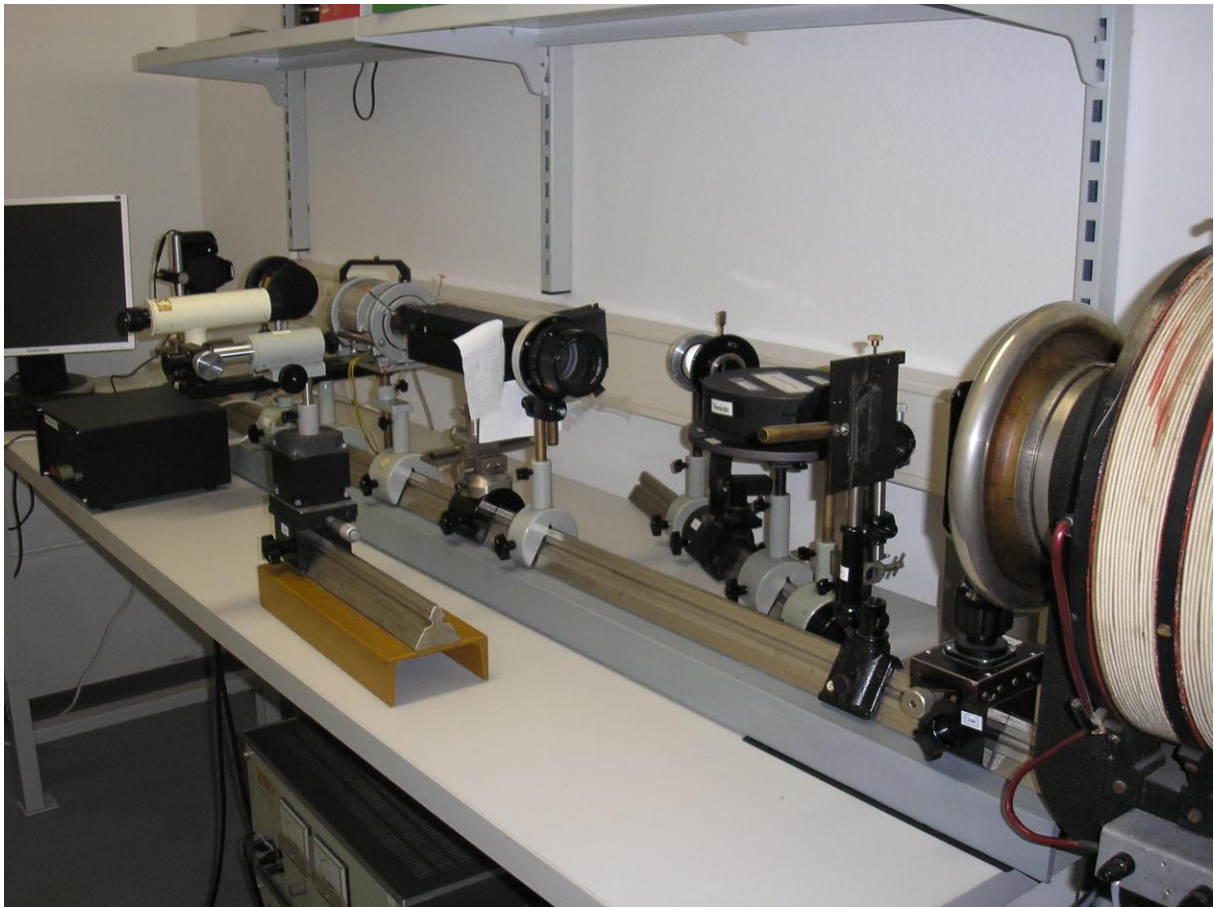


Zeeman-Effekt



1. Grundlagen

A) Zusammenfassung

In diesem Versuch werden grundlegende Eigenschaften des Atombaus und deren Einfluss auf die Spektroskopie kennen gelernt. Werden strahlende Atome einem Magnetfeld ausgesetzt, kommt es durch die Wechselwirkung zu einer energetischen Verschiebung bestimmter Energieniveaus und zu einer Energieaufspaltung. Die einzelnen Linien weisen zum Teil unterschiedliche Polarisierung auf. Diese Aufspaltung, die proportional zum Magnetfeld ist, wird im Versuch für verschiedene Spektrallinien untersucht. Aus den Aufspaltungen kann man das Verhältnis e/m und den Landé-Faktor bestimmen. Sie lernen die Spektralapparate mit den höchsten derzeit erreichten Auflösungsvermögen im sichtbaren Spektralbereich kennen.

