  $\delta_1/\delta_2$ -Verhältnisse gut bestimmt werden.

- Überlagerung der äußeren Linien zu einem Dublett ( $\delta_1/\delta_2$ -Verhältnis=1/6)



- Überlagerung der äußeren Linien zu einem Singulett ( $\delta_1/\delta_2$ -Verhältnis=1/5)



## Auswertung

### Bestimmung von $\Delta g_{eff}$

Für die weitere Auswertung ist es wichtig, die  $\Delta g_{eff}$  zu bestimmen. Da beim Helium Spinwechselwirkungen keine Rolle spielen, kann hier das  $\Delta g_{eff}$  (wegen des gleichen gyromagnetischen Verhältnisses) einfach zu 1 bestimmt werden. Schwieriger gestaltet es sich beim Quecksilber, da hier auch die Spins einen Energiebeitrag liefern, der jedoch wegen der verschiedenen gyromagnetischen Verhältnissen sich von dem der Bahndrehimpulse unterscheidet. Die Übergänge  $^3S_1(l=0, j=1, s=1, m_j=1) \rightarrow ^3P_1(l=1, j=1, s=1, m_j=1)$  (blau) bzw.  $^3S_1(l=0, j=1, s=1, m_j=1) \rightarrow ^3P_2(l=1, j=2, s=1, m_j=1)$  (grün) ( $l$ =Bahndrehimpuls,  $j$ =Gesamtdrehimpuls,  $s$ =spin) werden mit dem  $m_j=0 \rightarrow m_j=0$ -Übergang verglichen und aus diesen dann das  $\Delta g_{eff}$ -Verhältnis berechnet. Es gilt:

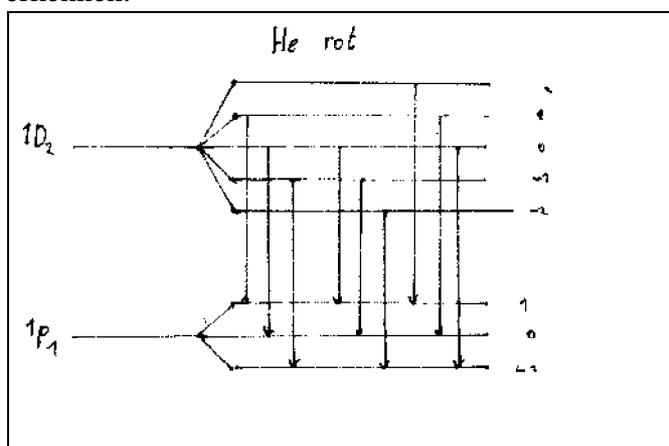
$$g = 1 + \frac{j(j+1)+s(s+1)-l(l+1)}{2j(j+1)} \quad g_{eff} = g^1 m_j^1 - g^2 m_j^2$$

$\Delta g_{eff}$  ergibt sich beim Quecksilber für beide Spektrallinien zu 0,5.

Für Helium ergibt sich wegen des Spins  $s=0$  ein  $\Delta g_{eff}$  von 1.

### Untersuchung der Heliumlinien

Bei den Helium-Linien treten zwei Effekte auf: Der normale Zeeman-Effekt und der Paschen-Back-Effekt. Da in beiden Fällen die Aufspaltung beider Niveaus in gleiche äquidistante Energien stattfindet, gibt es trotz der vielen Übergangsmöglichkeiten nur 3 Linien, da die Linie nur von der Änderung von  $m_j$  abhängt. Dies läßt sich auch in den Termschemata erkennen.



