

Normaler Zeeman-Effekt

UNTERSUCHUNG DES NORMALEN ZEEMAN-EFFEKTS IN LONGITUDINALER UND TRANSVERSALER KONFIGURATION

- Beobachtung der Dublett- und Triplet-Aufspaltung der roten Cadmium-Linie im äußeren Magnetfeld
- Untersuchung der Polarisation der Dublett- und Triplet-Komponenten

UE5020850

09/24 TL/UD

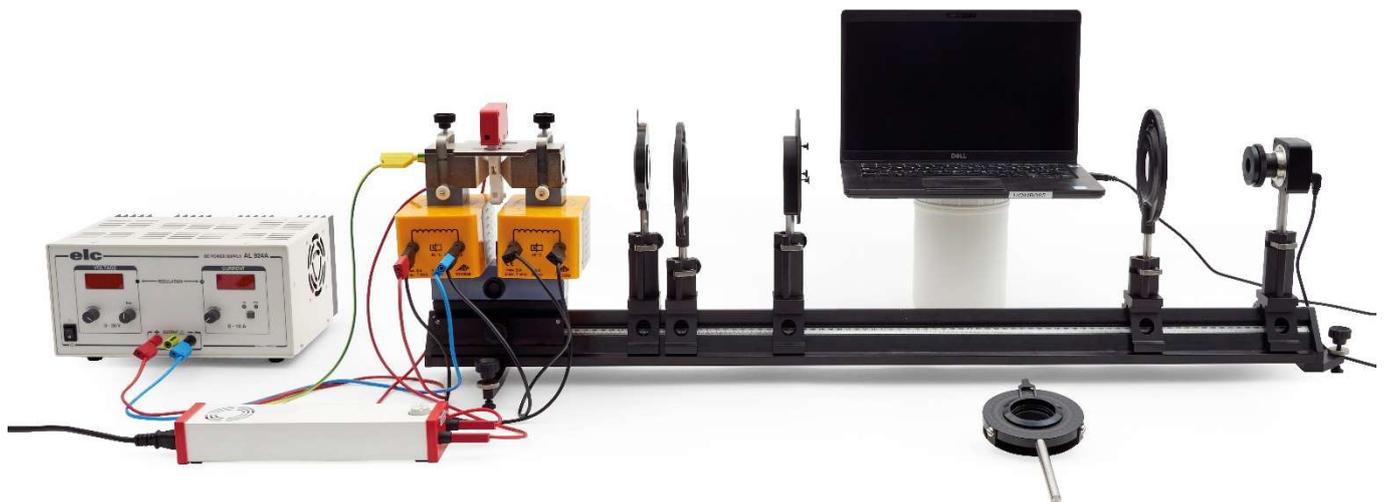


Fig. 1: Experimenteller Aufbau für den normalen Zeeman-Effekt in longitudinaler Konfiguration

ALLGEMEINE GRUNDLAGEN

Der Zeeman-Effekt bezeichnet die Aufspaltung von atomaren Energieniveaus bzw. Spektrallinien unter Einwirkung eines äußeren Magnetfeldes. Er wurde 1896 von seinem Namensgeber Pieter Zeeman als Verbreiterung der Natrium D-Linien entdeckt und von Hendrik Antoon Lorentz klassisch mit Hilfe der Lorentzkraft erklärt, die das Magnetfeld auf die Elektronen in der Atomhülle ausübt. Bei diesem so genannten normalen Zeeman-Effekt, wie er z.B. für die rote Cadmium-Linie ($\lambda = 643,8 \text{ nm}$) vorliegt, wird parallel zum Magnetfeld (longitudinal) eine zweifache Aufspaltung in ein Liniendublett und senkrecht zum Magnetfeld (transversal) eine dreifache Aufspaltung in ein Linientriplett beobachtet. Als anomaler Zeeman-Effekt werden komplexere Aufspaltungen bezeichnet, die erst mit Hilfe der von Goudsmit und Uhlenbeck 1925 postulierten Existenz des Elektronenspins erklärt werden konnten. Quantenmechanisch beruht der anomale Zeeman-Effekt auf der Wechselwirkung des Magnetfelds mit dem von Bahndrehimpuls und Spin der Elektronen erzeugten magnetischen

Moment der Elektronenhülle. In dieser Hinsicht stellt der anomale Zeeman-Effekt den Normalfall dar, der normale Zeeman-Effekt einen Spezialfall.

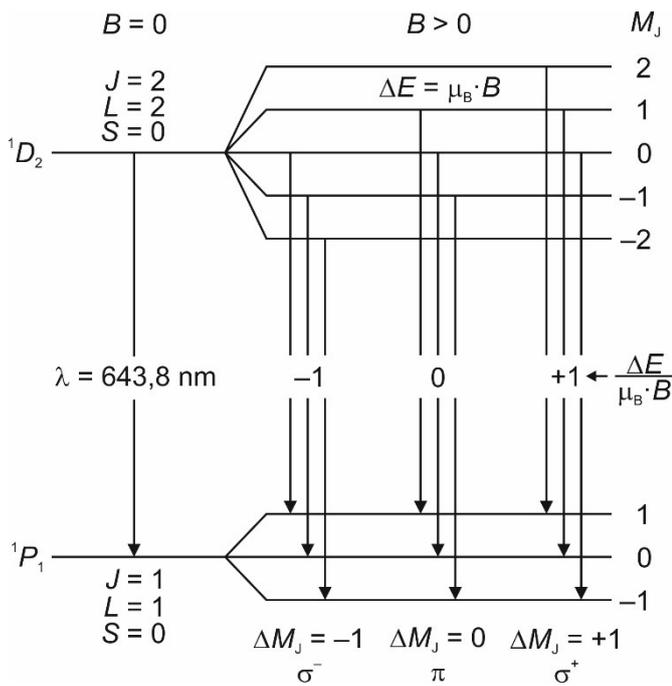


Fig. 2: Normaler Zeeman-Effekt an der roten Cadmium-Spektallinie. Aufspaltung der Energieniveaus und nach den Auswahlregeln für elektrische Dipolstrahlung erlaubte Übergänge

Der normale Zeeman-Effekt tritt nur für Übergänge zwischen atomaren Zuständen auf, deren Gesamtspin sich zu $S = 0$ addiert. Die rote Cd-Linie entspricht dem Übergang $^1D_2 \rightarrow ^1P_1$ mit der Wellenlänge $\lambda = 643,8 \text{ nm}$ (Fig. 2). Da beide Niveaus einen Gesamtspin mit der Quantenzahl $S = 0$ besitzen, kann der normale Zeeman-Effekt hier beobachtet werden. Der Gesamtdrehimpuls $J = L + S$ entspricht dann dem gesamten Bahndrehimpuls, d.h. $J = L$. Er erzeugt ein magnetisches Moment

$$(1) \mu = \frac{\mu_B}{\hbar} \cdot J$$

mit dem Bohrschen Magneton

$$(2) \mu_B = \frac{e}{2 \cdot m_e} \cdot \hbar = 9,274 \cdot 10^{-24} \frac{\text{J}}{\text{T}}$$

e : Elementarladung

m_e : Masse des Elektrons

$\hbar = h/2\pi$: reduzierte Planck-Konstante

In einem äußeren Magnetfeld

$$(3) \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ B \end{pmatrix}$$

ist mit dem magnetischen Moment die Energie

$$(4) E = \mu \cdot \mathbf{B} = \mu_z \cdot B$$

verbunden. Aufgrund der Richtungsquantelung kann die Komponente J_z des Gesamtdrehimpulses parallel zum Magnetfeld nur die Werte

$$(5) J_z = M_J \cdot \hbar \text{ mit } M_J = -J, -(J-1), \dots, (J-1), J$$

J : Gesamtdrehimpuls-Quantenzahl

annehmen. Das Energieniveau zur Gesamtdrehimpulsquantenzahl J spaltet also in $2J+1$ äquidistante Komponenten auf, die sich in der magnetischen Quantenzahl M_J unterscheiden (Fig. 2). Mit Gl. (1) folgt

$$(6) \mu_z = \frac{\mu_B}{\hbar} \cdot J_z,$$

damit nach Gl. (4)

$$(7) E = \mu_z \cdot B = \frac{\mu_B}{\hbar} \cdot J_z \cdot B$$

und schließlich mit Gl. (5):

$$(8) E = \mu_B \cdot M_J \cdot B.$$

Der Energieabstand zweier Niveaus mit Energien E_1 und E_2 ($E_1 > E_2$) ergibt sich also zu:

$$(9) \Delta E = E_1 - E_2 = (M_{J,1} - M_{J,2}) \cdot \mu_B \cdot B = \Delta M_J \cdot \mu_B \cdot B.$$

Nach Gl. (5) wird das Niveau 1D_2 in fünf und das Niveau 1P_1 in drei Komponenten aufgespalten, jeweils mit dem durch Gl. (9) gegebenen äquidistanten Energieabstand.

Nach den Auswahlregeln für elektrische Dipolstrahlung sind zwischen diesen Niveaus Übergänge erlaubt mit

$$(10) \Delta M_J = \begin{cases} +1 & (\text{rechts zirkular polarisiertes Licht, } \sigma^+) \\ 0 & (\text{linear polarisiertes Licht, } \pi) \\ -1 & (\text{links zirkular polarisiertes Licht, } \sigma^-) \end{cases}$$

wobei das emittierte Licht wie oben angegeben polarisiert ist. Da von den neun theoretisch möglichen Übergängen jeweils drei energetisch zusammenfallen, können insgesamt also drei Spektrallinien beobachtet werden (Fig. 2), eine unverschobene π -Komponente und gemäß $E = \hbar \cdot \omega$ zwei um

$$(11) \Delta \lambda = -\frac{\lambda^2}{2 \cdot \pi \cdot \hbar \cdot c} \cdot \Delta E$$

c : Vakuum-Lichtgeschwindigkeit

verschobene σ -Komponenten mit einer entsprechend höheren bzw. niedrigeren Wellenlänge. Aus Gleichung (11) ergibt sich durch Einsetzen der Gleichungen (9) und (2) für die im Experiment eingestellte Flussdichte $B = 334 \text{ mT}$ eine Verschiebung um $|\Delta \lambda| = 0,0065 \text{ nm}$.