Für die Arbeiten über den Effekt des Einflusses von Magnetfeldern auf die Strahlungseigenschaften von Atomen erhielt P. Zeeman 1902 den Nobelpreis für Physik.

B) Lernziele und Methoden

- Erarbeitung der Grundlagen der hochauflösenden Spektroskopie mit Interferenzspektralapparaten und deren wichtigster Parameter: freier Spektralbereich, Auflösungsvermögen, Finesse, Interferenzen gleicher Neigung und gleicher Dicke
- Messung geringer Lichtintensitäten mit CCD-Kamera
- Erzeugung hoher Magnetfelder
- Anwendung atomphysikalische Grundbegriffe: z.B. Bahndrehimpuls, Spin, Quantenzahlen, Pauliprinzip, Spin-Bahn-Wechselwirkung, Multiplizität, magnetisches Moment, Feinstrukturaufspaltung
- Kennenlernen des normalen und anomalen Zeemaneffektes, Nutzung zur Bestimmung des Verhältnisses e/m

Beachten Sie auch die Fragen zum Versuch unter Kapitel 5.

C) Literatur:

- zur Spektroskopie (Empfehlungen hervorgehoben):

1. Demtröder, Experimentalphysik 2, Springer-Verlag 1995, 10.4., 11.6.
2. Demtröder, Laser-Spektroskopie, Springer-Verlag 1993, S. 80-95
3. Bergmann/Schäfer, Lehrbuch d. Exp. Physik Bd III, Optik, Kap. 3.5.
4. Grimsehl, Lehrbuch der Physik, Bd. III, Kap. 3.1.9.
5. Hecht, Optik, Oldenbourg 2005, Kap. 9.6.1.
6. Klein/Furtak: Optik, Springer 1988, Kap. 5.4., 5.5.
7. M. Born, Optik, Springer-Verlag 1985, S. 132 ff,
8. Kohlrausch, Praktische Physik, Teubner, Stuttgart 1996, **Kap. 6.3., spez. 6.3.1.**

- zum Zeeman-Effekt:

Lehrbücher zur Atomphysik, wie

9. Demtröder, Experimentalphysik 3, Springer-Verlag 1996, **Kap. 5.2., 5.5.**
10. Bergmann/Schäfer, Lehrbuch d. Exp. Physik Bd III, Optik, Kap. 4.14.,
Bd IV, Teilchen, Kap. 1.6.1.1., 1.6.1.2.
11. Grimsehl, Lehrbuch der Physik, Bd. IV, Teubner 1990, 1.3.7.6.
12. M. Born, Optik, S 455 ff, Springer-Verlag 1985
13. Finkelburg, Einführung in die Atomphysik, Springer 1976, Kap. 16, 17
14. Sommerfeld, Atombau und Spektrallinien Bd. 1, 1978, Kap. 6.4., 6.5.
15. Haken/Wolf: Atom- u. Quantenphysik, Springer 1983, Kap.13
17. Handbuch der Physik, Bd. XXI Berlin 1927 (Kap.7 Zeemaneffekt, von Landé)
18. Handbuch der Physik, Bd. XXII/1 Berlin 1929 (Kap. 1, W. Gerlach)

- und spezieller:

Handbuch der Physik, Bd.XXXV, Springer 1957, S. 88 ff, (Bethe, Salpeter, Quantum
Mechanics of One- and Two-Electron Systems)
Handbuch der Physik, Bd. XV, Springer-Verl. 1927, S. 216 ff (Magnetontentheorien)

empfehlenswert:

- Historischer Artikel zum anomalen Zeeman-Effekt und Elektronenspin in Zeitschrift:
„Physik in unserer Zeit“ 4/99 (Artikel über W. Pauli)
- Wiedemann, Handbuch der Physik (1906), 6.Bd., Optik:... Zur damaligen Vorstellung über
die Atome, Strahlungsemission usw.

