

P401 Elektronische Übergänge in Atomen

P401.1 Versuchsziel

Mit einfachen spektroskopischen Methoden wurde schon im Jahr 1885 von Johann Jakob Balmer gezeigt, dass Atome Energieniveaus besitzen. Dies zog letztlich die Einführung von Termschemata nach sich. Mit diesen, bei Mehrelektronenatomen recht komplexen Schemata lassen sich die beobachtbaren Spektrallinien eines Atoms erklären.

Werden Atome in ein Magnetfeld gebracht, so spalten die Energieniveaus weiter auf. Die Entartung der Energieniveaus wird aufgehoben und kann beobachtet werden. Pieter Zeeman wies den nach ihm benannten Effekt im Jahr 1896 nach, der drei Jahre später durch Hendrik Antoon Lorentz erklärt werden konnte. Im Jahr 1902 erhielten beide für ihre Entdeckung den Nobelpreis für Physik.

Auch beim Zeeman-Effekt lassen sich mit dem Termschema wiederum Aussagen über die elektronischen Übergänge machen. Dabei müssen – wie auch ohne externes Magnetfeld – die Auswahlregeln beachtet werden.

Im Versuch soll mit einem hochauflösenden Fabry-Pérot-Etalon der Zeeman-Effekt an Cadmium ausgemessen werden. Die Bestimmung des Polarisationszustandes der einzelnen Spektrallinien wird durchgeführt. Aus der Messung soll das Bohrsche Magneton bestimmt werden.

Ferner wird der Franck-Hertz-Versuch mit Quecksilber durchgeführt. Dieser Versuch wurde erstmals von James Franck und Gustav Hertz in den Jahren 1911 bis 1914 durchgeführt und belegt die Existenz von diskreten Energieniveaus in Atomen. Für diesen Versuch wurde den beiden im Jahr 1925 der Nobelpreis für Physik verliehen.

Im Versuch soll die Übergangsenergie der Quecksilber-Resonanzlinien bestimmt werden und der Einfluss der Temperatur und der zur Durchführung des Versuchs nötigen Gegenspannung auf die Messung untersucht werden.

P401.2 Notwendige Vorkenntnisse

Teil I – Zeeman-Effekt

- Verhalten von Atomen in äußeren Magnetfeldern
 - Magnetisches Moment, Zeeman- und Paschen-Back-Regime, Energieverschiebungen, Landé-Faktor
 - Auswahlregeln elektrischer Dipolübergänge, Übergänge in Cadmium, insbesondere der Übergang $^1D_2 \rightarrow ^1P_1$ der fünften Schale
 - Winkelverteilung elektrischer Dipolstrahlung, Richtungsabhängigkeit der abgestrahlten Polarisation für die verschiedenen Übergänge
- Fabry-Pérot-Etalon
 - Funktionsprinzip, Auflösungsvermögen, Finesse
- Natürliche Linienbreite und Linienverbreiterungen
- Viertel-Wellenlängen-Platte
- Hall-Sonde

Teil II – Franck-Hertz-Versuch

- Röhrenelektronik
 - Glühemission, Elektronenbewegung in einem Triodensystem, Gegenfeldmethode, Anodenstromkurve
- Thermodynamik und Stoßprozesse
 - Gaskinetik, elastische und inelastische Stöße, mittlere freie Weglänge, Stoßanregung
- Quecksilberatom
 - Termschema, Stoßanregungen der $6^1S_0 \rightarrow 6P$ Übergänge und Stoßquerschnitte

P401.3 Literatur

- Haken, Wolf: „Atom- und Quantenphysik“
- Mayer-Kuckuk: „Atomphysik“
- Hecht: „Optik“
- Schwabl: „Statistische Mechanik“
- Alonso, Finn: „Quantenphysik und Statistische Physik“
- Nolting: „Grundkurs: Theoretische Physik 4/6“
- Demtröder: „Laserspektroskopie“

P401.4 Aufgaben

Teil I – Zeeman-Effekt

- Aufbau der Apparatur
- Justieren mit eingesetzter Cd-Lampe
- Beobachtung der Aufspaltung mit und ohne Magnetfeld mit einem Okular in transversaler und longitudinaler Konfiguration
- Bestimmung des Polarisationszustandes der einzelnen Linien
- Kalibrierung des Magnetfeldes
- Messung der Zeeman-Aufspaltung an der roten 643,8 nm-Cadmium-Linie mit einer CCD-Kamera

! Hierzu bitte einen USB-Stick mitbringen !