Die räumliche Verteilung des emittierten Lichts ist für die π - und die beiden σ -Komponenten unterschiedlich. Der Fall $\Delta M_J = 0$ entspricht klassisch einem parallel zum Magnetfeld schwingenden Hertz'schen Dipol. Dementsprechend wird senkrecht zum Magnetfeld (transversal) linear polarisiertes Licht abgestrahlt, parallel zum Magnetfeld (longitudinal) kein Licht (Fig. 3). Die Fälle $\Delta M_J = \pm 1$ entsprechen jeweils zwei zueinander mit einer Phasendifferenz von 90° senkrecht schwingenden Dipolen. Dementsprechend wird sowohl parallel als auch senkrecht zum Magnetfeld Licht abgestrahlt, das parallel zum Magnetfeld zirkular polarisiert ist, und zwar links zirkular polarisiert für $\Delta M_J = -1$ und rechts zirkular polarisiert für $\Delta M_J = +1$.

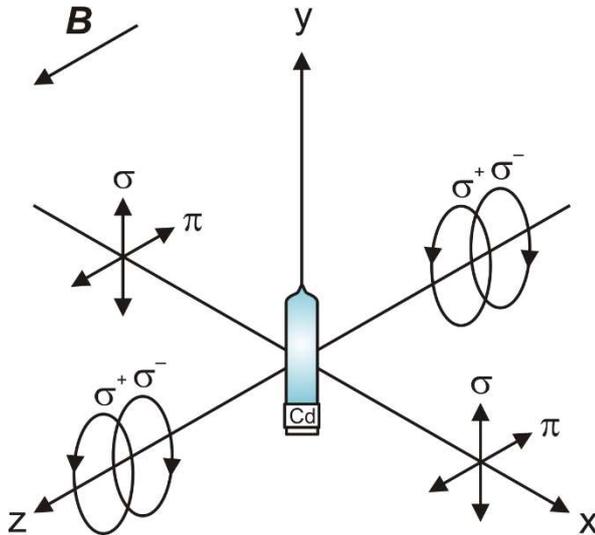


Fig. 3: Polarisation der elektrischen Dipolstrahlung in Abhängigkeit von der Ausbreitungsrichtung

Für die Analyse der Lichtpolarisation wird bei Beobachtung in longitudinaler Richtung also ein Viertelwellenlängenfilter mit nachgeschaltetem Polarisationsfilter benötigt, da die Beobachtung senkrecht zur Polarisationsebene der σ -Komponenten erfolgt (Fig. 3). Der Viertelwellenlängenfilter wandelt das zirkular polarisierte Licht in linear polarisiertes um, das dann mit Hilfe des Polarisationsfilters analysiert werden kann. Bei Einstellung des Viertelwellenlängenfilters auf -45° wird entsprechend die σ^+ -Komponente umgewandelt und kann beobachtet werden, während die σ^- -Komponente verschwindet. Bei Einstellung des Viertelwellenlängenfilters auf $+45^\circ$ verhält es sich genau umgekehrt. Für die Beobachtung in transversaler Richtung wird nur ein Polarisationsfilter benötigt, da die Beobachtung parallel zur Polarisationsebene der σ -Komponenten erfolgt und diese linear polarisiert erscheinen (Fig. 3). Die π -Komponente ist stets linear polarisiert. Bei Einstellung des Polarisationsfilters auf 0° können entsprechend die σ -Komponenten beobachtet werden, während die π -Komponente verschwindet. Bei Einstellung des Polarisationsfilters auf 90° verhält es sich genau umgekehrt.

Im Experiment erfolgt die Beobachtung der Aufspaltung mit Hilfe einer Digitalkamera, der ein Fabry-Pérot-Etalon und eine Abbildungsoptik vorgeschaltet sind. Das Fabry-Pérot-Etalon ist so ausgelegt, dass es die Resonanzbedingung für die spezifische Wellenlänge 643,8 nm der roten Cd-Linie erfüllt. Beim Durchgang des Lichts der Cadmium-Lampe durch das Fabry-Pérot-Etalon entstehen Interferenzringe, die wie die Spektrallinie in Abhängigkeit des äußeren Magnetfeldes aufspalten und durch die Optik auf den Kamerasensor abgebildet werden. Die Beobachtung parallel oder senkrecht zum äußeren Magnetfeld wird durch einen drehbar gelagerten Elektromagneten ermöglicht. Die Aufspaltung wird qualitativ beobachtet und die Polarisation der Dublett- und Triplett-Komponenten mit Hilfe eines Viertelwellenlängenfilters mit Polarisationsaufsatz und eines Polarisationsfilters untersucht.

Die Spektroskopie mit einem Fabry-Pérot-Etalon ist Gegenstand des Experiments UE5020900, in dem die Interferenzringe in Abhängigkeit des äußeren Magnetfeldes ausgemessen werden und das Bohrsche Magneton bestimmt wird.

GERÄTELISTE

1 Cd-Lampe mit Zubehör @230 V oder	1021366
1 Cd-Lampe mit Zubehör @115 V	1021747
1 Fabry-Pérot-Etalon 644 nm	1020903
1 DC-Netzgerät, längsgeregelt, 1 – 30V, 0 – 10A @230V	1025380
oder	
1 DC-Netzgerät 20 V, 5 A @115 V	1003311
1 U-Kern D	1022663
2 Spulen D 900 Windungen	1012859
1 Elektromagnet-Zubehör für Zeeman-Effekt	1021365
1 Mikroskopkamera Bresser MikroCam SP 3.1	1024060
1 Linse 12 mm für die Bresser Mikroskopiekamera	1024059
1 Stativstange mit ¼ Zoll Gewinde, 100 mm	1025431
1 Roter Farbfilter in Fassung	1025376
2 Sammellinsen auf Stiel, f = 100 mm	1003023
1 Viertelwellenlängenfilter auf Stiel	1021353
1 Polarisationsaufsatz	1021364
1 Polarisationsfilter auf Stiel	1008668
1 Optische Bank D, 100 cm	1002628
1 Satz Füße für Optische Bank D	1012399
1 Optikfuß D	1009733
3 Optikreiter D 90/36	1012401
2 Optikreiter D 60/36	1002639
1 Paar Sicherheitsexperimentierkabel, 75 cm, rot, blau	1017718
1 Paar Sicherheitsexperimentierkabel, 75 cm, schwarz	1002849

SICHERHEITSHINWEISE

- Vor dem Aufbau des Experiments die Bedienungsanleitungen der Geräte und insbesondere die darin formulierten Sicherheitshinweise lesen und beachten.
- Die Cd-Lampe vor mechanischen Stößen schützen. Den Glaskolben der Cd-Lampe nicht mit bloßen Händen berühren.
- Die Cd-Lampe nur mit dem mitgelieferten Vorschaltgerät betreiben. Vor Inbetriebnahme der auf dem Elektromagnet montierten Cd-Lampe unbedingt die Schutzerdung herstellen. Dazu die PE-Buchsen an Vorschaltgerät und Polschuh des Elektromagnet-Zubehörs für Zeeman-Effekt (1021365) mit Hilfe des mitgelieferten gelb-grünen Sicherheitsexperimentierkabels (Schutzleiter) miteinander verbinden.
- Vor Inbetriebnahme des Elektromagneten die korrekte Lage der Polschuhe sicherstellen, wie in der Bedienungsanleitung zum Elektromagnet-Zubehör für Zeeman-Effekt (1021365) beschrieben.