2. Aufgabenstellung

MA1:

Bestimmung des Verhältnisses e/m aus der Aufspaltung der Zn-Linie $\lambda_1 = 468,01\text{nm}$ in einem veränderlichen Magnetfeld (Lichtquelle: Zn-Lampe ZNE-16, Spektralapparate: Lummer-Gehrcke-Platte und Fabry-Perot-Interferometer).

MA2:

Untersuchung der Aufspaltung der Zn-Linien $\lambda_2 = 472,2\text{ nm}$ und $\lambda_3 = 481,05\text{ nm}$ und Überprüfung des Ergebnisses hinsichtlich der Möglichkeit, sie zur Bestimmung des e/m - Verhältnisses zu nutzen.

MA3:

Untersuchung des Zeeman-Effektes der roten Zn-Linie $\lambda = 636,23$ mittels Lummer-Gehrcke-Platte, Bestimmung von e/m aus dem normalen Zeeman-Effekt

MA4:

Untersuchung der Polarisation von Zeeman-Linien bei transversaler und longitudinaler Beobachtung.

Die Aufgabenstellung und der Versuchsablauf können vom Betreuer verändert werden.

3. Experimentelles

Vorhandene Geräte:

- Zn-Dampfampe
- regelbarer u. drehbarer Weiß'scher Magnet mit Helmholtzspulen
- piezoverstellbares Fabry-Perot-Interferometer
- Lummer-Gehrcke-Platte
- Polarisator und $\lambda/4$ -Platte
- Geradsichtprisma
- Beobachtungsfernrohr
- Hallsonde zur Magnetfeldmessung
- CCD-Kamera mit PC-Anschluß
- PC zur Auswertung

Versuchsaufbau

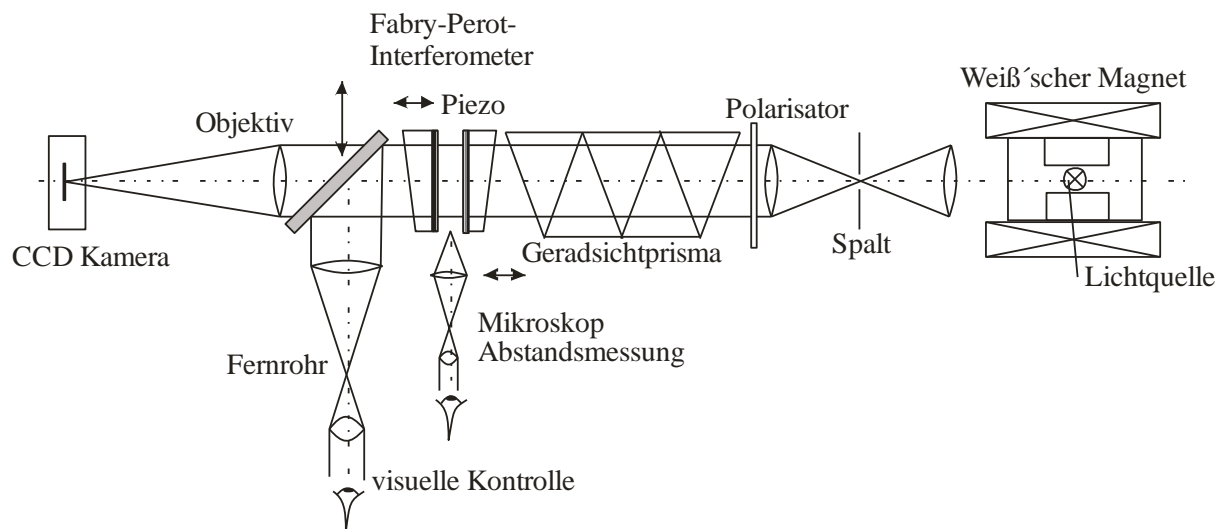


Abbildung 1: Versuchsaufbau zum Zeemaneffekt

Die optische Anordnung des Versuches ist schematisch in Abb.1 dargestellt. Die Lichtquelle befindet sich in einem annähernd homogenen Magnetfeld eines Weiß'schen Magneten. Seine magnetische Induktion B kann mit einem geeichten B -Feld-Messinstrument bestimmt werden. Die Strahlungsquelle wird mit einem Regeltransformator unter Zwischenschaltung einer Drossel betrieben.

! Achtung 220 V nicht überschreiten!