### Bestimmung von $\mu_b$

$\mu_b$  ergibt sich aus den gemessenen Werten wie folgt (Herleitung: Anleitungsblatt)

$$\mu_b = \frac{hc}{2d} \frac{\Delta a_1}{\Delta g_{eff} H \Delta a_2}$$

Für die Berechnung wurde zuerst zwischen den verschiedenen Werten einer Meßreihe gemittelt und dann aus der Eichkurve das entsprechende Magnetfeld dazu abgelesen. Die Ergebnisse wurden mit einer Tabellenkalkulation ausgerechnet. Das kam dabei heraus, rauf bedeutet, daß der Strom hochgefahren wurde, runter das Gegenteil:

| Linie | I(mA) | H-Feld(T) | $\Delta g_{eff}$ | $\delta_1/\delta_2$ | $\mu_b (10^{-5} \text{eV/T})$ |
|-------|-------|-----------|------------------|---------------------|-------------------------------|
|-------|-------|-----------|------------------|---------------------|-------------------------------|

|             |          |      |     |      |      |
|-------------|----------|------|-----|------|------|
| rot,rauf    | 487,25   | 0,34 | 1   | 0,25 | 6,03 |
| rot,unter   | 474      | 0,35 | 1   | 0,25 | 5,85 |
| rot,rauf    | 702,75   | 4,6  | 1   | 1/3  | 5,94 |
| rot,runter  | 641,75   | 4,7  | 1   | 1/3  | 5,81 |
| rot,rauf    | 944,5    | 6,1  | 1   | 1/2  | 6,72 |
| rot,runter  | 938,25   | 6,3  | 1   | 1/2  | 6,5  |
| gelb,rauf   | 498      | 3,4  | 1   | 1/4  | 6,03 |
| gelb,runter | 453,5    | 3,4  | 1   | 1/4  | 6,03 |
| gelb,rauf   | 766      | 4,8  | 1   | 1/3  | 5,69 |
| gelb,runter | 723,25   | 5,25 | 1   | 1/3  | 5,2  |
| gelb,rauf   | 841,25   | 5,2  | 1   | 1/2  | 7,88 |
| gelb,runter | 725,25   | 5    | 1   | 1/2  | 8,2  |
| blau,rauf   | 572      | 3,8  | 0,5 | 1/7  | 6,16 |
| blau,runter | 559      | 3,8  | 0,5 | 1/7  | 6,16 |
| blau,rauf   | 116,25   | 6,8  | 0,5 | 1/4  | 6,03 |
| blau,runter | 1.024,75 | 6,6  | 0,5 | 1/4  | 6,21 |
| grün,rauf   | 675,5    | 4,5  | 0,5 | 1/6  | 6,07 |
| grün,runter | 615,5    | 4,55 | 0,5 | 1/6  | 6    |
| grün,rauf   | 874,25   | 5,75 | 0,5 | 1/5  | 5,7  |
| grün,runter | 829,75   | 5,8  | 0,5 | 1/5  | 5,65 |

Als Mittelwert ergibt sich  $\mu_b = 6,194 \cdot 10^{-5}$  eV/T. Dies stimmt mit dem Literaturwert von  $5,788 \cdot 10^{-5}$  eV/T ganz gut überein, wenn man bedenkt, welche zahlreiche Fehlerquellen der Versuch beinhaltet. Die Einstellung auf gleichmäßige Muster ist eben nur mäßig präzise, was auch an den Schwankungen innerhalb einer Meßreihe erkennen kann. Die Standardabweichung der Meßreihen lag meistens so im 5%-Bereich, wobei sowohl Fehler als auch die Abweichung vom Literaturwert dann am höchsten sind, wenn das geometrisch Muster am schwersten auszumachen war (starke Abweichung bei 0,5-Verhältnis von Helium gelb). Desweiteren ergibt sich ein Fehler beim Ablesen der Eichkurve des Magneten, gerade auch, weil die Kopie eine einmalige Qualität hat. Somit liegt der Fehler für das Magnetfeld insgesamt bei ca. 8%. Desweiteren kann auch der Abstand im Interferometer fehlerbehaftet sein, was sich jedoch unserer Kenntnis entzieht. Die restlichen Größen sind nicht fehlerbehaftet. Bleibt insgesamt ein Fehler von ca 8%, was die Abweichung vom Literaturwert (6%) ganz gut erklärt. Um den Fehler zu senken, müßte man mehr Meßreihen machen, was zu einer besseren Statistik führen würde.