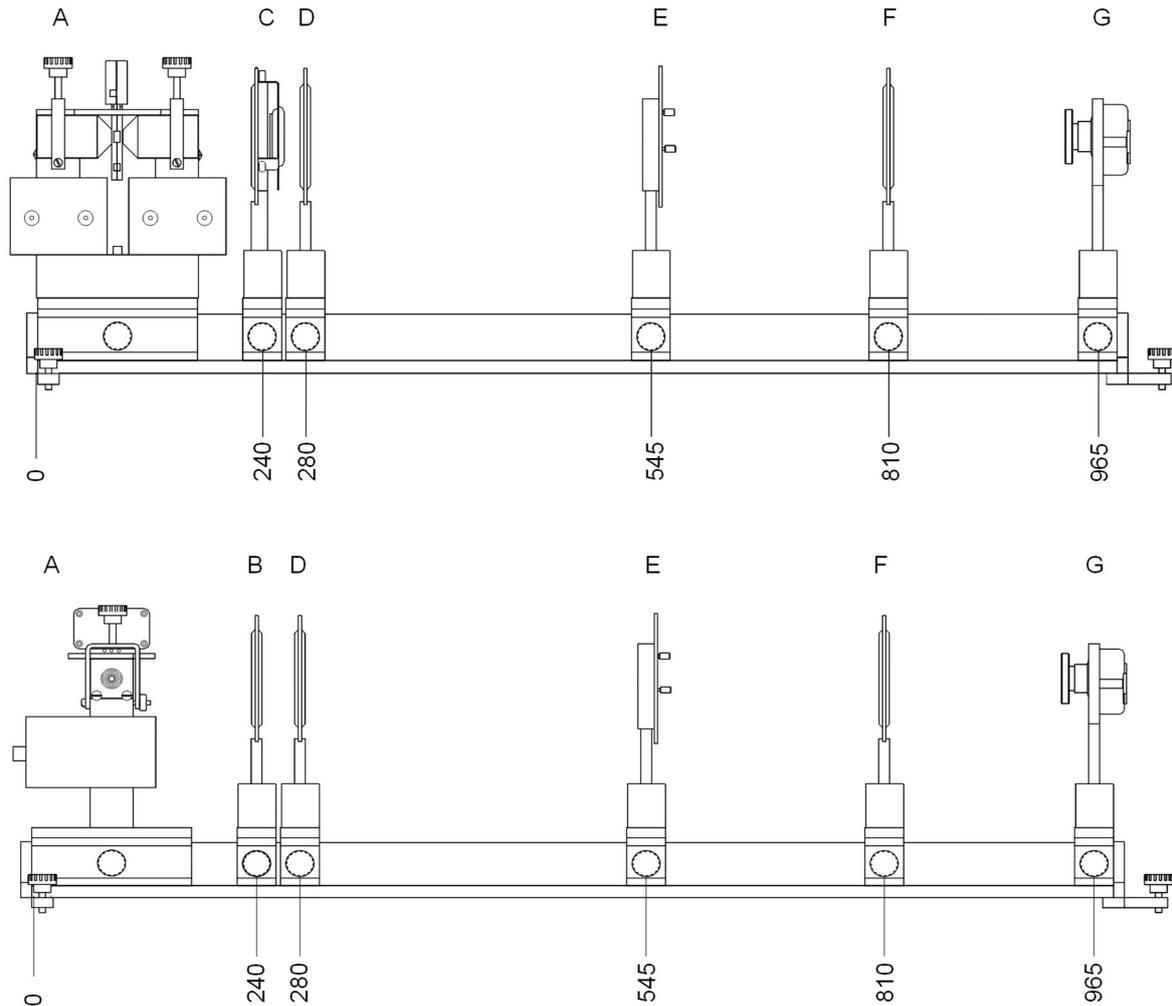


Fig. 4: Experimenteller Aufbau für den normalen Zeeman-Effekt in longitudinaler (oben) und transversaler (unten) Konfiguration. A: Elektromagnet mit Cd-Lampe, B: Polarisationsfilter, C: Viertelwellenlängenfilter mit Polarisationsaufsatz, D: Sammellinse $f = 100\text{ mm}$ (Kondensorlinse), E: Fabry-Pérot-Etalon, F: Sammellinse $f = 100\text{ mm}$ (Abbildungslinse), G: Kamera mit 12-mm-Linse. Genaue Positionierung der Komponenten siehe Text.

Die maximale Stromstärke durch die Spulen D mit 900 Windungen beträgt 5 A (7 Minuten). Sie kann kurzfristig (30 Sekunden) auf das Doppelte angehoben werden. Die Spulen verfügen über eine interne reversible Temperatursicherung, die bei einer Wicklungstemperatur von 85 °C auslöst. Die Rückstellzeit beträgt 10-20 Minuten, je nach Umgebungstemperatur.

- Die Messung entsprechend zügig durchführen, so dass ein Auslösen der Temperatursicherung durch zu langes Fließen hoher Ströme vermieden wird.
- Die Spulen nicht ohne Trafokern betreiben.

ALLGEMEINE HINWEISE

Es empfiehlt sich, das Experiment in einem dunklen Raum durchzuführen, um Streulicht aus der Umgebung zu minimieren sowie optimale Belichtung und optimalen Kontrast des Livebildes der Kamera zu erzielen.

Die Software der Kamera ist auf dem Mess-Computer zu installieren.

AUFBAU

Montage des Elektromagneten und der Cd-Lampe

- Den Satz Füße für optische Bank (1012399) montieren, den langen Fuß auf der linken Seite der optischen Bank, den kurzen auf der rechten (Skala vorne). Die optische Bank an einem ebenen Experimentierplatz aufstellen.
- Den Optikfuß (1009733) so auf der optischen Bank positionieren und fixieren, dass er linksbündig mit der Stirnplatte abschließt (Fig. 4).
- Den Elektromagneten in longitudinaler Konfiguration (Fig. 4 oben) auf dem Optikfuß zusammenbauen wie in der Bedienungsanleitung zum Elektromagnet-Zubehör für Zeeman-Effekt (1021365) beschrieben.
- Die Cadmium-Lampe wie in der Bedienungsanleitung zur Cd-Lampe mit Zubehör (1021366 / 1021747) beschrieben auf den Elektromagneten montieren.

- Die PE-Buchsen am Vorschaltgerät der Cd-Lampe und am Polschuh des Elektromagneten mit Hilfe des mitgelieferten gelb-grünen Sicherheitsexperimentierkabels (Schutzleiter) miteinander verbinden.
- Die Cd-Lampe mit Hilfe der 4-mm-Sicherheitsexperimentierkabel an das Vorschaltgerät anschließen. Das Vorschaltgerät mit Hilfe des Netzkabels an das Stromnetz anschließen. Das Vorschaltgerät noch nicht einschalten.
- Den Abgriff "0" der linken Spule mit dem Abgriff "900" der rechten Spule und den Abgriff "0" der rechten Spule mit dem Abgriff "900" der linken Spule verbinden. Anschließend den Abgriff "0" der linken Spule mit dem Ausgang "-" des DC-Netzgerätes und den Abgriff „900“ der linken Spule mit dem Ausgang „+“ des DC-Netzgerätes verbinden (Fig. 1). Das DC-Netzgerät mit Hilfe des Netzkabels an das Stromnetz anschließen. Das DC-Netzgerät noch nicht einschalten.

Montage der Kamera und der Optiken

- Die Stativstange (1025431) in das 1/4"-Stativgewinde auf der Unterseite der Kamera schrauben.
- Die 12-mm-Linse (1024059) in das C-Mount-Gewinde an der Vorderseite der Kamera schrauben.
- Den roten Farbfilter (1025376) auf die 12-mm-Linse schrauben.
- Den Polarisationsaufsatz (1021364) wie in der Bedienungsanleitung beschrieben auf den Viertelwellenlängenfilter (1021353) montieren.

Der Polarisationsfilter auf Stiel (1008668), die beiden Sammellinsen auf Stiel, $f = 100$ mm (1003023) und das Fabry-Pérot-Etalon (1020903) bedürfen keiner weiteren Montage.

Inbetriebnahme des Experiments und Justage

- Das Vorschaltgerät der Cd-Lampe einschalten und ca. 5 Minuten warten.

Nach einer Aufwärmzeit von ca. 5 Minuten hat die Cd-Lampe 90% ihrer Lichtleistung erreicht.

- Einen langen Optikeiter (1012401) für die Kamera so auf der optischen Bank positionieren und fixieren, dass er rechtsbündig mit der Stirnplatte abschließt. Die Kamera bis zum Anschlag in den optischen Reiter einführen, anschließend um ca. 2 cm nach oben schieben und fixieren.
- Die 12-mm-Linse mittig stellen, so dass sie in beide Drehrichtungen ausreichend Spielraum hat.
- Einen kurzen Optikeiter (1002639) für die Abbildungslinse (Sammellinse $f = 100$ mm, 1003023) bei 810 mm positionieren und fixieren. Die Abbildungslinse bis zum Anschlag in den Optikeiter einführen und fixieren.
- Den Computer starten und die Kamera mit Hilfe des USB-Kabels an den Computer anschließen.
- Die Software starten. Die Kamera wird automatisch erfasst und erscheint in der Kamera-Liste. Die Kamera auswählen und anklicken.

Das Livebild wird im Fenster angezeigt und sieht nach der im Folgenden beschriebenen Optimierung aus wie in Fig. 5.

- Den Raum abdunkeln, falls das Livebild durch Streulicht beeinträchtigt wird.

Hinweis:

Die Bildschirmfotos in Fig. 5 – Fig. 7c sind bei vollständig abgedunkeltem Raum aufgenommen worden.

- Im Kamera-Fenster den Menüpunkt „Frequenz (Anti-flicker)“ öffnen (ggf. runterscrollen) und „Wechselstrom (50 Hz)“ bzw. „Wechselstrom (60 Hz)“ anklicken.

Diese Einstellung minimiert den Einfluss der Netzfrequenz auf das Livebild der Kamera.

- Die optimale Belichtungszeit manuell wählen. Nicht den Weißabgleich anwenden, weil sonst die Wirkung des Rotfilters kompensiert wird.
- Ggf. durch Drehen an der 12-mm-Linse die Schärfe optimieren.
- Ggf. die Kamera im Optikeiter etwas nach oben oder unten schieben, so dass das Bild zentriert ist.

Hinweis:

Bedingt durch die optische Abbildung entsteht ein reelles, kopfstehendes Bild. Wird die Kamera im Optikeiter nach oben geschoben, bewegt sich das Bild nach unten und umgekehrt.

- Einen kurzen Optikeiter (1002639) für die Kondensorlinse (Sammellinse $f = 100$ mm, 1003023) bei 280 mm auf der optischen Bank positionieren und fixieren. Die Kondensorlinse bis zum Anschlag in den Optikeiter einführen und fixieren. Ggf. die Abbildungslinse so verschieben, dass der Lichtfleck bildfüllend erscheint und die Belichtungszeit anpassen (Livebild wie in Fig. 6).
- Einen langen Optikeiter (1012401) für das Fabry-Pérot-Etalon (1020903) bei 545 mm auf der optischen Bank positionieren und fixieren. Das Fabry-Pérot-Etalon bis zum Anschlag in den Optikeiter einführen und fixieren.

Hinweis:

Die Interferenzringe erscheinen ggf. unscharf und zu hell. Zur Optimierung von Schärfe und Belichtung sind Kameraposition, Fokussierung und Belichtungszeit anzupassen.

- Die Kamera nach 965 mm verschieben, ggf. im Optikeiter etwas nach oben oder unten schieben, so dass das Bild wieder zentriert ist, durch Drehen an der 12-mm-Linse die Schärfe optimieren und die Belichtungszeit anpassen (Livebild wie in Fig. 7).
- Den Viertelwellenlängenfilter mit Polarisationsaufsatz bzw. den Polarisationsfilter noch nicht in den Strahlengang stellen.