Der Kondensator bildet die Lichtquelle auf den Spalt ab. Dieser Spalt steht seinerseits in der Brennebene der Linse. Kollimatorlinse und Spalt bilden einen Kollimator, von dem eine Schar von Parallelstrahlbündeln unterschiedlicher Neigung zur optischen Achse ausgeht. Mit

diesen Parallelstrahlbündeln wird das Spektrometer beleuchtet, das aus zwei Systemen besteht.

Im Geradsichtprisma erfolgt die spektrale Vorzerlegung, so dass im Teleskop bzw. dem von der CCD-Kamera aufgenommenen Bild einzelne Spektrallinien - je nach Breite des Spaltes mehr oder weniger gut - voneinander getrennt werden können. Da durch das Geradsichtprisma P nur in erster Näherung die Strahlrichtung beibehalten wird, ist die CCD-Kamera so montiert, dass sie neben der ursprünglichen optischen Achse positioniert werden kann.

Das spektral hochauflösende System - eine Lummer-Gehrcke-Platte (LGP) oder ein piezoelektrisch verstellbares Fabry-Perot-Interferometer (FPI) - wird nach dem Geradsichtprisma eingesetzt. Beide Geräte führen innerhalb der angebotenen Strahlrichtungen eine spektral hochauflösende Richtungssortierung durch.

Bei der LGP erfolgt diese in vertikaler Richtung, so dass man im Fernrohr z.B. die Zeeman-Aufspaltung der horizontal aufgelösten Linien des Zn-Tripletts gleichzeitig beobachten kann (**Methode der gekreuzten Dispersion** - ein altes Verfahren der Parallelverarbeitung unter Nutzung der Photographie oder heute mittels Vielelementdetektorsystemen, wie CCD-Arrays).

Das FPI mit seiner rotationssymmetrischen Zerlegung kann ähnlich genutzt werden. Zur genauen Messung ist es günstig, das Interferenzbild in der Nähe der zentralen Ordnung zu beobachten.

Zur Wellenlängeneichung wird in beiden Fällen das aus der Plattendicke bzw. dem Plattenabstand bestimmte Dispersionsgebiet der Interferometer genutzt (s.u.).

Die Bestimmung der Polarisationsrichtung erfolgt durch eine gemäß Abb.1 eingebrachte drehbare Polarisationsfolie und gegebenenfalls eine $\lambda / 4$ - Platte.

4. Hinweise zur Versuchsdurchführung

4.1. Justierung und Versuchsdurchführung:

Unter Berücksichtigung von Höhe und Gesamtrichtung für die auszuwählende Wellenlänge wird unter Zuhilfenahme eines weißen Stückes Papier sowie des auf Unendlich eingestellten Fernrohres die Seitenrichtung der Schienen, die Höhe der Bauteile und deren Entfernung zueinander festgelegt und zwar zunächst für die Vorzerlegung: *Kollimator-Prisma-Spiegel-Fernrohr* bzw. *Kollimator-Prisma-Objektiv-CCD*.

a) Messung mit der Lummer-Gehrcke-Platte (LGP):

(Ernst Gehrcke war von 1946-1949 Professor an der Jenaer Universität)

Die LGP wird vertikal in geeigneter Höhe eingebaut und durch Kippen justiert, wobei auch die Fernrohrbeobachtung mittels Spiegel unter geeignetem Winkel eingestellt wird.

Der Vorteil der LGP besteht darin, dass Messungen sowohl an der roten Linie wie auch am Zn-Triplett nacheinander vorgenommen werden können, während die Vielfachbeschichtung der FPI-Platten auf blaugrün festgelegt ist.

Die wellenlängenabhängige (!) Brechzahl und die Dicke der Lummer-Gehrcke-Platte sind am Versuchsplatz angegeben.

b) Messung mittels FPI:

Der Plattenabstand des FPI ist wahlweise zwischen 0 und 50 mm einstellbar. Es wird die Einstellung eines Plattenabstandes von 5...10 mm empfohlen, der im Laufe der Messungen nach Ansicht der Bearbeiter weiter optimiert werden kann. Der Plattenabstand wird mit einem Messmikroskop gemessen.

Zur Justierung des FPI, das möglichst symmetrisch eingebaut werden soll, betrachtet man im Teleskop das Spaltbild (die Spaltbilder) und verkippt den justierbaren Spiegel so, dass die Ränder der Spaltbilder möglichst scharf erscheinen.

