

## Beobachtung des normalen Zeeman-Effekts in transversaler und in longitudinaler Konfiguration

Spektroskopie mit einem Fabry-Perot-Etalon

### Versuchsziele

- Beobachtung des Linientriplets beim normalen, transversalen Zeeman-Effekt.
- Bestimmung des Polarisationszustandes der Triplettkomponenten.
- Beobachtung des Liniendubletts beim normalen, longitudinalen Zeeman-Effekt.
- Bestimmung des Polarisationszustandes der Dublett Komponenten.

### Grundlagen

#### Normaler Zeeman-Effekt:

Als Zeeman-Effekt bezeichnet man die Aufspaltung von atomaren Energieniveaus bzw. von Spektrallinien bei Einwirkung eines äußeren Magnetfeldes. Der Effekt wurde 1895 von H. A. Lorentz im Rahmen seiner klassischen Elektronentheorie vorhergesagt und ein Jahr später von P. Zeeman experimentell bestätigt. Zeeman beobachtete senkrecht zum Magnetfeld anstelle einer einzelnen Spektrallinie ein Linientriplett und parallel zum Magnetfeld ein Liniendublett. Später wurden kom-

pliziertere Aufspaltungen von Spektrallinien entdeckt, die man anomaler Zeeman-Effekt nannte. Zur Erklärung führten Goudsmit und Uhlenbeck 1925 die Hypothese des Elektronenspins ein. Es stellte sich heraus, dass der anomale Zeeman-Effekt der Regelfall und der normale Zeeman-Effekt die Ausnahme ist.

Der normale Zeeman-Effekt tritt nur an Übergängen zwischen atomaren Zuständen mit dem Gesamtspin  $S = 0$  auf. Der Gesamtdrehimpuls  $\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}$  eines Zustandes ist dann ein reiner Bahndrehimpuls ( $\mathbf{J} = \mathbf{L}$ ). Für das mit ihm verbundene magnetische Moment gilt einfach

$$\mu = \frac{\mu_B}{\hbar} \mathbf{J} \quad (I)$$

mit

$$\mu_B = \frac{\hbar e}{2m_e} \quad (II)$$

( $m_B$  = Bohrsches Magneton,  $m_e$  = Masse des Elektrons,  $e$  = Elementarladung,  $\hbar = h/2\pi$ ,  $h$  = Plancksche Konstante).

Mit dem magnetischen Moment ist in einem äußeren Magnetfeld  $\mathbf{B}$  die Energie

$$E = -\mu \cdot \mathbf{B} \quad (III)$$

verknüpft. Die Drehimpulskomponente in Magnetfeldrichtung kann die Werte

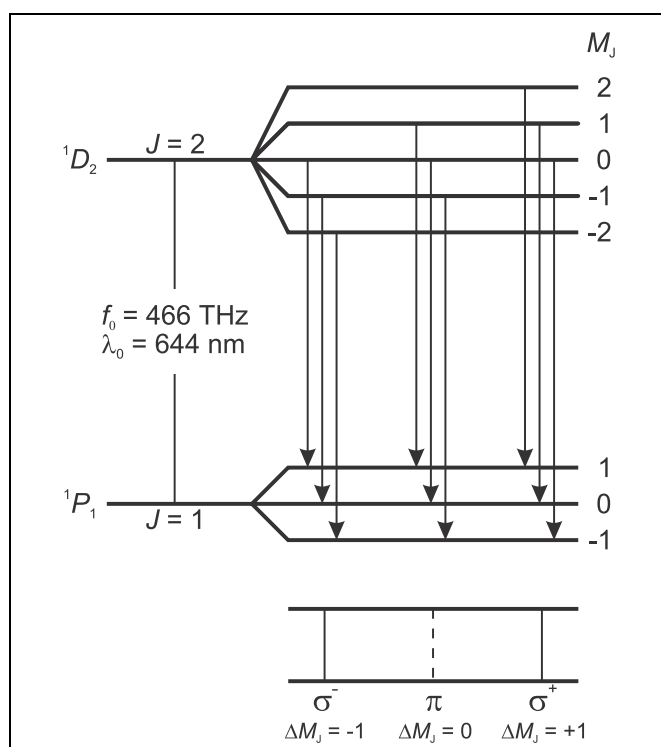
$$J_z = M_J \cdot \hbar \text{ mit } M_J = J, J-1, \dots, -J \quad (IV)$$