- Bestimmung des Bohrschen Magnetons μ_B
- Abschätzen des Auflösungsvermögens und der Finesse des Etalons

Teil II – Franck-Hertz-Versuch

- Bestimmung der Anregungsenergie für die Hg-Resonanzlinie anhand der Anodenstromkurven für unterschiedliche Dampfdrücke und Gegenspannungen
- Diskussion der Form der Anodenstromkurven

P401.5 Durchführung und Analyse

Teil I – Zeeman-Effekt

! Achtung !

- Die elektrischen Zuleitungen an der Cadmiumlampe sind frei zugänglich!
 - auf keinen Fall stromführende Teile berühren!
- Den Quarzkolben der Cadmiumlampe *niemals* mit bloßen Händen berühren!
- Vor dem Einschalten des Magneten kontrollieren, ob die Knebelschrauben fest angezogen sind (warum?)!

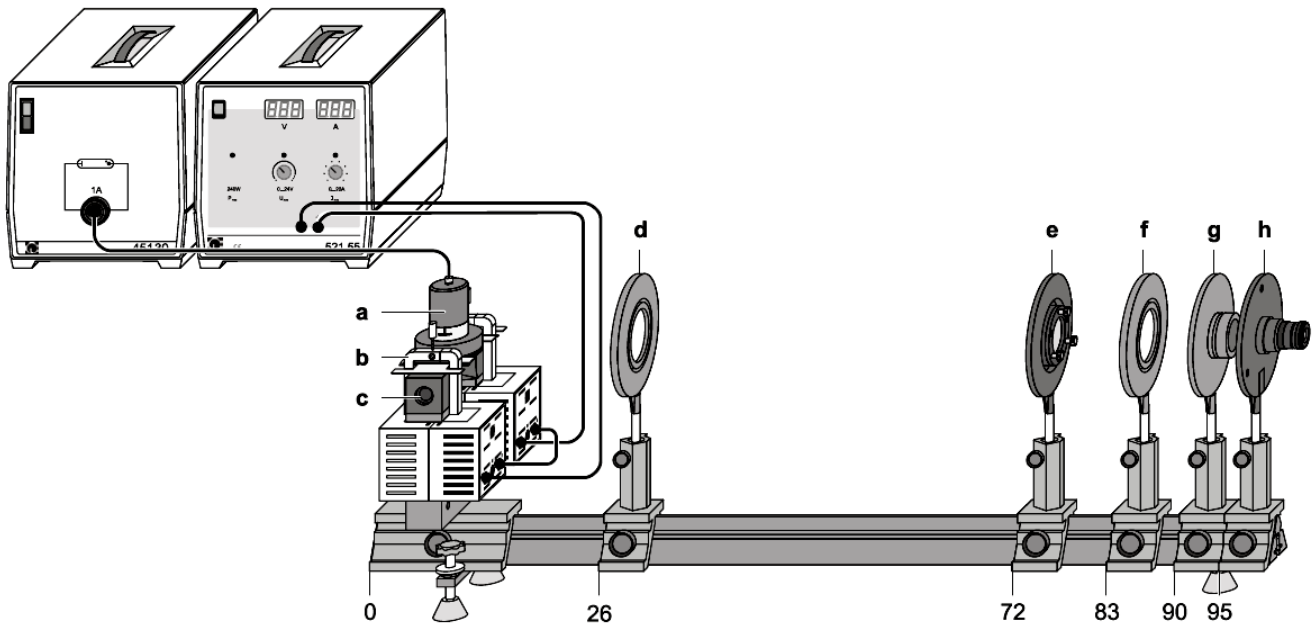


Abbildung P401.1: Versuchsaufbau in transversaler Konfiguration (LD Handblätter Physik)

P401.5.1 Aufbau der Apparatur

- Nach Abb. P401.1 ist der Versuch aufzubauen.
 - a Cadmiumlampe mit Halteplatte
 - b Klammern
 - c Polschuhe
 - d Sammellinse, $f = 150 \text{ mm}$ (Kondensorlinse)
 - e Fabry-Pérot-Etalon
 - * Dicke: $d = 4 \text{ mm}$
 - * Brechungsindex: $n = 1,457$
 - * Reflexionsgrad: $R = 0,85$
 - f Sammellinse, $f = 150 \text{ mm}$ (Abbildungslinse)
 - g Interferenzfilter (rot) in Halterung
 - * Mittelwellenlänge: $\lambda = 643,8(20) \text{ nm}$
 - * Halbwertsbreite: $13,0 \text{ nm}$
 - h Okular mit Strichskala
- Die Knebelschrauben während des ganzen Versuches *nicht* lösen!
- Die Cadmiumlampe vorsichtig zwischen die Polschuhe schieben.
 - Die Lampe soll sich genau in der Mitte der Polschuhe befinden.
 - Die Abschmelzstelle des Lampenkolbens soll nach hinten zeigen.