In der Nähe dieses Justierzustandes ist durch sehr langsames Drehen an den Justierschrauben (zwischendurch anhalten) nach den ringförmigen Interferenzen zu suchen. Hat man diese gefunden, ist durch weitere sorgfältige Feinjustierung die bestmögliche rotationssymmetrische Schärfe (Linienauflösung) einzustellen. Den Symmetriepunkt der Interferenzerscheinung stellt man durch Horizontaldrehen des FPI auf die gewünschte Linie ein.

Mit beiden Spektralapparaten werden jeweils Serien von Aufnahmen bei steigendem Magnetfeld gemacht und die Linienaufspaltung vermessen, z.B. mit Hilfe von Intensitätsprofilen, die mit dem Programm ImageJ erstellt werden können. Um die linear polarisierten Zeeman-Komponenten auszublenden, wird bei Bedarf zwischen Kollimator und Prisma ein Polarisationsfilter eingesetzt.

Die Linienaufspaltung wird mit Hilfe des errechneten freien Spektralbereichs und des gemessenen Abstandes der Interferenzordnungen auf eine Wellenlängenskala umgerechnet.

4.2. Auswertung der Spektren (FPI)

Die optische Wegdifferenz s zwischen den im Fabry-Perot-Interferometer interferierenden Teilwellen ist

$$\Delta s = 2 n d \cos \gamma.$$

Dabei sind n die Brechzahl zwischen den Interferometerplatten (sie ist in unserem Falle in guter Näherung gleich 1), d der Plattenabstand und γ der Winkel zwischen den einfallenden Parallelstrahlbündeln und der Plattennormalen.

Die vom Fabry-Perot-Interferometer transmittierte Intensität I_T

ist

$$I_T = \frac{1}{1 + \frac{4R}{(1-R)^2 \sin^2\left(\frac{\Phi}{2}\right)}} \quad (1).$$

R ist dabei das mittlere Reflexionsvermögen beider Fabry-Perot-Platten und $\Phi = 2\pi \Delta s/\lambda$ die Phasendifferenz zwischen den interferierenden Bündeln. λ ist die Lichtwellenlänge, mit der das Interferometer beleuchtet wird. Die transmittierte Intensität erreicht ihren Maximalwert bei

$$\Phi = 2 m \pi ; m = 0, 1, 2, \dots \quad \text{oder} \\ m \lambda = 2 d \cos \gamma \quad (2).$$

Die beobachteten Interferenzordnungen m sind also von der Größenordnung d/λ . Mit zunehmendem Winkel γ sind Interferenzen zunehmender Ordnung zu beobachten.

Der „Freie Spektralbereich“ (alte Bezeichnung: „Dispersionsgebiet“) zwischen diesen ist gegeben durch $\Delta\lambda = \lambda/m$. Mit (2) ergibt sich daraus (unter der Annahme sehr kleiner Winkel)

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2d} \quad (3)$$

Mit diesem Wert wiederholt sich das Spektrum und diese Periodizität wird bei der Auswertung zur Wellenlängenkalibrierung genutzt. Eindeutigkeit im Spektrum eines Interferometers ist nur vorhanden, wenn das untersuchte Spektrum den Wert des Freien Spektralbereiches nicht überschreitet. Diese Bedingung wird durch geeignete Vorzerlegung – in unserem Falle durch ein Prisma P- realisiert. Die aufgenommenen Spektren sind wegen der Kosinus-Abhängigkeit vom Einfallswinkel nichtlinear. Um die Fehler bei der Auswertung gering zu halten und ein leichteres Mitteln der Ordnungen zu ermöglichen, ist es günstig, die Abszissenwerte vor der Auswertung durch Multiplikation mit einer geeigneten Funktion zu linearisieren.

Das Auflösungsvermögen eines Fabry-Perot-Interferometers (effektive Bündelzahl = „Finesse“ mal Ordnung) ist bei hohem Reflexionsvermögen im Idealfall sehr guter Platten und guter Justierung gegeben durch

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{\pi}{(1-R)} \cdot \frac{2d}{\lambda} \quad (4)$$

Der Plattenabstand d ist der Aufgabenstellung entsprechend zu wählen und das Interferometer so gut wie möglich zu justieren.