annehmen. Daher spaltet der Term mit dem Drehimpuls  $\mathbf{J}$  in  $2J+1$  äquidistante Zeeman-Komponenten auf, die sich durch den Wert von  $M_J$  unterscheiden. Der Energieabstand benachbarter Komponenten  $M_J, M_{J+1}$  beträgt

$$\Delta E = \mu_B \cdot B \quad (V).$$

Beobachten kann man den normalen Zeeman-Effekt z.B. an der roten Spektrallinie des Cadmium ( $\lambda_0 = 643,8 \text{ nm}$ ,  $f_0 = 465,7 \text{ THz}$ ). Sie entspricht dem Übergang  $^1D_2$  ( $J=2, S=0$ )  $\rightarrow$   $^1P_1$  ( $J=1, S=0$ ) eines Elektrons der 5. Schale (siehe Fig. 1). In einem Magnetfeld spaltet das Niveau  $^1D_2$  in fünf und das Niveau  $^1P_1$  in drei Zeeman-Komponenten mit dem in Gleichung (V) berechneten Abstand auf.

Fig. 1 Niveaufspaltung und Übergänge beim normalen Zeeman-Effekt an Cadmium



### Geräte

1 Cadmiumlampe zum Zeeman-Effekt . . .	451 12
1 U-Kern mit Joch . . . . .	562 11
2 Spulen, 10 A, 480 Windungen . . . . .	562 131
1 Paar Polschuhe mit großer Bohrung . . . .	560 315
1 Fabry-Perot-Etalon . . . . .	471 221
2 Sammellinsen in Fassung, 150 mm . . . .	460 08
1 Viertel-Wellenlängen-Platte . . . . .	472 601
1 Polarisationsfilter . . . . .	472 401
1 Halter mit Federklemmen . . . . .	460 22
1 Satz Farbfilter, primär . . . . .	467 95
oder	
1 Halter für Interferenzfilter . . . . .	468 41
1 Interferenzfilter, 644 nm . . . . .	468 400
1 Okular mit Strichskala . . . . .	460 135
1 Optische Bank mit Normalprofil, 1 m . . .	460 32
1 Reiterfuß mit Gewinde . . . . .	460 358
7 Optikreiter 60/50 . . . . .	460 351
1 Universal-Drossel zu 451 12 . . . . .	451 30
1 Hochstrom-Netzgerät . . . . .	521 55
Experimentierkabel mit Leiterquerschnitt 2,5 mm <sup>2</sup>	

Optische Übergänge zwischen diesen Niveaus sind nur in Form von elektrischer Dipolstrahlung möglich. Dabei gelten folgende Auswahlregeln für die magnetischen Quantenzahlen  $M_J$  der beteiligten Zustände:

$$\Delta M_J \begin{cases} = \pm 1 & \text{für } \sigma\text{-Komponenten} \\ = 0 & \text{für } \pi\text{-Komponenten} \end{cases} \quad (\text{VI})$$

Man beobachtet also insgesamt drei Spektrallinien (siehe Fig. 1), von denen die  $\pi$ -Komponente unverschoben bleibt und die beiden  $\sigma$ -Komponenten um

$$\Delta f = \pm \frac{\Delta E}{h} \quad (\text{VII})$$

gegenüber der Ausgangsfrequenz verschoben sind.  $\Delta E$  ist hier die in (V) berechnete äquidistante Energieaufspaltung.

### Sicherheitshinweise

Die elektrischen Zuleitungen an der Cadmiumlampe und die Widerstände der Zündelektroden sind frei zugänglich.

■ Berührung der stromführenden Teile vermeiden.

Lose ferromagnetische Gegenstände können vom Elektromagneten mit großer Kraft angezogen werden und den Quarzkolben der Cadmiumlampe beschädigen.

■ Vor Einschalten des Magnetstroms kontrollieren, ob die Polschuhe fest angeschraubt sind.