- Die Zuleitungen möglichst weit aus dem Strahlengang drehen.
- Die Spulen des Elektromagneten in Reihe beschalten (unterschiedliche Polung beachten) und an das Hochstrom-Netzgerät anschließen.

Justierung der Apparatur

- Nach dem Einschalten der Cadmiumlampe zwei Minuten bis zur hinreichend starken Lichtemission warten.
- Das Okular scharf auf die Strichskala einstellen.
- Die Abbildungslinse verschieben, bis ein scharfes Bild des Ringsystems zu beobachten ist.
- Die Kondensorlinse verschieben, bis das beobachtete Bild möglichst gleichmäßig ausgeleuchtet ist.
- Durch leichtes Kippen des Fabry-Pérot-Etalons mit den Stellschrauben das Zentrum des Ringsystems auf die Mitte der Strichskala verschieben.

P401.5.2 Beobachtung der Aufspaltung

Transversale Konfiguration

- Zunächst das Interferenzmuster ohne Magnetfeld beobachten.
 - Aufspaltung skizzieren.
- Magnetstrom langsam erhöhen, bis die aufgespaltenen Ringe deutlich voneinander getrennt sind.
 - Aufspaltung skizzieren.
- Zur Unterscheidung von π - und σ -Komponenten den Polarisationsfilter vor das Etalon stellen.
 - Den Filter drehen, bis die π - bzw. die σ -Komponente verschwindet.
 - Die Winkel des Filters zusammen mit der dazugehörigen Skizze aufnehmen.
- Der Filter ist wieder aus dem Strahlengang zu entfernen.
- Nun wird der Strom so eingestellt, dass die aufgespaltenen Linien gerade unterschieden werden können. Um daraus später das Auflösungsvermögen bestimmen zu können, ist der Magnetstrom zu notieren.

Longitudinale Konfiguration

- Hierzu den kompletten Aufbau der Cadmiumlampe mit Polschuhen auf dem Reiterfuß mit Gewinde um 90° drehen.
- Zunächst das Interferenzmuster ohne Magnetfeld beobachten.
 - Aufspaltung skizzieren.
- Magnetstrom langsam erhöhen, bis die aufgespaltenen Ringe deutlich voneinander getrennt sind.
 - Aufspaltung skizzieren.
- Zur Unterscheidung zwischen σ^+ - und σ^- -Komponente vor das Etalon zusätzlich zum Polarisationsfilter eine Viertel-Wellenlängen-Platte stellen und letztere auf 0° drehen.
 - Den Filter nun drehen, bis jeweils eine der beiden Dublett Komponenten verschwindet.
 - Die Winkel des Filters zusammen mit der dazugehörigen Skizze aufnehmen.
- Den Filter und die Viertel-Wellenlängen-Platte sind wieder aus dem Strahlengang zu entfernen.
- Nun wird der Strom so eingestellt, dass die aufgespaltenen Linien gerade unterschieden werden können. Wiederum ist der Magnetstrom zu notieren.
- Für die nachfolgenden Messungen den Aufbau in transversale Konfiguration bringen.


P401.5.3 Messung der Aufspaltung

Aufbau

- Das Hochstrom-Netzgerät ist zunächst auszuschalten.
- Zwischen die Magnetspulen ist das „Cassy-Modul“ zur Strommessung zu schalten.
- Die ausgeschaltete Cadmiumlampe *vorsichtig* zwischen den Polschuhen des Magneten herausziehen.
 - Die Knebelschrauben *nicht* lösen!
- Die Hall-Sonde mit dem „Cassy-Modul“ verbinden und den vorderen, tangentialen Fühler vertikal in der Mitte der Polschuhe platzieren.
 - *Niemals* die Hall-Sonde gleichzeitig mit der Lampe zwischen die Polschuhe schieben!

Magnetfeldkalibrierung

Eine Kalibrierungskurve für das Magnetfeld gegen den Magnetstrom ist aufzunehmen, damit die weitere Auswertung erfolgen kann.