Der Aufbau ist jetzt für die Durchführung des Experiments fertig konfiguriert.

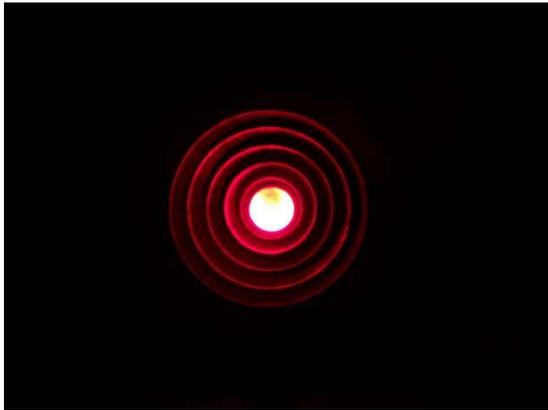


Fig. 5: Livebild mit Kamera und Abbildungslinse. Stufenbohrung des Polschuhs und Lichtfleck der Cd-Lampe erscheinen konzentrisch und zentriert

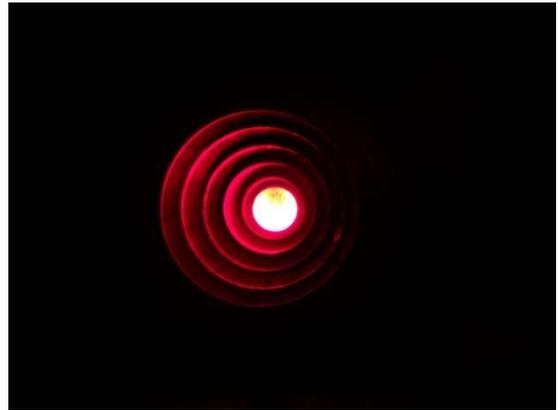


Fig. 5a: Elektromagnet verdreht. Die Stufenbohrung erscheint nicht konzentrisch. Korrektur: Elektromagnet so drehen, dass er mittig ausgerichtet ist

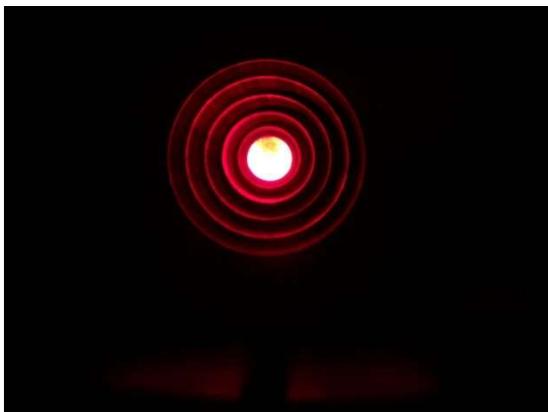


Fig. 5b: Kamera im Optikreiter zu niedrig. Korrektur: Kamera im Optikreiter nach oben schieben, so dass sie mittig ausgerichtet ist

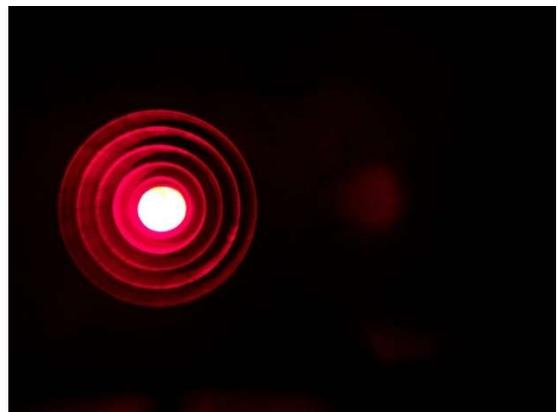


Fig. 5c: Kamera im Optikreiter verdreht. Korrektur: Kamera im Optikreiter so drehen, dass sie mittig ausgerichtet ist



Fig. 5d: Abbildungslinse im Optikreiter verdreht. Korrektur: Abbildungslinse im Optikreiter so drehen, dass sie senkrecht zur optischen Achse ausgerichtet ist



Fig. 6: Livebild mit Kondensatorlinse

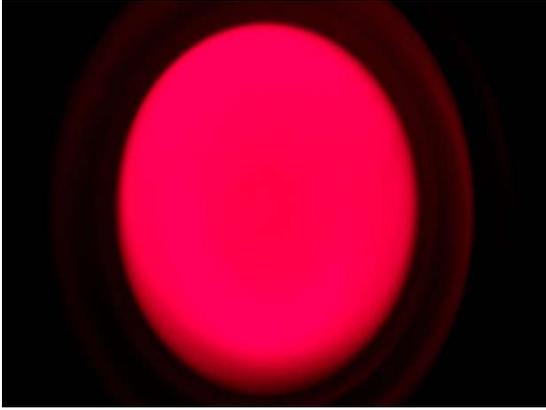


Fig. 6a: Kondensorlinse im Optikreiter verdreht. Korrektur: Kondensorlinse im Optikreiter so drehen, dass sie senkrecht zur optischen Achse ausgerichtet ist

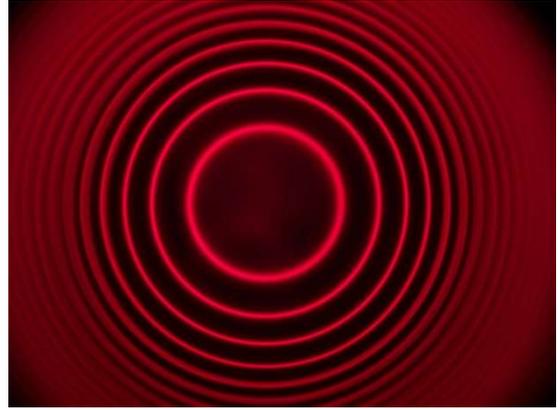


Fig. 7: Livebild mit Fabry-Pérot-Etalon

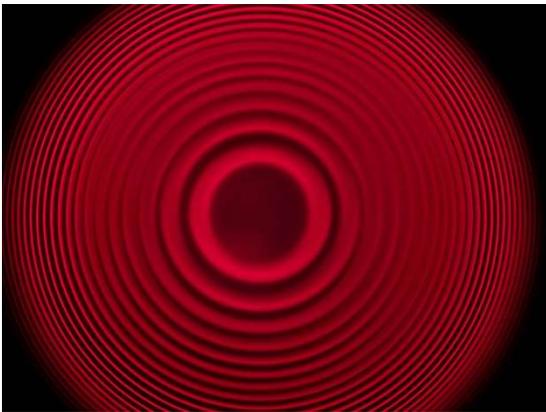


Fig. 7a: Schlechte Fokussierung. Korrektur: An der 12-mm-Linse drehen, so dass die Interferenzringe scharf zu sehen sind



Fig. 7b: Etalon im Optikreiter verdreht. Korrektur: Etalon so im Optikreiter drehen, dass es senkrecht zur optischen Achse ausgerichtet ist



Fig. 7c: Etalon verkippt. Korrektur: Justage mit Hilfe der drei Stellschrauben am Gehäuse.

DURCHFÜHRUNG, MESSBEISPIEL UND AUSWERTUNG

Beobachtung in longitudinaler Richtung

Die folgenden Schritte ausführen, beobachten, wie sich die Interferenzringe ändern und Bildschirmfotos anfertigen (Fig. 8).

- Kein äußeres Magnetfeld anlegen.

Es werden nur die vom Fabry-Pérot-Etalon erzeugten Interferenzringe beobachtet, die jeweils der roten Cd-Spektrallinie entsprechen (Fig. 8a).

- Äußeres Magnetfeld anlegen. Dazu DC-Netzgerät einschalten und den Strom durch die Spulen auf 3,5 A ($B = 334$ mT) hochregeln.

Hinweis:

Bei angelegtem Magnetfeld sollte die Belichtungszeit ≥ 20 ms sein, da es sonst aufgrund einer Beeinträchtigung des „Rolling-Shutter-Sensors“ der Kamera zu „flimmernden Linien“ kommen kann.

Es wird die Aufspaltung in das Liniendublett mit den beiden verschobenen Komponenten σ^- und σ^+ beobachtet, die unverschobene π – Komponente wird nicht beobachtet (Fig. 8b).

- Bei angelegtem Magnetfeld den Viertelwellenlängenfilter mit Polarisationsaufsatz mit Hilfe eines langen Optikreiters (1012401) zwischen dem Elektromagneten und der Sammellinse positionieren (Fig. 4 C).

Hinweis:

Der Viertelwellenlängenfilter muss sich auf der Seite der Cd-Lampe befinden.

- Bei angelegtem Magnetfeld den Viertelwellenlängenfilter mit Polarisationsaufsatz auf -45° einstellen.

Die σ^- – Komponente verschwindet (Fig. 8c).

- Bei angelegtem Magnetfeld den Viertelwellenlängenfilter mit Polarisationsaufsatz auf $+45^\circ$ einstellen.

Die σ^+ – Komponente verschwindet (Fig. 8d).

- Den Viertelwellenlängenfilter mit Polarisationsaufsatz aus dem Strahlengang herausnehmen.
- Strom herunterregeln und DC-Netzgerät ausschalten.

Beobachtung in transversaler Richtung

- Den Elektromagneten so drehen, dass die Polschuhe senkrecht zur Richtung der optischen Achse orientiert sind (Fig. 4).
- Kein äußeres Magnetfeld anlegen.

Es werden nur die vom Fabry-Pérot-Etalon erzeugten Interferenzringe beobachtet, die jeweils der roten Cd-Spektrallinie entsprechen (Fig. 8e).

- Äußeres Magnetfeld anlegen. Dazu DC-Netzgerät einschalten und den Strom durch die Spulen auf 3,5 A ($B = 334$ mT) hochregeln.