■ Bei eingeschaltetem Magnetstrom nicht mit ferromagnetischen Gegenständen in der Nähe der Cadmiumlampe hantieren.

Der Quarzkolben der Cadmiumlampe wird nach Ablagerung von Hautfett bei Erwärmung zerstört.

■ Quarzkolben der Cadmiumlampe niemals mit bloßen Händen anfassen.

### Winkelverteilung und Polarisation:

Je nach ihrer Drehimpulskomponente  $\Delta M_J$  in Magnetfeldrichtung weisen die emittierten Photonen unterschiedliche Winkelverteilungen auf. Fig. 2 zeigt die Winkelverteilungen als zweidimensionale Polardiagramme. Sie können experimentell beobachtet werden, da das Magnetfeld eine gemeinsame Achse für alle Cadmium-Atome ausgezeichnet.

Der Fall  $\Delta M_J = 0$  entspricht im klassischen Bild dem parallel zum Magnetfeld schwingenden Hertzischen Dipol. In Magnetfeldrichtung werden keine Quanten ausgesandt, d.h. die  $\pi$ -Komponente kann parallel zum Magnetfeld nicht beobachtet werden. Das senkrecht zum Magnetfeld abgestrahlte Licht ist linear polarisiert, wobei der  $\mathbf{E}$ -Vektor in Dipolrichtung bzw. parallel zum Magnetfeld schwingt (siehe Fig. 3).

Umgekehrt gehen im Fall  $\Delta M_J = \pm 1$  die meisten Quanten in die Magnetfeldrichtung. Im klassischen Bild entspricht dieser Fall zwei zueinander senkrechten Dipolen, die mit einer Phasendifferenz von  $90^\circ$  schwingen. Die Überlagerung der beiden Dipole ergibt einen Kreisstrom. In Magnetfeldrichtung wird daher zirkular polarisiertes Licht abgestrahlt, und zwar in positiver Feldrichtung für  $m = 1$  rechts zirkulares und für  $m = -1$  links zirkulares (siehe Fig. 3).

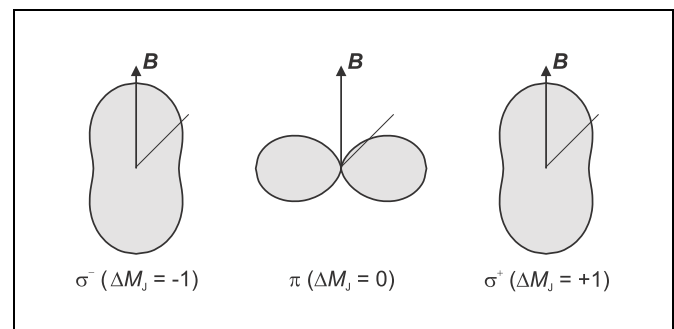


Fig. 2 Winkelverteilung der elektrischen Dipolstrahlung ( $\Delta M_J$ : Drehimpulsrichtung der emittierten Photonen in Magnetfeldrichtung)

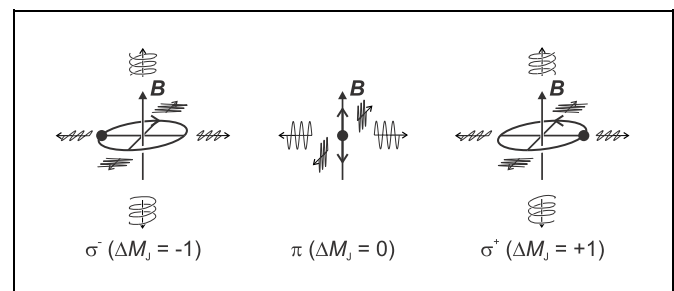


Fig. 3 Winkelverteilung der elektrischen Dipolstrahlung ( $\Delta M_J$ : Drehimpulsrichtung der emittierten Photonen in Magnetfeldrichtung)

### Spektroskopie der Zeeman-Komponenten

Durch den Zeeman-Effekt wird die spektroskopische Trennung der unterschiedlich polarisierten Komponenten ermöglicht. Zum Nachweis der Verschiebung ist allerdings ein Spektralapparat mit sehr hoher Auflösung erforderlich, denn die beiden  $\sigma$ -Komponenten der roten Cadmium-Linie werden z.B. bei einer magnetischen Flussdichte  $B = 1 \text{ T}$  nur um  $\Delta f = 14 \text{ GHz}$  bzw. um  $\Delta \lambda = 0,02 \text{ nm}$  verschoben.