F: Bei der Lummer-Gehrcke-Platte gilt für die Wegdifferenz im Grenzfall des Strahlenaustritts parallel zur Plattenoberfläche $\Delta s = 2 n d \cos\varphi$ mit dem Grenzwinkel der Totalreflexion φ . Leiten Sie die Formel für den freien Spektralbereich ab (unter Vernachlässigung der Dispersion des Glases).

Aufnahmen der Spektren mit der CCD Kamera Canon 350:

0. Prüfen Sie, ob der Computer mit der Kamera mit dem USB Kabel verbunden ist.
1. Starten Sie den Computer und legen Sie unter dem Verzeichnis „\Gast“ ihr eigenes Verzeichnis mit dem Namen: „Datum des Versuchbeginns“ an.
2. Schalten sie die Kamera ein „on“ und wählen Sie die Betriebsart „M“ (manual)
3. Nehmen Sie das Canonobjektiv ab und bilden Sie mit einem 300 mm Objektiv die Interferenzen auf die CCD ab. (**„Kamerainneres“ inklusive Klappspiegel nicht berühren und staubfrei halten!**) In dem Sie durch den Kamerasucher schauen, können Sie die Interferenzen durch Verschieben der Linse fokussieren.
4. Auf dem Rechner erscheint ein Fenster, in dem Sie folgendes Programm auswählen: „Canon Camera Window Downloads Images from Canon Camera“
5. Es erscheint das Camera Fenster. Wählen Sie „remote shooting“ und starten sie mit „starts remote shooting“
6. Jetzt wählen Sie das von Ihnen angelegte Verzeichnis mit „Dateifolder“. Dann werden alle aufgenommenen Bilder automatisch auf ihrem Verzeichnis gespeichert.
7. Benutzen Sie das Bedienfenster auf dem Monitor, um die Kamera zu betreiben. Mit einem Mausklick auf das Kamerasymbol lösen Sie die Kamera aus. Weiterhin können Sie die Belichtungszeit mit dem Bedienfenster zwischen 30 Sekunden und 1/4000 Sekunden wählen und Ihrem Signal anpassen. Unterdrücken Sie jegliches Streulicht bei der Kamerabelichtung, insbesondere bei langen Belichtungszeiten.

WICHTIG: Nach benutzen der Kamera bitte diese ausschalten und die Kameraöffnung sowie Objektivöffnung abdecken!

4.3. Zu Aufgabe 1

Beim Einschalten des Magnetfeldes zeigt das Triplet der Nebenserie des Zn-Atoms ($\lambda_1 = 468,01 \text{ nm}$, $\lambda_2 = 472,2 \text{ nm}$ und $\lambda_3 = 481,05 \text{ nm}$) einen anomalen Zeeman-Effekt. Die Übergänge entsprechen den Termdifferenzen

$$\begin{aligned} 5^3S_1 - 4^3P_0 &\sim \lambda_1 \\ 5^3S_1 - 4^3P_1 &\sim \lambda_2 \\ 5^3S_1 - 4^3P_2 &\sim \lambda_3 \end{aligned}$$

(Zur Nomenklatur der Quantenzahlen: z.B. 5^3S_1

5 - Hauptquantenzahl: 1,2,3,4...

³ - Multiplizität: $2S+1$: 1,2,3,...; mit S Betragsquantenzahl des Gesamtspins,

S - Bahndrehimpulszahl L, S=0, P=1, D=2

₁ - Quantenzahl für den Gesamtdrehimpuls $J=L-S \dots L+S$: 0,1,2,...)

Optische Übergänge zwischen den aufgespalteten Zeeman-Niveaus ergeben sich aus den Auswahlregeln $\Delta m_j = 0, \pm 1$ (m_j sind die magnetischen Quantenzahlen für den Gesamtdrehimpuls). Achtung: Bei einem der Übergänge gibt es eine Ausnahme von dieser Regel!

Die Übergänge für $\Delta m_j = 0$ ergeben parallel zu den magnetischen Kraftlinien polarisiertes Licht (π -Komponenten), während das Licht für $\Delta m_j = \pm 1$ rechts (+1) und links (-1) zirkular (um die Kraftlinien) polarisiert ist (σ -Komponenten).