Es wird die Aufspaltung in das Linientriplett mit der unverschobenen π – Komponente und den beiden verschobenen Komponenten σ^- und σ^+ beobachtet (Fig. 8f).

- Bei angelegtem Magnetfeld den Polarisationsfilter zwischen dem Elektromagneten und der Sammellinse positionieren (Fig. 4 B) und auf 0° , d.h. senkrecht zum Magnetfeld einstellen.

Die π – Komponente verschwindet (Fig. 8g).

- Bei angelegtem Magnetfeld den Polarisationsfilter auf 90° , d.h. parallel zum Magnetfeld einstellen.

Die beiden σ – Komponenten verschwinden (Fig. 8h).

- Den Polarisationsfilter aus dem Strahlengang herausnehmen.
- Strom herunterregeln und DC-Netzgerät ausschalten.

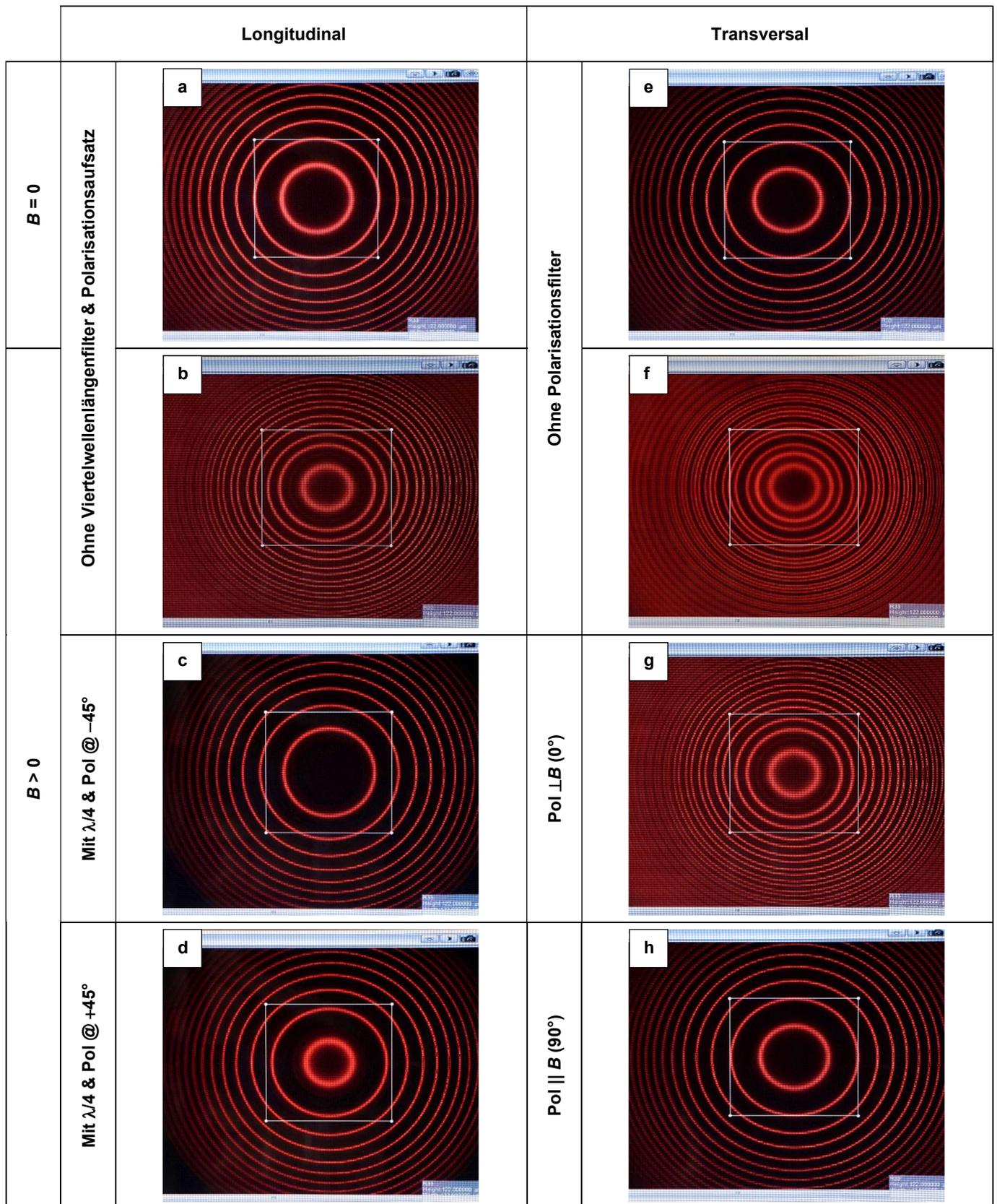


Fig. 8: Beobachtung der Dublett- und Triplet-Aufspaltung der roten Cadmium-Linie im äußeren Magnetfeld und Untersuchung der Polarisation. Zur besseren Orientierung ist der zweite vom Zentrum aus gezählte Interferenzring mit einem Rahmen markiert

Normal Zeeman Effect

INVESTIGATION OF THE NORMAL ZEEMAN EFFECT IN LONGITUDINAL UND TRANSVERSAL CONFIGURATION

- Observation of doublet and triplet splitting of the red cadmium line in an external magnetic field.
- Investigation of the polarization of the doublet and triplet components.

UE5020850

09/24 TL/UD

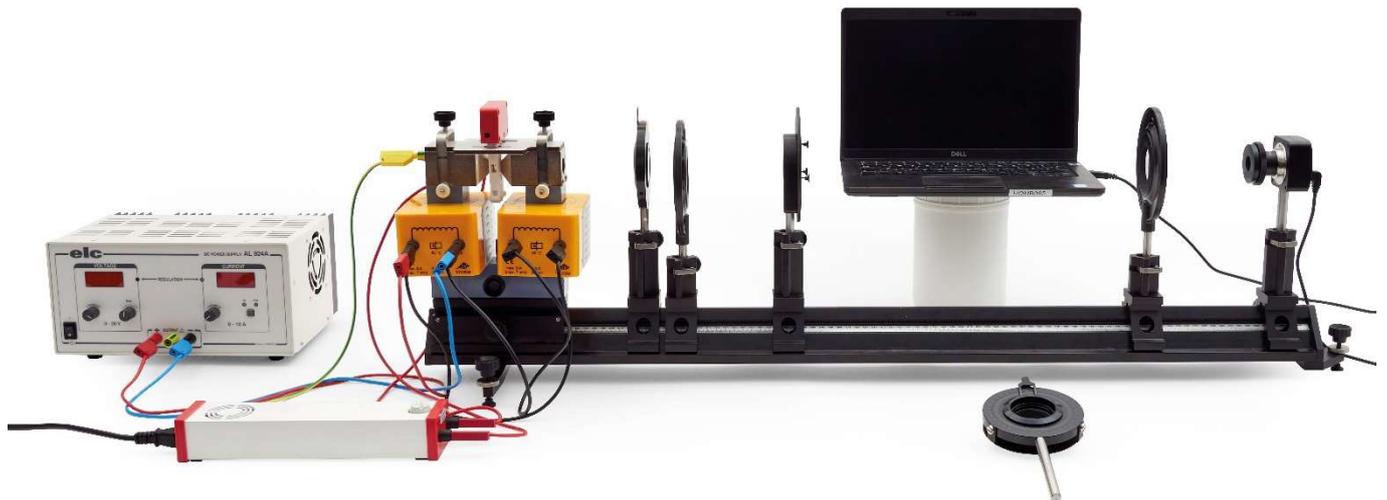


Fig. 1: Experimental setup for the normal Zeeman effect in longitudinal configuration

GENERAL PRINCIPLES

The Zeeman effect refers to the splitting of atomic energy levels or spectral lines under the influence of an external magnetic field. It was discovered in 1896 by its namesake Pieter Zeeman as a broadening of the sodium D lines and classically explained by Hendrik Antoon Lorentz with the help of the Lorentz force, which the magnetic field exerts on the electrons in the atomic shell. In this so-called normal Zeeman effect, as is the case for the red cadmium line ($\lambda = 643.8 \text{ nm}$), for example, a double splitting into a line doublet is observed parallel to the magnetic field (longitudinal) and a triple splitting into a line triplet is observed perpendicular to the magnetic field (transversal). More complex splittings are referred to as the anomalous Zeeman effect, which could only be explained with the help of the existence of the electron spin postulated by Goudsmit and Uhlenbeck in 1925. Quantum mechanically, the anomalous Zeeman effect is based on the interaction of the magnetic field with the magnetic moment of the electron shell generated by the orbital angular momentum and spin of

the electrons. In this respect, the anomalous Zeeman effect represents the normal case, the normal Zeeman effect a special case.