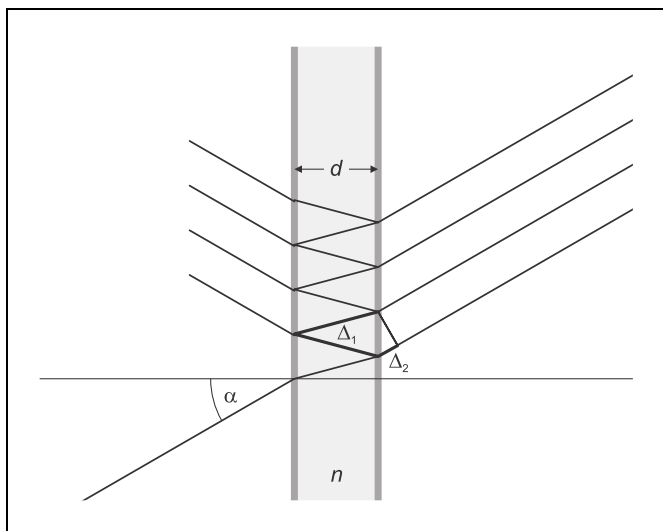


Fig. 4 Fabry-Perot-Etalon als Interferenzspektrometer. Gezeichnet ist der Strahlengang für einen Winkel  $\alpha > 0$  zur optischen Achse. Der optische Gangunterschied zweier benachbarter austretender Strahlen beträgt  $\Delta = n \cdot \Delta_1 - \Delta_2$ .

Im Experiment wird ein Fabry-Perot-Etalon eingesetzt. Dabei handelt es sich um eine im höchsten Maße planparallele Glasplatte, die beidseitig verspiegelt ist. Das leicht divergente Licht tritt in das senkrecht zur optischen Achse stehende Etalon ein und wird mehrfach hin und her reflektiert, wobei jedes Mal ein Teil austritt (siehe Fig. 4). Wegen der Verspiegelung ist der jeweils austretende Anteil nur klein, d.h. es können sehr viele austretende Strahlen miteinander interferieren. Die austretenden Strahlen werden hinter dem Etalon mit einer Linse in deren Brennebene fokussiert. Mit einem Okular kann dort zu einer Wellenlänge  $\lambda$  ein konzentrisches Ringsystem beobachtet werden. Der Öffnungswinkel eines Ringes ist identisch mit dem Austrittswinkel  $\alpha$  der Teilstrahlen aus dem Fabry-Perot-Etalon.

Die unter einem Winkel  $\alpha_k$  austretenden Strahlen interferieren konstruktiv miteinander, wenn zwei benachbarte Strahlen die Interferenzbedingung für „Kurven gleicher Neigung“ erfüllen (siehe Fig. 4):

$$\Delta = 2d \cdot \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha_k} = k \cdot \lambda \quad (\text{VIII})$$

( $\Delta$  = optischer Gangunterschied,  $d$  = Dicke des Etalons,  $n$  = Brechzahl des Glasmaterials,  $k$  = Interferenzordnung).