- Das Programm „*Magnetfeldkalibrierung*“ auf dem Computer starten.
 - Die Sonde ist – auch unter Zuhilfenahme der vom Programm angezeigten Magnetfeldmesswerte bei geringer Bestromung der Spulen – so zu justieren, dass sie mittig zwischen den Polschuhen sitzt.
 - Im entsprechenden Menü jeden Kanals mittels Klick auf die Schaltfläche  einen eventuell auftretenden Offset ausgleichen.
- Die Messung mit F9 starten.
- Den Strom nun langsam erhöhen, sodass ein Strom von 0 A bis maximal 10 A durchfahren wird.
- Die Messung mit F9 wieder stoppen.
- Den Strom wieder auf 0 A drehen.
- Mit einem Rechtsklick der Maus auf die Tabelle diese mit „*Tabelle kopieren*“ kopieren und in einer Textdatei speichern.

Justierung der Apparatur

- Die Hall-Sonde wieder entfernen und die Cadmiumlampe, wie in P401.5.1 beschrieben, wieder *vorsichtig* einsetzen.
- Das Okular gegen die CCD-Kamera tauschen. Die Kamera „*VideoCom*“ mit Spannung versorgen und mit dem Computer verbinden.
- Das Programm „*VideoCom-Intensitäten*“ starten.
 - Im Menü „*Kalibrierung / Theorievergleich*“ (F5), Register „*Beugungswinkel*“, die Brennweite f der abbildenden Sammellinse eingeben. Das Programm berechnet dann aus der Pixelkoordinate p , die von 0 bis 2047 läuft, den Winkel α über

$$\alpha = \arctan \left(\frac{(1024 - p) \cdot 0,014 \text{ mm}}{f} \right) .$$

- Mit F9 die Messung mit 2048 Punkten zur Justierung starten.
 - Die Belichtungszeit mit der zugehörigen Schaltfläche so einstellen, dass die Peaks eine Intensität von 50 % haben.
- Um zu erreichen, dass sich die CCD-Zeile in der Brennebene der Abbildungslinse befindet, wird diese Linse verschoben, bis die Peaks der beobachteten Kurve scharf sind und die maximale Intensität haben.

- Das Zentrum des Ringsystems muss nun auf die CCD-Zeile abgebildet werden. Dazu wird das Etalon mit den Stellschrauben gekippt. Das Zentrum des Ringsystems ist gefunden, wenn beim Verkippen des Etalons auf dem Bild keine weiteren Peaks hervorquellen und die beiden zentralen Peaks den maximalen Abstand haben.
- Nun wird das Etalon so gekippt, dass der Mittelpunkt zwischen den beiden ersten Peaks auf 0° der Winkelskala liegt.
- Die Kondensorlinse wird so verschoben, dass eine möglichst gleichmäßige Ausleuchtung der gesamten CCD-Zeile erreicht wird.

Messung

- Zunächst wird ohne Magnetfeld eine Messung mit F9 durchgeführt. Um statistische Schwankungen zu minimieren, mit der entsprechenden Schaltfläche (Σ_1) eine Mittelwertbildung der Intensitäten vornehmen. Die Mittelwertbildung braucht nicht lange zu laufen. Es reicht, wenn der nebenstehende Zähler bis 40 läuft.
- Die Messung wieder stoppen (erst F9, dann Σ_1) und die Daten der Tabelle über einen Rechtsklick der Maus auf die Tabelle mit „*Tabelle kopieren*“ in einer Textdatei speichern.
- Die Intensität der Peaks sollte etwa bei 50 % liegen. Gegebenenfalls die Belichtungszeit erneut anpassen, da sich die Helligkeit der Cadmiumlampe im Magnetfeld ändert.
- Mit F9 erneut eine Messung starten. Den Magnetstrom nun langsam hochfahren und die Aufspaltung beobachten. So kann ein sinnvoller Messbereich ermittelt werden.
- Mit Alt+Z den Ausschnitt eines inneren Peaks vergrößern.
- Nun in einem sinnvollen Messbereich die Aufspaltung für verschiedene Magnetströme messen.
 - Für jeden Magnetstrom die Messung mit F9 starten, die Mittelwertbildung benutzen, die Messung stoppen und die Werte mit dazugehörigem Magnetstrom in einer Textdatei speichern.
 - Es sind mindestens zehn Messungen mit verschiedenen Strömen durchzuführen.
 - Da sich die Spulen mit der Zeit erhitzen, sollte der Strom *nur* während der Mittelwertbildung fließen!
- Abschließend ist noch eine zweite Magnetfeldkalibrierung durchzuführen.