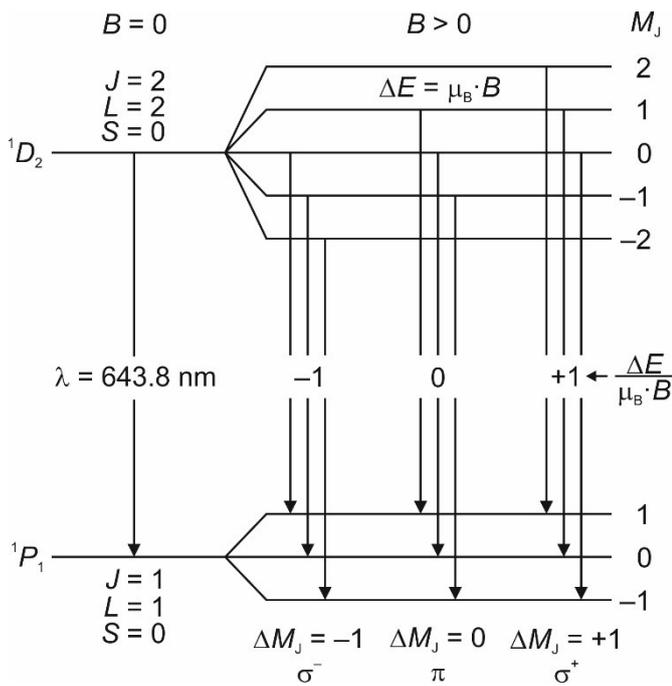


Fig. 2: Normal Zeeman effect at the red cadmium spectral line. Splitting of the energy levels and transitions permitted according to the selection rules for electric dipole radiation

The normal Zeeman effect only occurs for transitions between atomic states whose total spin adds up to $S = 0$. The red Cd line corresponds to the transition ${}^1D_2 \rightarrow {}^1P_1$ with the wavelength $\lambda = 643.8 \text{ nm}$ (Fig. 2). Since both levels have a total spin with the quantum number $S = 0$, the normal Zeeman effect can be observed here, and the total angular momentum $\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}$ corresponds to the total orbital angular momentum, i.e. $\mathbf{J} = \mathbf{L}$. It generates a magnetic moment

$$(1) \quad \boldsymbol{\mu} = \frac{\mu_B}{\hbar} \cdot \mathbf{J}$$

with the Bohr magneton

$$(2) \quad \mu_B = \frac{e}{2 \cdot m_e} \cdot \hbar = 9.274 \cdot 10^{-24} \frac{\text{J}}{\text{T}}$$

e : elementary charge

m_e : mass of the electron

$\hbar = h/2\pi$: reduced Planck constant

In an external magnetic field

$$(3) \quad \mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ B \end{pmatrix}$$

the energy

$$(4) \quad E = \boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B} = \mu_z \cdot B$$

is associated with the magnetic moment. Due to the directional quantization, the component J_z of the total angular momentum parallel to the magnetic field can only have the values

$$(5) \quad J_z = M_J \cdot \hbar \text{ mit } M_J = -J, -(J-1), \dots, (J-1), J.$$

J : Total angular momentum quantum number

The energy level with the total angular momentum quantum number J thus splits into $2J+1$ equidistant components, which differ in the magnetic quantum number M_J (Fig. 2). With Eq. (1) follows

$$(6) \quad \mu_z = \frac{\mu_B}{\hbar} \cdot J_z,$$

thus, according to Eq. (4)

$$(7) \quad E = \mu_z \cdot B = \frac{\mu_B}{\hbar} \cdot J_z \cdot B$$

and finally with Eq. (5):

$$(8) \quad E = \mu_B \cdot M_J \cdot B.$$

The energy distance between two levels with energies E_1 and E_2 ($E_1 > E_2$) is therefore calculated as follows:

$$(9) \quad \Delta E = E_1 - E_2 = (M_{J,1} - M_{J,2}) \cdot \mu_B \cdot B = \Delta M_J \cdot \mu_B \cdot B.$$

According to Eq. (5), level 1D_2 is split into five and level 1P_1 into three components, each with the equidistant energy difference given by Eq. (9).

According to the selection rules for electric dipole radiation, transitions between these levels are permitted with

$$(10) \quad \Delta M_J = \begin{cases} +1 & \text{(right circularly polarized light, } \sigma^+) \\ 0 & \text{(linearly polarized light, } \pi) \\ -1 & \text{(left circularly polarized light, } \sigma^-) \end{cases},$$

where the emitted light is polarized as indicated above. Since three of the nine theoretically possible transitions coincide in terms of energy, a total of three spectral lines can be observed (Fig. 2), one unshifted π component and, according to $E = \hbar \cdot \omega$ two around

$$(11) \quad \Delta\lambda = -\frac{\lambda^2}{2 \cdot \pi \cdot \hbar \cdot c} \cdot \Delta E$$

c : vacuum speed of light

shifted σ components with a correspondingly higher or lower wavelength. Eq. (11) results in a shift of $|\Delta\lambda| = 0.0065 \text{ nm}$ by inserting Eq. (9) and (2) for the flux density $B = 334 \text{ mT}$ set in the experiment.

The spatial distribution of the emitted light is different for the π and the two σ components. The case $\Delta M_J = 0$ classically corresponds to a Hertzian dipole oscillating parallel to the magnetic field. Accordingly, linearly polarized light is emitted perpendicular to the magnetic field (transversal) and no light is emitted parallel to the magnetic field (longitudinal) (Fig. 3). The cases $\Delta M_J = \pm 1$ correspond to two dipoles oscillating perpendicular to each other with a phase difference of 90° . Accordingly, light that is circularly polarized parallel to the magnetic field is emitted both parallel and perpendicular to the magnetic field, namely left circularly polarized for $\Delta M_J = -1$ and right circularly polarized for $\Delta M_J = +1$.

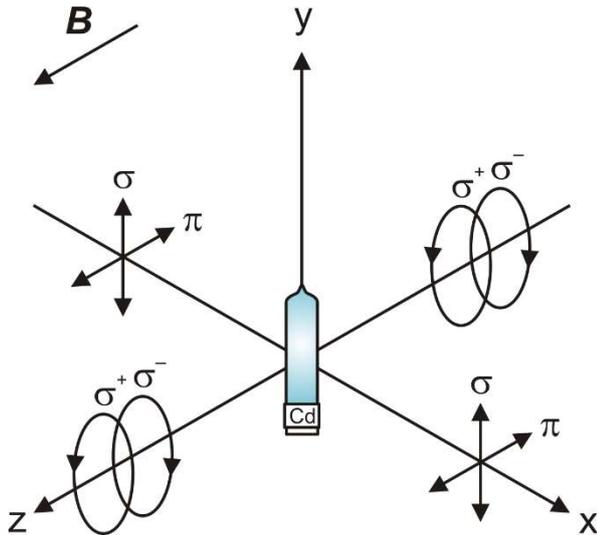


Fig. 3: Polarization of electric dipole radiation depending on the direction of propagation

A quarter-wavelength filter with a downstream polarization filter is therefore required to analyze the polarization of light when observing in the longitudinal direction, as the observation is made perpendicular to the polarization plane of the σ components (Fig. 3). The quarter-wavelength filter converts the circularly polarized light into linearly polarized light, which can then be analyzed using the polarization filter. When the quarter-wavelength filter is set to -45° , the σ^+ component is converted accordingly and can be observed, while the σ^- component disappears. When the quarter-wavelength filter is set to $+45^\circ$, the opposite is true. Only one polarization filter is required for observation in the transverse direction, as the observation is made parallel to the plane of polarization of the σ components and these appear therefore linearly polarized (Fig. 3). The π component is always linearly polarized. When the polarization filter is set to 0° , the σ components can be observed accordingly, while the π component disappears. When the polarization filter is set to 90° , the opposite is true.

In the experiment, the splitting is observed with the help of a digital camera preceded by a Fabry-Pérot etalon and imaging optics. The Fabry-Pérot etalon is designed to fulfill the resonance condition for the specific wavelength of 643.8 nm of the red Cd line. When the light from the cadmium lamp passes through the Fabry-Pérot etalon, interference rings are created which, like the spectral line, are split as a function of the external magnetic field and imaged onto the camera sensor by the optics. Observation parallel or perpendicular to the external magnetic field is made possible by a rotating electromagnet. The splitting is observed qualitatively and the polarization of the doublet and triplet components is examined using a quarter-wavelength filter with polarization attachment and a polarization filter.

The spectroscopy with a Fabry-Pérot etalon is subject of the experiment UE5020900, in which the interference rings are measured as a function of the external magnetic field and the Bohr magneton is determined.

EQUIPMENT LIST

1 Cadmium Lamp with Accessories @230 V	1021366
or	
1 Cadmium Lamp with Accessories @115 V	1021747
1 Fabry-Pérot-Etalon 644 nm	1020903
1 DC Power Supply, linear regulated, 1 – 30V, 0 – 10A @230V	1025380
oder	
1 DC Power Supply 20 V, 5 A @115 V	1003311
1 U Core D	1022663
2 Coils D, 900 Turns	1012859
1 Electromagnet Accessory for Zeeman Effect	1021365
1 Microscope Camera Bresser MikroCam SP 3.1	1024060
1 Lens 12 mm for Bresser Microscope Camera	1024059
1 Stainless Steel Rod with ¼ inch Thread, 100 mm	1025431
1 Red Filter mounted on holder	1025376
2 Convex Lenses on Stem, $f = 100$ mm	1003023
1 Quarter-Wavelength Filter on Stem	1021353
1 Polarising Attachment	1021364
1 Polarisation Filter on Stem	1008668
1 Optical Precision Bench D, 1000 mm	1002628
1 Support for Optical Bench D	1012399
1 Optical Base D	1009733
3 Optical Riders D 90/36	1012401
2 Optical Riders D 60/36	1002639
1 Pair of Safety Experimentz Leads, 75 cm, blue, red	1017718
1 Pair of Safety Experimentz Leads, 75 cm, black	1002849

SAFETY INSTRUCTIONS

- Before setting up the experiment, read and observe the operating instructions for the devices and in particular the safety instructions formulated therein.
- Protect the Cd lamp from mechanical shocks. Do not touch the glass bulb of the Cd lamp with bare hands.
- Only operate the Cd lamp with the ballast supplied. Before putting the Cd lamp mounted on the electromagnet in operation, it is essential to establish the protective earthing. To do this, connect the PE sockets on the ballast and the pole piece of the electromagnet accessory for Zeeman effect (1021365) to each other using the yellow-green safety experiment lead (protective earth conductor) supplied.
- Before putting the electromagnet in operation, ensure that the pole pieces are in the correct position as described in the operating instructions for the electromagnet accessory for Zeeman effect (1021365).