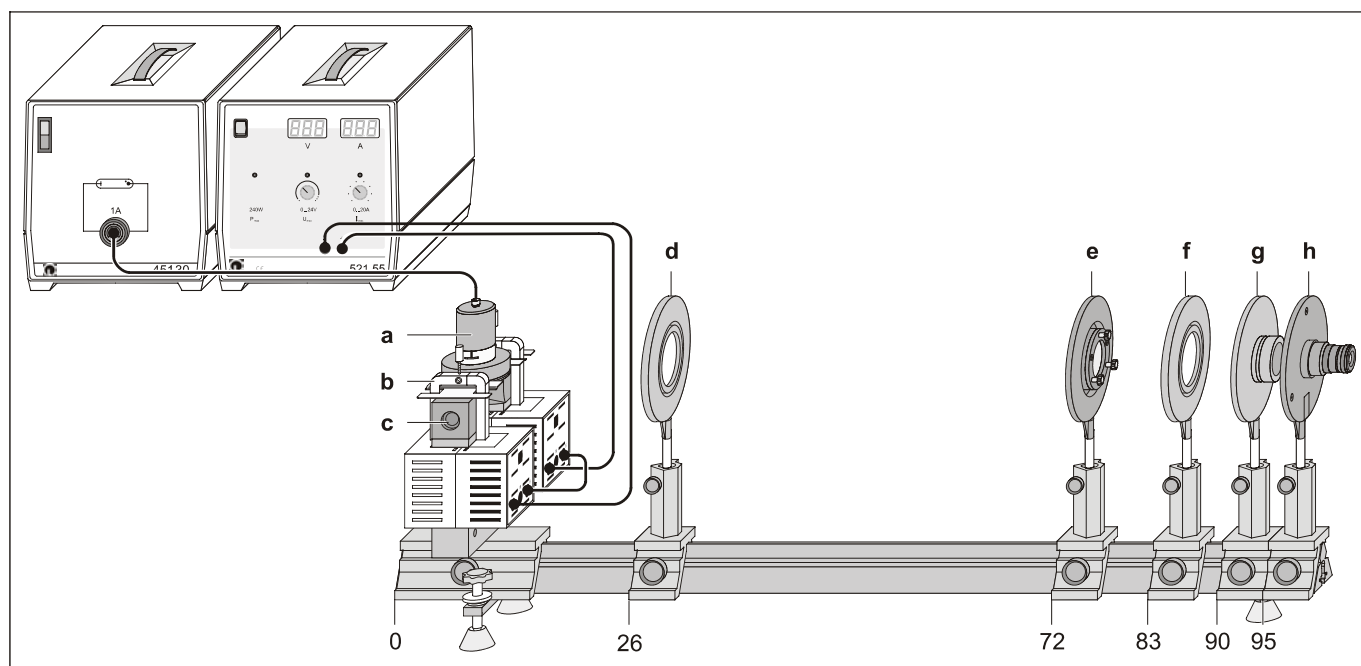
Eine Änderung der Wellenlänge um  $\delta\lambda$  macht sich als Änderung des Öffnungswinkels eines Ringes um  $\delta\alpha$  bemerkbar. Je nach Brennweite der Linse entspricht der Öffnungswinkel  $\alpha$  einem Radius  $r$  und die Winkeländerung  $\delta\alpha$  einer Radiusänderung  $\delta r$ . Enthält eine Spektrallinie mehrere Komponenten mit dem Abstand  $\delta\lambda$ , so wird jeder Interferenzring in entsprechend viele Komponenten mit dem radialen Abstand  $\delta r$  aufgespalten. Man erkennt also ein Spektrallinien-Dublett an einer Dublettstruktur und ein Spektrallinien-Triplett an der Triplettstruktur in den Interferenzringen.

## Aufbau

Fig. 5 zeigt den kompletten Versuchsaufbau in transversaler Konfiguration.

Fig. 5 Versuchsaufbau zum Zeeman-Effekt in transversaler Konfiguration mit Positionsangabe in cm für den linken Rand der optischen Reiter.

- a Cadmiumlampe mit Halteplatte
- b Klammern
- c Polschuhe
- d Sammellinse,  $f = 150$  mm (Kondensorlinse)
- e Fabry-Perot-Etalon
- f Sammellinse,  $f = 150$  mm (Abbildungslinse)
- g Farbfilter (rot) in Halterung
- h Okular mit Strichskala