P401.5.4 Auswertung

Beobachtung des Zeeman-Effektes

- Es sind die mit dem Okular beobachteten Interferenzmuster zu erklären.
- Die Polarisation der einzelnen Linien ist zu diskutieren.

Messung des Zeeman-Effektes

- Zur Kalibrierung des Magnetfeldes ist eine geeignete Funktion an die aufgenommenen Daten anzupassen, die die Sättigung der Messkurve berücksichtigt.
- Für jede Messung sind für die π - und σ -Peaks einer Seite eines inneren Rings die Peak-schwerpunkte zu bestimmen. Hierzu werden Gauß-Funktionen – eine Überlagerung dreier Gauß-Kurven ist sinnvoll – an die Peaks angepasst.
- Die Energieverschiebung ΔE ist aus der relativen Wellenlängenverschiebung $\Delta\lambda/\lambda_{\sigma\pm}$, die aus den Schwerpunkten und ohne Nutzung der Beugungsordnung gewonnen wird, zu berechnen. Hierzu ist die Interferenzbedingung für das Etalon zu benutzen, wobei Abb. P401.2 hilfreich sein kann.

$$\Delta E = -\frac{h c}{\lambda_{\pi}} \frac{\lambda_{\sigma\pm} - \lambda_{\pi}}{\lambda_{\sigma\pm}} \approx -\frac{h c}{\lambda_{\pi}^0} \frac{\lambda_{\sigma\pm} - \lambda_{\pi}}{\lambda_{\sigma\pm}} \equiv -\frac{h c}{\lambda_{\pi}^0} \frac{\Delta\lambda}{\lambda_{\sigma\pm}}$$

- Die Energieverschiebung ΔE ist als Funktion der magnetischen Flussdichte B aufzutragen. Daraus ist das Bohrsche Magneton μ_B zu bestimmen.
 - Die magnetische Flussdichte B ist gegebenenfalls durch geeignete Berücksichtigung vorhandener Abweichungen der beiden Kalibrierungsfunktionen zueinander zu gewinnen.

Weitergehende Überlegungen

- Das Auflösungsvermögen und die Finesse des Etalons sind abzuschätzen.
 - Dazu sind zunächst die theoretischen Werte für Auflösungsvermögen und Finesse zu berechnen.
 - Dann ist eine Abschätzung für das Auflösungsvermögen und die Finesse mit den gemessenen Magnetstrom-Werten der transversalen und longitudinalen Beobachtung durchzuführen.
 - Aus dem mit der CCD-Kamera aufgenommenen Interferenzbild ohne Magnetfeld ist ebenfalls die Finesse abzuschätzen. Dabei ist der Rechenweg zu dokumentieren.
- Die Doppler-Verbreiterung der Linien ist abzuschätzen, wobei für die Cd-Lampe eine Temperatur von 1000 K angenommen werden kann. Die Doppler-Verbreiterung ist mit der Breite einer mit der CCD-Kamera aufgenommenen Linie zu vergleichen.
- Es ist ein gegebenenfalls vorhandener Unterschied zwischen theoretischer und gemessener Finesse zu diskutieren.

Teil II – Franck-Hertz-Versuch

P401.5.5 Aufbau

Die Franck-Hertz-Röhre befindet sich in einem Ofen, dessen Temperatur über das Steuergerät des Franck-Hertz-Versuches geregelt wird. Mittels dieses Steuergeräts werden weiterhin die Kathodenheizspannung U_H , die Beschleunigungsspannung U_1 und die Gegenspannung U_2 geregelt. Der Anodenstrom I_A und die Beschleunigungsspannung U_1 werden direkt vom Steuergerät abgegriffen und über ein „Cassy-Modul“ vom Messrechner ausgelesen.

Die Beschaltung der Franck-Hertz-Röhre erfolgt über die Rückseite des Ofens und ist bereits vorgenommen. Durch eine Glasscheibe in der Frontseite ist die Franck-Hertz-Röhre beobachtbar.

P401.5.6 Durchführung

Der Ofen ist auf eine Temperatur von $T \approx 165^\circ\text{C}$ zu heizen. Es ist dabei darauf zu achten, dass die Aufheizzeit ausreichend ist, um die Franck-Hertz-Röhre gleichmäßig aufzuheizen, da schon geringe Temperaturänderungen erhebliche Dichteänderungen im Hg-Dampf hervorrufen können.

! Vorsicht !

Das Ofengehäuse wird sehr heiß. Bei längerem Betrieb können sich der Haltegriff und die Anschlüsse samt der angeschlossenen Kabel ebenfalls stark erwärmen.