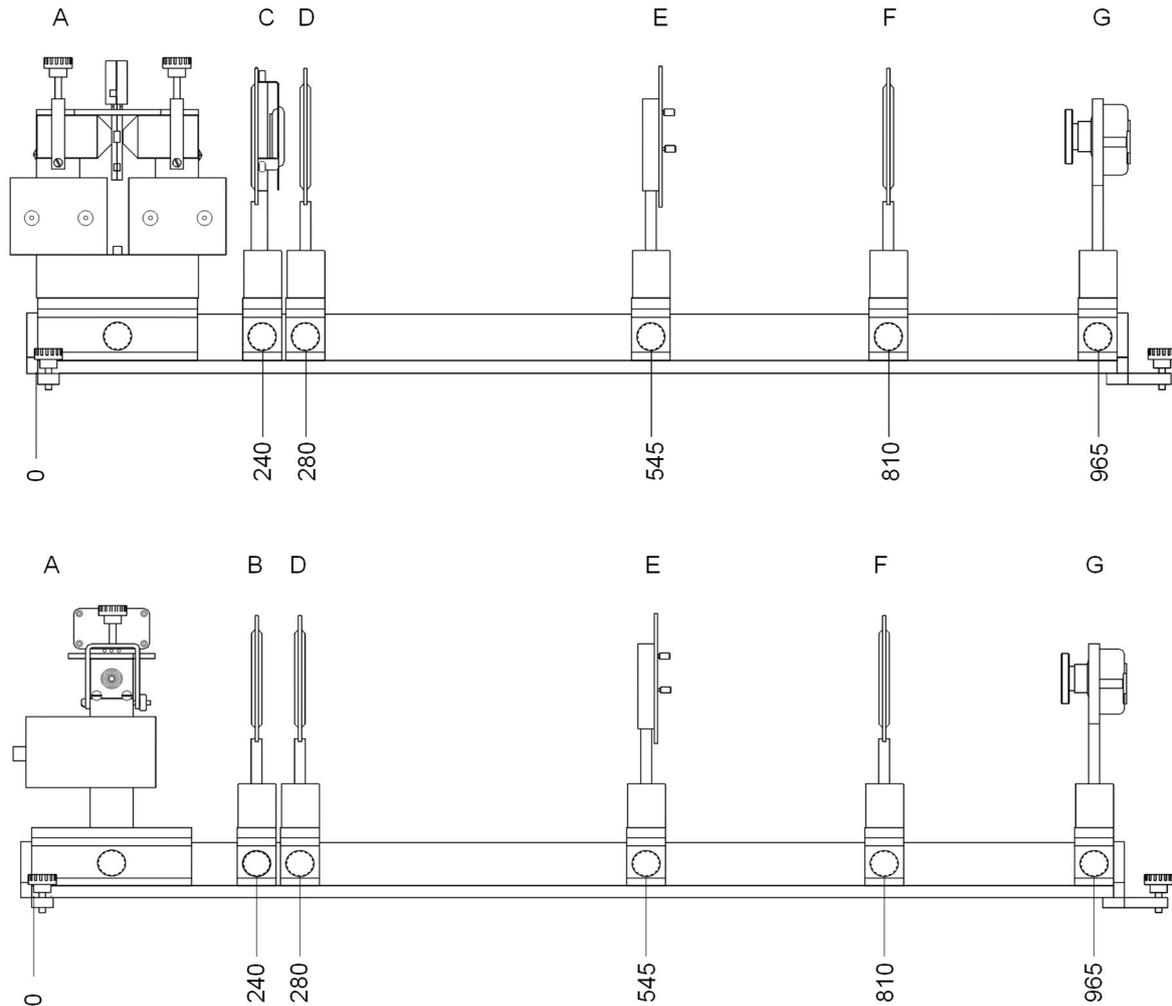


Fig. 4: Experimental setup for the normal Zeeman effect in longitudinal (top) and transversal (bottom) configuration. A: Electromagnet with Cd lamp, B: Polarization filter, C: Quarter wavelength filter with polarizing attachment, D: Convex lens $f = 100$ mm (condenser lens), E: Fabry-Pérot etalon, F: Convex lens $f = 100$ mm (imaging lens), G: Camera with 12 mm lens. See text for exact positioning of components

The maximum current through the coils D with 900 turns is 5 A (7 minutes). It can be doubled for short periods (30 seconds). The coils have an internal reversible thermal fuse which trips at a winding temperature of 85°C. The reset time is 10-20 minutes, depending on the ambient temperature.

- Carry out the measurement quickly enough to prevent the thermal fuse from tripping due to high currents flowing for too long.
- Do not operate the coils without a transformer core.

GENERAL INFORMATION

It is recommended to carry out the experiment in a dark room in order to minimize stray light from the surroundings and to achieve optimum exposure and contrast of the camera's live image.

The camera software must be installed on the measuring computer.

SETUP

Mounting the electromagnet and the Cd lamp

- Mount the supports for optical bench (1012399), the long one on the left-hand side of the optical bench, the short one on the right-hand side (scale at the front). Set up the optical bench on a level experimental site.
- Position and fix the optical base (1009733) on the optical bench so that it is flush left with the front plate (Fig. 4).
- Assemble the electromagnet in longitudinal configuration (Fig. 4 top) on the optical base as described in the operating instructions for the electromagnet accessory for Zeeman effect (1021365).
- Mount the cadmium lamp on the electromagnet as described in the operating instructions for the Cd lamp with accessories (1021366 / 1021747).

- Connect the PE sockets on the ballast of the Cd lamp and on the pole piece of the electromagnet using the supplied yellow-green safety experiment lead (protective conductor).
- Connect the Cd lamp to the ballast using the 4 mm safety experiment leads. Connect the ballast to the mains using the mains cable. Do not switch on the ballast yet.
- Connect the “0” tap of the left coil to the “900” tap of the right coil and the “0” tap of the right coil to the “900” tap of the left coil. Then connect the “0” tap of the left coil to the “-” output of the DC power supply unit and the “900” tap of the left coil to the “+” output of the DC power supply unit (Fig. 1). Connect the DC power supply unit to the mains using the mains cable. Do not switch on the DC power supply unit yet.
- Open the “Power Frequency (anti-flicker)” menu item in the camera window (scroll down if necessary) and click on “AC (50 Hz)” or “AC (60 Hz)”.

This setting minimizes the influence of the mains frequency on the camera's live image.

- Select the optimum exposure time manually. Do not use the white balance, otherwise the effect of the red filter will be compensated.
- If necessary, optimize the sharpness by turning the 12 mm lens.
- If necessary, move the camera slightly up or down in the optical rider so that the image is centered.

Note:

Due to the optical imaging, a real, upside-down image is created. If the camera is moved upwards in the optical rider, the image moves downwards and vice versa.

Mounting the camera and optics

- Screw the tripod rod (1025431) into the 1/4" tripod thread at the bottom of the camera.
- Screw the 12 mm lens (1024059) into the C-mount thread on the front of the camera.
- Screw the red filter (1025376) onto the 12 mm lens.
- Mount the polarizing attachment (1021364) on the quarter-wavelength filter (1021353) as described in the operating instructions.

The polarization filter on stem (1008668), the two convex lenses on stem, $f = 100$ mm (1003023) and the Fabry-Pérot etalon (1020903) require no further assembly.

Starting up the experiment and adjustment

- Switch on the ballast of the Cd lamp and wait approx. 5 minutes.

After a warm-up time of approx. 5 minutes, the Cd lamp has reached 90% of its light output.

- Position and fix a long optical rider (1012401) for the camera on the optical bench so that it is flush right with the front plate. Insert the camera into the optical rider as far as it will go, then move it upwards by approx. 2 cm and fix it.
- Center the 12 mm lens so that it has sufficient clearance in both directions of rotation.
- Position and fix a short optical rider (1002639) for the imaging lens (convex lens $f = 100$ mm, 1003023) at 810 mm. Insert the imaging lens into the optical rider as far as it will go and fix it.
- Start the computer and connect the camera to the computer using the USB cable.
- Start the software. The camera is automatically detected and appears in the camera list. Select the camera and click on it.

The live image is displayed in the window and looks like Fig. 5 after the optimization described below.

- Darken the room if the live image is affected by stray light.

Note:

The screenshots in Fig. 5 - Fig. 7c were taken in a completely darkened room.

- Position and fix a short optical rider (1002639) for the condenser lens (convex lens $f = 100$ mm, 1003023) at 280 mm on the optical bench. Insert the condenser lens into the optical rider as far as it will go and fix it. If necessary, move the imaging lens so that the light spot appears to fill the image and adjust the exposure time (live image as in Fig. 6).

- Position and fix a long optical rider (1012401) for the Fabry-Pérot etalon (1020903) at 545 mm on the optical bench. Insert the Fabry-Pérot etalon into the optical rider as far as it will go and fix it.

Note:

The interference rings may appear blurred and too bright. To optimize sharpness and exposure, the camera position, focus and exposure time have to be adjusted.

- Move the camera to 965 mm, if necessary move it slightly up or down in the optical rider so that the image is centered again, optimize the sharpness by turning the 12 mm lens and adjust the exposure time (live image as in Fig. 7).
- Do not yet place the quarter-wavelength filter with polarizing attachment or the polarization filter in the beam path.

The setup is now configured for the experiment.