Die Energiedifferenzen zwischen den Zeeman-Komponenten betragen

$$h\Delta\nu = \frac{e}{4\pi m} h (m_1 g_1 - m_2 g_2) B \quad (5).$$

g_1 und g_2 sind die LANDÉ-Faktoren für den Anfangs(3S_1)- und End(z.B. 3P_0)- Zustand.

Für λ_1 erhält man $g_1 = 2$, $m_1 = +1, 0, -1$ und $m_2 g_2 = 0$, weil m_2 für 3P_0 den Wert Null besitzt.

In der gewählten Versuchsanordnung wird senkrecht zu den Kraftlinien des Magnetfeldes beobachtet. Um eindeutige Beobachtungsverhältnisse zu erhalten, ist es zum Teil vorteilhaft, die π -Komponente mit dem Polarisator auszublenden. Die Aufspaltung der σ -Komponenten als Funktion des Magnetfeldes ist zu registrieren. Aus dem Abstand der Komponenten und der bekannten Größe des Dispersionsgebietes, das für $B = 0$ vermessen wurde, ist e/m zu ermitteln.

Die magnetische Induktion B kann mit einem Teslameter (Hallsonde) bestimmt werden, allerdings ist die Hallspannung temperaturabhängig, weshalb die Nähe der eingeschalteten Zn-Lampe zu einer Verfälschung und Drift der Werte führt. Daher ist es besser, bei ausgeschalteter Lampe eine Eichkurve $B(I)$ für den Variationsbereich des Magnetspulenstromes ($0 \text{ A} \leq I \leq 6 \text{ A}$) aufzunehmen und bei der Messung der Zeeman-Aufspaltung nur die Stromwerte aufzuzeichnen, die mit $B(I)$ in exaktere Induktionswerte übersetzt werden können. Zur e/m -Bestimmung ist eine Fehlerabschätzung durchzuführen.

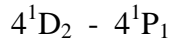
4.4. Zu Aufgabe 2

Es ist zu prüfen, ob sich die Linien λ_2 und λ_3 in der vorgegeben Versuchsanordnung ebenfalls für die Bestimmung von e/m eignen. Dazu sind

- a) die Termschemata der entsprechenden Übergänge $^3S_1 - ^3P_1$ und $^3S_1 - ^3P_2$ zu diskutieren und die Aufspaltungsbilder für ein schwaches Magnetfeld (RUSSEL-SAUNDERS-Kopplung vorausgesetzt) anzugeben. Auf der Grundlage der leicht aus der Aufgabe 1 feststellbaren Linienbreite der ZEEMAN-Komponenten sind die experimentellen Realisierungsmöglichkeiten zu diskutieren;
- b) für die beiden Linien die diskutierten Realisierungsmöglichkeiten für jeweils eine geeignete Magnetfeldstärke experimentell zu prüfen.

4.5. Zu Aufgabe 3

Die rote Zn-Linie ist eine Linie aus dem Singulett-System, nämlich der Übergang



Sie zeigt daher normalen Zeeman-Effekt ($S=0$).

4.5. Arbeitsschutz

Polschuhe nicht unmittelbar bis an den Glaskolben der Zn-Lampe führen! Mindestens einen Abstand von jeweils 1 mm bis zur Wandung lassen!

Stromstärke des Magneten höchstens *kurzzeitig* bis 8 A steigern.

In der Regel mit Strömen ≤ 6 A arbeiten.

5. Aufgaben und Fragen zum Versuch

Zur Vorbereitung:

- AV1: Was verstehen Sie unter normalen und anomalen Zeemaneffekt, sowie Paschen-Back Effekt?
- AV2: In wie viele Komponenten spalten die einzelnen Zn-Linien auf?
- AV3: Was ist das spektrale Auflösungsvermögen sowie der freie Spektralbereich von LGP und FPI?
- AV4: Vergleichen Sie verschiedene Spektralapparate bezüglich Auflösungsvermögen, nutzbarem Spektralbereich und Lichtstärke!
- AV5: Wie können Sie diese Größen beeinflussen?
- AV6: Was ist beim Piezoeffekt zu beachten?
- AV7: Was verstehen Sie unter räumlicher und zeitlicher Kohärenz?
- AV8: Was sind Interferenzen gleicher Neigung und gleicher Dicke? Wann beobachten Sie diese?
- AV9: Unter welchen Bedingungen beobachten Sie Zeeman- bzw. Paschen-Back-Effekt?