Der Messrechner ist einzuschalten und das Programm „Cassy Lab“ zu starten, indem das Programm „Franck-Hertz“ geladen wird. Am Steuergerät wird mittels des Schalters „Function“ der Modus „Rampe“ eingestellt. Die Beschleunigungsspannung wird in diesem Modus automatisch bis zur Maximalspannung U_1^{\max} erhöht. Die Messung wird mit dem „Start/Stopp“-Knopf gestartet; direkt davor muss die Messung in „Cassy“ gestartet werden. Die Daten jeweils mit einem Rechtsklick der Maus auf die Tabelle mit „Tabelle kopieren“ kopieren und in einer Textdatei speichern.

- Zunächst für vier verschiedene Gegenspannungen U_2 – bei fester Temperatur T – die Anodenstromkurven $I_A(U_1)$ aufnehmen. Sinnvolle Gegenspannungen liegen im Bereich von 2 V bis 4 V.
- Weiterhin für vier verschiedene Temperaturen T – bei fester Gegenspannung U_2 – die Anodenstromkurven $I_A(U_1)$ aufnehmen. Sinnvolle Temperaturen liegen im Bereich von 165°C bis 180°C .

! Achtung !

Bei zu hoher Beschleunigungsspannung U_1 kann die Franck-Hertz-Röhre durchzünden. Dies bedeutet ein starkes Ansteigen des Anodenstroms I_A und kann die Kathode beschädigen. Erkennbar ist das Durchzünden an einem bläulichen Aufleuchten. Daher ist das Franck-Hertz-Rohr zu beobachten, wenn die Gitterspannung hochläuft. Die Zündspannungen können sich von Gerät zu Gerät unterscheiden. Es ist also kein Verlass auf beobachtete Werte der Partnergruppe. Experimentell beobachtete Zündspannungen liegen im Bereich von $U_1 = 35 - 45 \text{ V}$ (Stand 10/2023), wobei das Netzteil mit einer Einstellung von $U_1^{\text{max}} = 60 \text{ V}$ startet. Diese Einstellung muss nach dem Einschalten also deutlich reduziert werden.

Die Zündspannung steigt mit höherer Teilchendichte aufgrund der kleineren freien Weglänge. Ein Durchzünden wird durch Drücken des „Start/Stop“-Knopfes verhindert, wodurch die begonnene Messung abgebrochen wird. Falls die Franck-Hertz-Röhre durchgezündet ist, ist anschließend der am Steuergerät eingestellte Höchstwert der Beschleunigungsspannung U_1 zu vermindern und die Messung mit diesem neuen Wert durchzuführen.

Für eine sinnvolle Auswertung der Anodenstromkurven sollten im Messbereich jeweils mindestens 4 Maxima zu sehen sein. Falls für eine Messung die Maxima zu groß sind und außerhalb des Messbereichs liegen kann es sinnvoll sein, diese bei einer höheren Gegenspannung zu wiederholen.

P401.5.7 Auswertung

- Aus den Anodenstromkurven I_A ist die Energiedifferenz ΔE zwischen dem 6S- und dem 6P-Niveau des Hg-Atoms zu bestimmen. Hierbei ist auch die Breite der Kurven zu bestimmen.
- Die bestimmte Energiedifferenz ΔE ist mit Blick auf das Hg-Termschema (s. Abb. P401.5) und den Wirkungsquerschnitt für Elektronenstoßanregung von Hg-Atomen (s. Abb. P401.6) zu diskutieren.
- Der Einfluss der Temperatur T und der Gegenspannung U_2 auf den Verlauf des Anodenstroms I_A ist zu diskutieren. Dabei ist auch zu erläutern, warum es bei ganzen Vielfachen der Anregungsenergie keine scharfen Einbrüche im Anodenstrom gibt.
- Ferner ist zu erklären, warum die praktische Durchführung des Versuchs mit Hg-Atomen auf ein relativ kleines Temperaturintervall beschränkt ist.