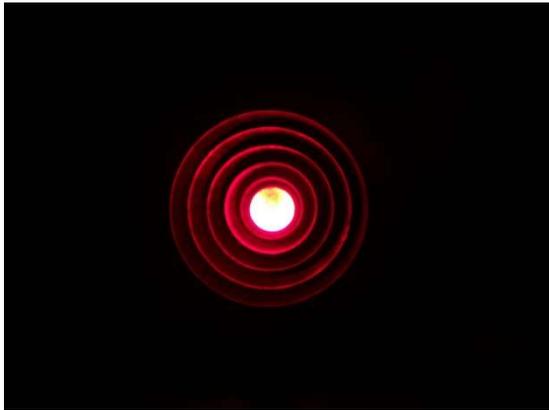


Fig. 5: Live image with camera and imaging lens. Stepped hole of the pole piece and light spot of the Cd lamp appear concentric and centered

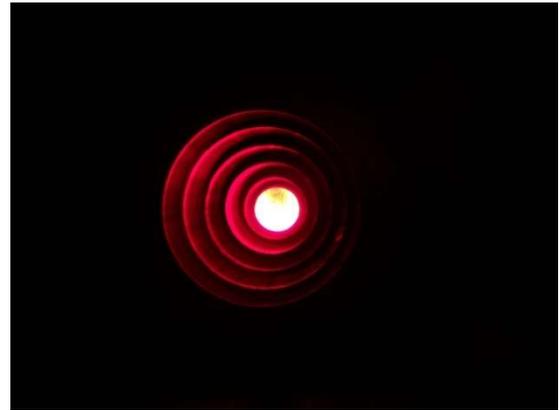


Fig. 5a: Electromagnet twisted. The stepped hole does not appear concentric. Correction: Turn the electromagnet so that it is centered

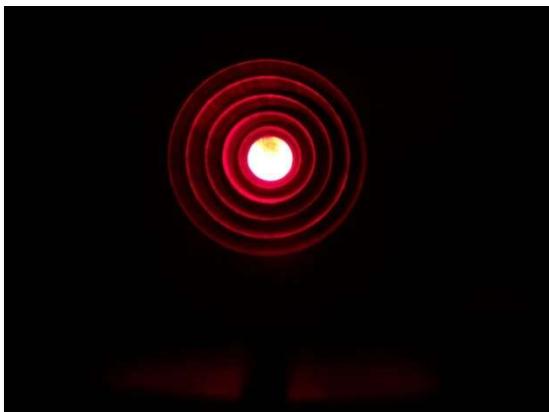


Fig. 5b: Camera too low in the optical rider. Correction: Move the camera up in the optical rider so that it is centered

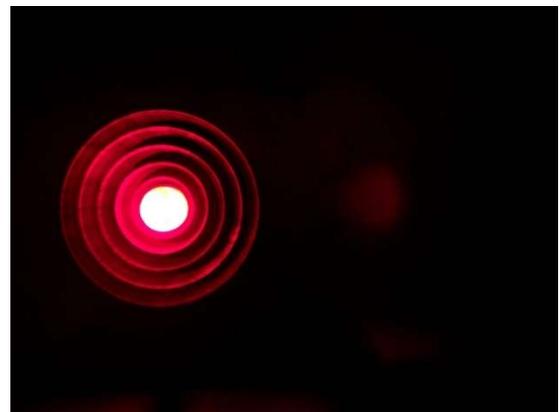


Fig. 5c: Camera twisted in the optical rider. Correction: Rotate the camera in the optical rider so that it is centered



Fig. 5d: Imaging lens twisted in the optical rider. Correction: Rotate the imaging lens in the optical rider so that it is aligned perpendicular to the optical axis



Fig. 6: Live image with condenser lens



Fig. 6a: Condenser lens twisted in the optical rider. Correction: Rotate the condenser lens in the optical rider so that it is aligned perpendicular to the optical axis



Fig. 7: Live image with Fabry-Pérot etalon



Fig. 7a: Poor focusing. Correction: Turn the 12 mm lens so that the interference rings are clearly visible



Fig. 7b: Etalon twisted in the optical rider. Correction: Rotate the etalon in the optical rider so that it is aligned perpendicular to the optical axis



Fig. 7c: Etalon tilted. Correction: Adjust using the three adjusting screws on the housing.

EXPERIMENT PROCEDURE, MEASUREMENT EXAMPLE UND EVALUATION

Observation in longitudinal direction

Carry out the following steps, observe how the interference rings change and take screenshots (Fig. 8).

- Do not apply an external magnetic field.

Only the interference rings generated by the Fabry-Pérot etalon are observed, each of which corresponds to the red Cd spectral line (Fig. 8a).

- Apply an external magnetic field by switching on the DC power supply unit and increasing the current through the coils to 3.5 A ($B = 334$ mT).

Note:

When a magnetic field is applied, the exposure time should be ≥ 20 ms, as otherwise “flickering lines” may occur due to an interference of the camera’s “rolling shutter sensor”.

The splitting into the line doublet with the two shifted components σ^- and σ^+ is observed, the unshifted π component is not observed (Fig. 8b).

- With the magnetic field applied, position the quarter-wavelength filter with polarization attachment between the electromagnet and the convex lens using a long optical rider (1012401) (Fig. 4 C).

Note:

The quarter-wavelength filter must be on the side of the Cd lamp.

- With the magnetic field applied, set the quarter-wavelength filter with polarization attachment to -45° .

The σ^- component disappears (Fig. 8c).

- With the magnetic field applied, set the quarter-wavelength filter with polarization attachment to $+45^\circ$.

The σ^+ component disappears (Fig. 8d).

- Remove the quarter-wavelength filter with polarization attachment from the beam path.
- Reduce the current to zero and switch off the DC power supply unit.

Observation in transversal direction

- Turn the electromagnet so that the pole pieces are oriented perpendicular to the direction of the optical axis (Fig. 4).
- Do not apply an external magnetic field.

Only the interference rings generated by the Fabry-Pérot etalon are observed, each of which corresponds to the red Cd spectral line (Fig. 8e).

- Apply an external magnetic field by switching on the DC power supply unit and increasing the current through the coils to 3.5 A ($B = 334$ mT).

The splitting into the line triplet with the unshifted π component and the two shifted components σ^- and σ^+ is observed (Fig. 8f).

- With the magnetic field applied, position the polarization filter between the electromagnet and the convex lens (Fig. 4 B) and set it to 0° , i.e. perpendicular to the magnetic field.

The π component disappears (Fig. 8g).

- With the magnetic field applied, set the polarization filter to 90° , i.e. parallel to the magnetic field.

The two σ components disappear (Fig. 8h).

- Remove the polarization filter from the beam path.
- Reduce the current to zero and switch off the DC power supply unit.

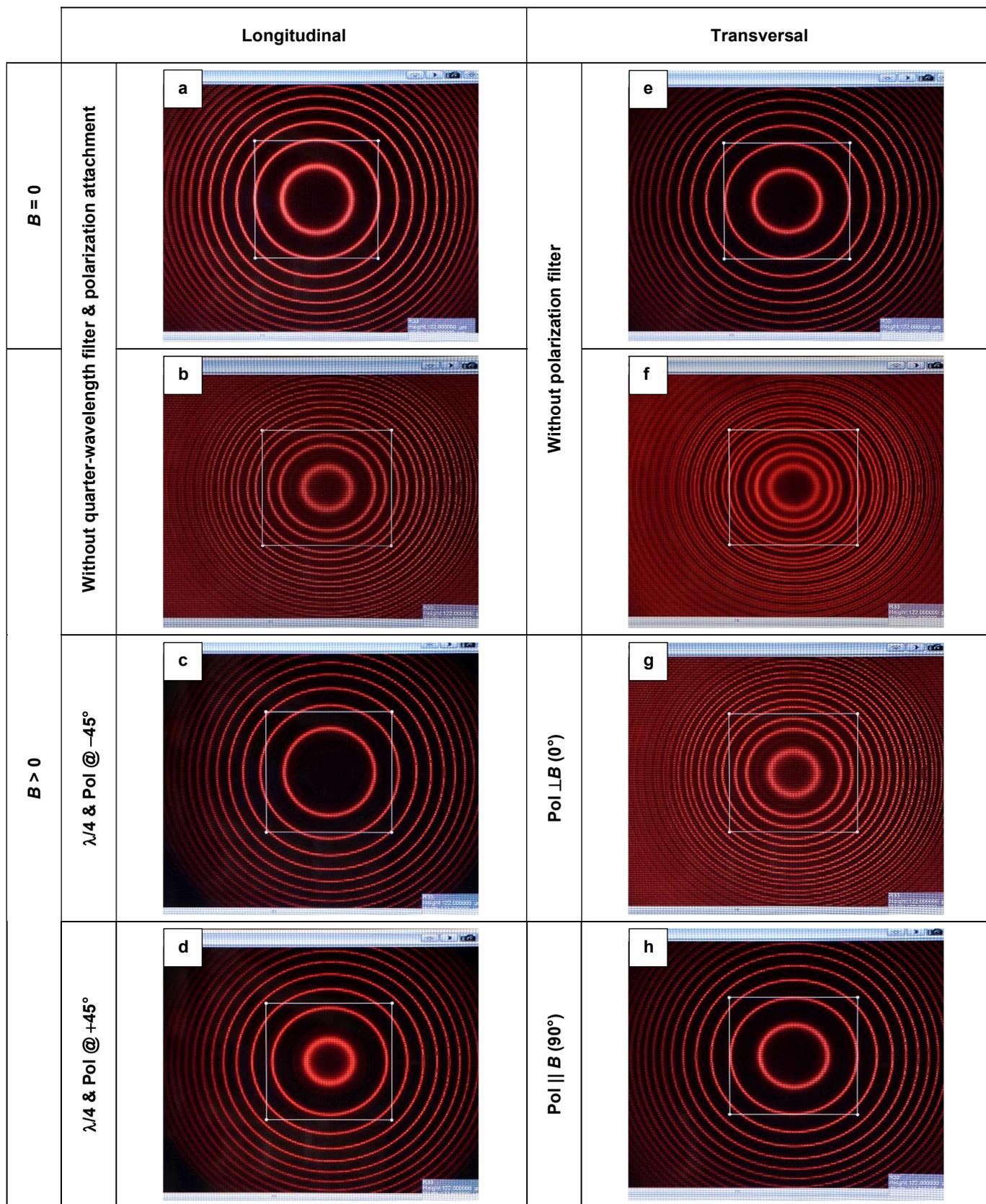


Fig. 8: Observation of the doublet and triplet splitting of the red cadmium line in the external magnetic field and investigation of the polarization. For better orientation, the second interference ring counted from the center is marked with a frame