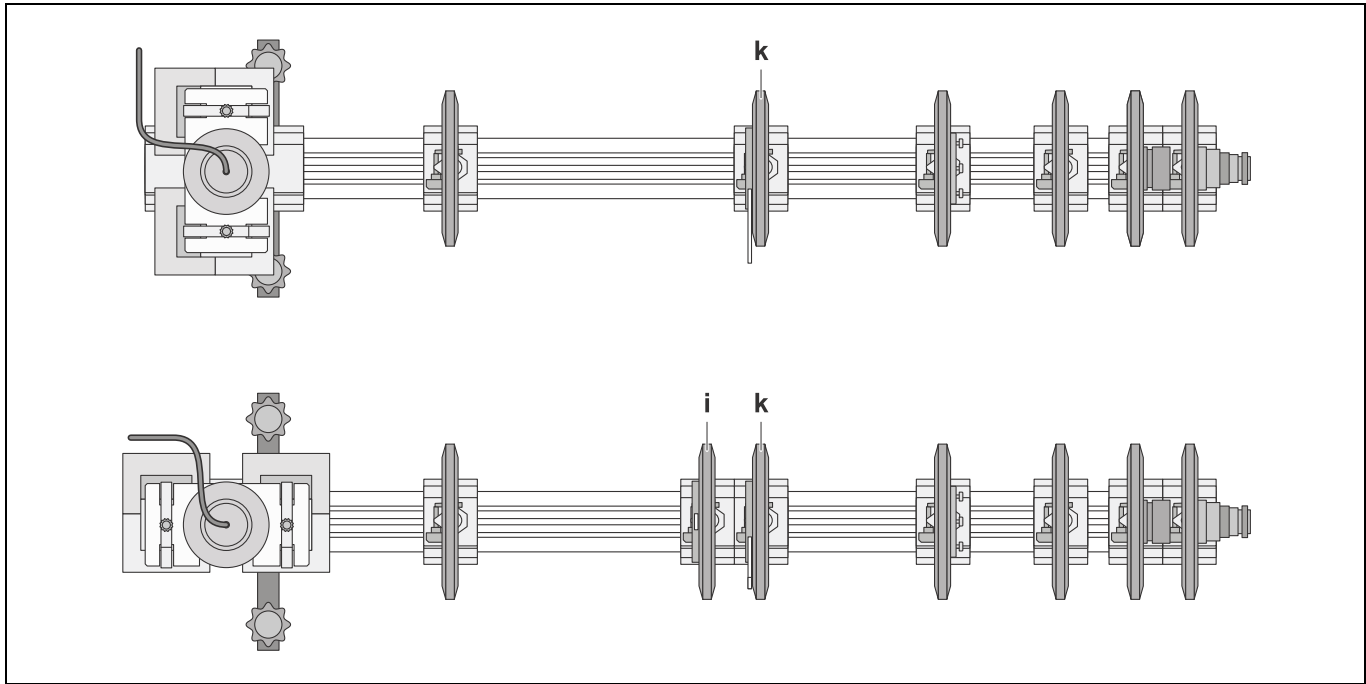


Fig. 6 Aufbau in transversaler Konfiguration (oben) und in longitudinaler Konfiguration (unten), von oben betrachtet.  
**i** Viertel-Wellenlängen-Platte  
**k** Polarisationsfilter

#### Mechanischer und optischer Aufbau:

- Gewindestange in den Reiterfuß mit Gewinde schrauben.
- U-Kern frei drehbar über die Gewindestange auf den Reiterfuß stellen und Spulen aufsetzen.
- Polschuhe und Halteplatte der Cadmium-Lampe mit Hilfe der Klammern so montieren, dass zwischen den Polschuhen ein Abstand von ca. 10 mm bleibt und die Öffnung der Halteplatte nach hinten zeigt; die Schrauben der Klammern noch nicht festziehen.
- Cadmiumlampe vorsichtig zwischen die Polschuhe schieben.

Die Cadmiumlampe soll sich genau in der Mitte der Polschuhe befinden, die Abschmelzstelle des Lampenkolbens nach hinten zeigen und die Zuleitungen möglichst weit aus dem Strahlengang gedreht sein.

- Polschuhe ggf. vorsichtig etwas näher zusammen schieben, um später mit größerem Magnetfeld zu arbeiten.
- Polschuhe und Halteplatte mit Hilfe der Schrauben der Klammern fixieren.
- Optische Komponenten gemäß Fig. 5 montieren.