P401.6 Anhang

- Die Dampfdruckkurve von Quecksilber lässt sich durch folgende Formel darstellen:

$$\log p = 10,55 - 3333/T - 0,85 \log T \quad (p \text{ in Torr und } T \text{ in Kelvin})$$

- Ausgewählte Energieniveaus von Quecksilber:

1S_0	3P_0	3P_1	3P_2	1P_1	3S_1
0,00 eV	4,67 eV	4,89 eV	5,46 eV	6,70 eV	7,73 eV

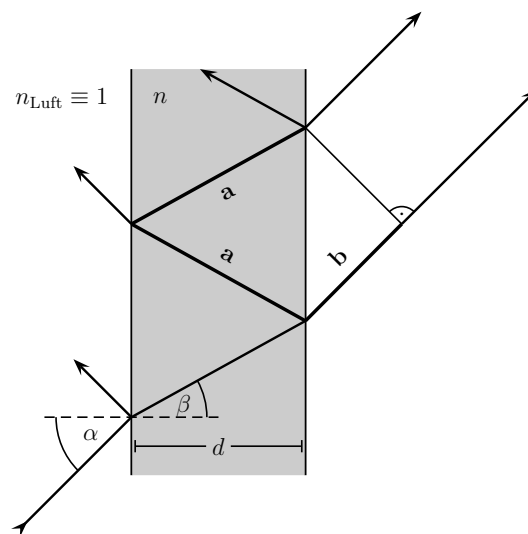


Abbildung P401.2: Strahlengang im Fabry-Pérot-Etalon.

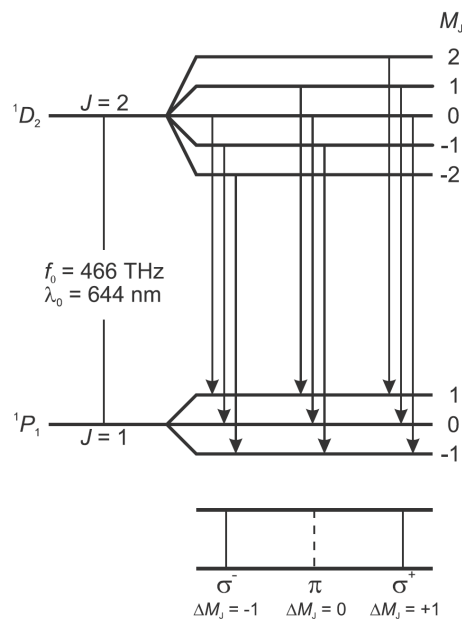


Abbildung P401.3: Niveauaufspaltung und Übergänge beim normalen Zeeman-Effekt an Cadmium (LD Handblätter Physik).

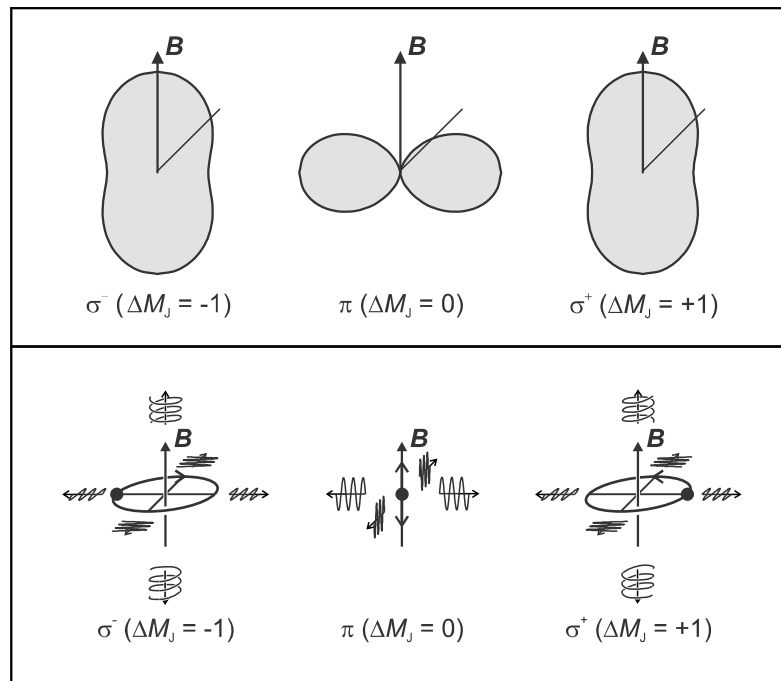


Abbildung P401.4: Abstrahlungsrichtungen (oben) und Polarisationsverteilung (unten) der elektrischen Dipolübergänge für $\Delta M_J = 0, \pm 1$ (LD Handblätter Physik).