#### Elektrischer Anschluss:

- Cadmiumlampe an Universaldrossel anschließen; nach dem Einschalten 5 min bis zur hinreichend starken Lichtemission warten.
- Spulen des Elektromagneten in Reihe beschalten und an das Hochstrom-Netzgerät anschließen.

#### Justierung der Beobachtungsoptik:

*Hinweis: Der Aufbau ist optimal justiert, wenn das rote Interferenzringmuster hell und kontrastreich ist und das Zentrum des Ringsystems auf der Strichskala liegt: Polarisationsfilter und Viertel-Wellenlängen-Platte zur Justierung noch nicht einsetzen, damit das beobachtete Bild möglichst hell ist.*

- Okular scharf auf die Strichskala einstellen.
- Abbildungslinse verschieben, bis ein scharfes Bild des Ringsystems zu beobachten ist.
- Kondensorlinse verschieben, bis das beobachtete Bild möglichst gleichmäßig ausgeleuchtet ist.
- Durch leichtes Kippen des Fabry-Perot-Etalons mit den Stellschrauben das Zentrum des Ringsystems auf die Mitte der Strichskala verschieben.

Falls der Stellbereich nicht ausreicht:

- Fabry-Perot-Etalon mit der gesamten Fassung drehen bzw. die Höhe von Abbildungslinse und Okular einander anpassen.

**Durchführung****a) Beobachtung in transversaler Konfiguration:**

- Zunächst das Interferenzringmuster ohne Magnetfeld ( $I = 0$  A) beobachten.
- Magnetstrom langsam auf etwa  $I = 3$  A erhöhen, bis die aufgespalteten Ringe deutlich voneinander getrennt sind.

Zur Unterscheidung zwischen  $\pi$ - und  $\sigma$ -Komponenten:

- Polarisationsfilter in den Strahlengang stellen (siehe Fig. 6) und auf  $90^\circ$  drehen, bis die beiden äußeren Komponenten der Tripletstruktur verschwinden.
- Polarisationsfilter auf  $0^\circ$  drehen, bis die mittlere (unverschobene) Komponente verschwindet.

**b) Beobachtung in longitudinaler Konfiguration:**

- Kompletten Aufbau der Cadmiumlampe mit Polschuhen auf dem Reiterfuß mit Gewinde um  $90^\circ$  drehen.
- Zunächst das Interferenzringmuster ohne Magnetfeld ( $I = 0$  A) beobachten.
- Magnetstrom langsam auf etwa  $I = 3$  A erhöhen, bis die aufgespalteten Ringe deutlich voneinander getrennt sind.

Zur Unterscheidung zwischen  $\sigma^+$ - und  $\sigma^-$ -Komponente:

- Zusätzlich eine Viertel-Wellenlängen-Platte zwischen Cadmiumlampe und Polarisationsfilter in den Strahlengang stellen (siehe Fig. 6) und auf  $0^\circ$  drehen.
- Polarisationsfilter auf  $+45^\circ$  und  $-45^\circ$  drehen, bis jeweils eine der beiden Dublett Komponenten verschwindet.

**Messbeispiel und Auswertung**

**a) Beobachtung in transversaler Konfiguration:** s. Fig. 7.

**b) Beobachtung in longitudinaler Konfiguration:** s. Fig. 8.

**Zusatzinformation**

Die summierte Intensität aller Zeeman-Komponenten ist in alle Raumrichtungen gleich. Bei transversaler Beobachtung entspricht im übrigen die Intensität der  $\pi$ -Komponente der gesamten Intensität der  $\sigma$ -Komponenten.

Fig. 7 (oben) Interferenzmuster beim Zeeman-Effekt in transversaler Konfiguration  
a) ohne Polarisationsfilter  
b) Polarisationsrichtung senkrecht zum Magnetfeld  
c) Polarisationsrichtung parallel zum Magnetfeld

Fig. 8 (unten) Interferenzmuster beim Zeeman-Effekt in longitudinaler Konfiguration  
a) ohne Viertel-Wellenlängen-Platte und Polarisationsfilter  
b), c) mit Viertel-Wellenlängen-Platte und Polarisationsfilter zum Nachweis zirkularer Polarisation