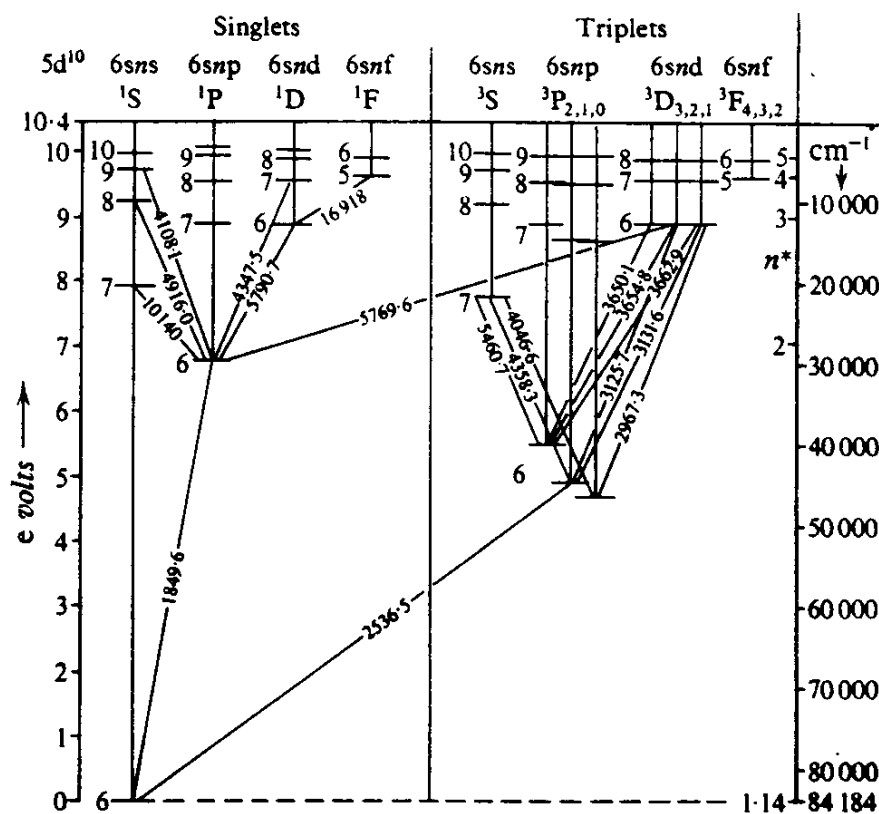


FIG. III, 28. Term diagram of Hg.

Abbildung P401.5: Vereinfachtes Hg-Termschema. (Kuhn, *Atomic Spectra*, S. 192, 1962.)

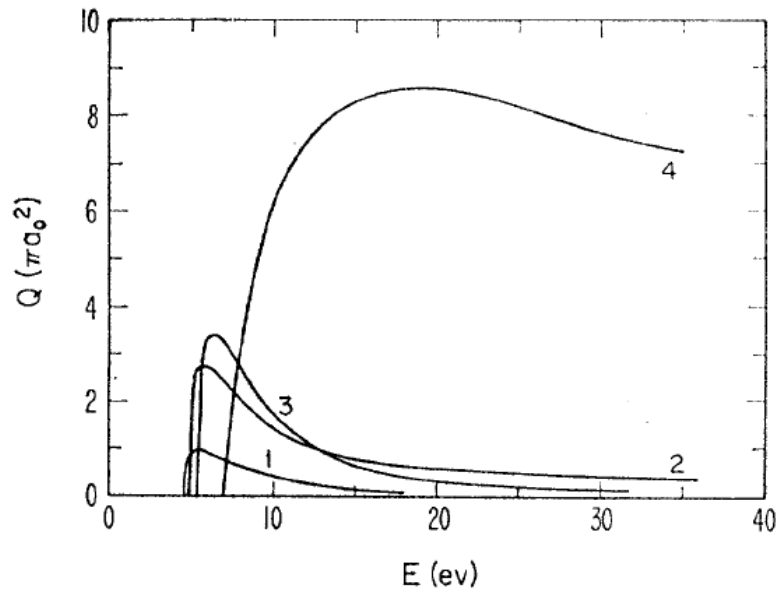


Abbildung P401.6: Totaler Wirkungsquerschnitt $Q(\pi a_0^2)$ von Hg für Elektronenstoßanregung.
 1: $6^1S_0 \rightarrow 6^3P_0$; 2: $6^1S_0 \rightarrow 6^3P_1$; 3: $6^1S_0 \rightarrow 6^3P_2$; 4: $6^1S_0 \rightarrow 6^1P_1$.
 (Moiseiwitsch, „Electron Impact Excitation of Atoms“, *Rev. Mod. Phys.* **40**, S. 267, 1968).

Viel Erfolg bei der Durchführung!

Stand: 10/2023