

# 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

**! Bitte einen USB-Stick zum Speichern der Messdaten mitbringen !**

### Teil I – Zeeman-Effekt

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

- Vor dem Einschalten des Magneten kontrollieren, ob die Knebel-schrauben fest angezogen sind (warum?)!

### P401.5.1 Allgemeiner Aufbau

#### Aufbau

- Nach Abb. P401.1 ist der Versuch aufzubauen.
  - a Cadmiumlampe mit Halteplatte

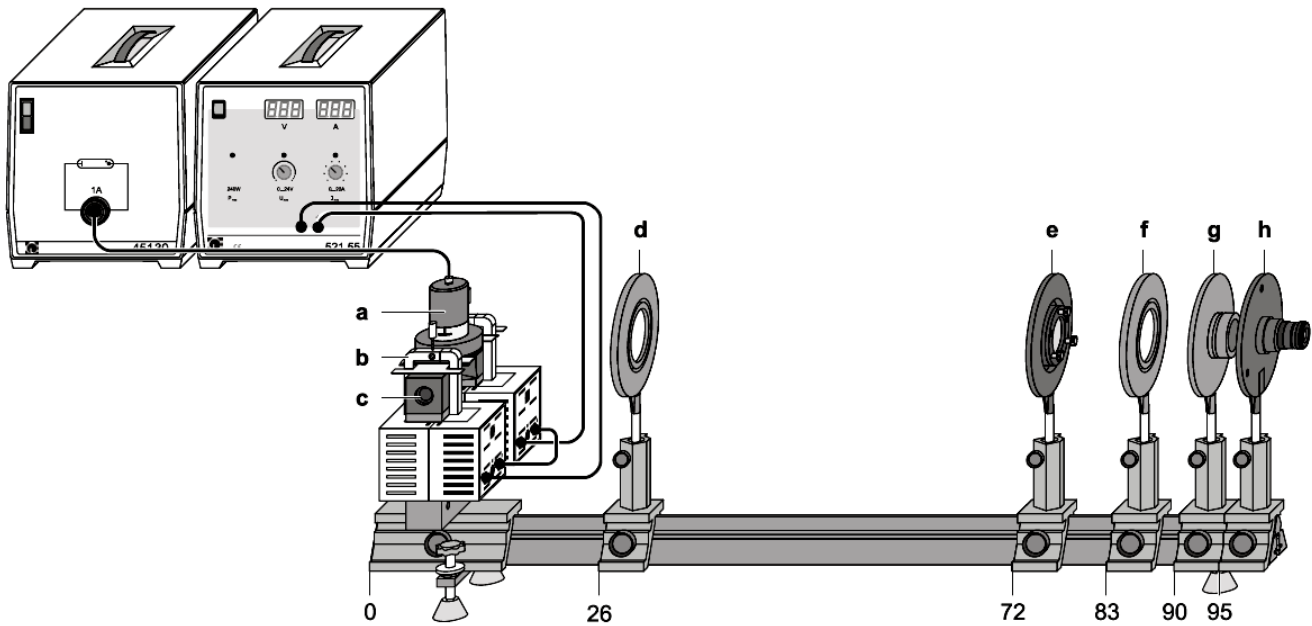


Abbildung P401.1: Versuchsaufbau in transversaler Konfiguration (LD Handblätter Physik)

**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 Spulen des Elektromagneten in Reihe beschalten (unterschiedliche Polung beachten) und an das Hochstrom-Netzgerät anschließen.

## Software

Infos zur Kamera und der genutzten Software „Zeeman-Effekt“:

- Beim Start des Programms müssen sowohl die Hall-Sonde wie auch die Kamera mit dem Computer verbunden sein!
- Die Software zeigt das Kamerabild sowie Schnitte durch dieses Bild. Beim speichern wird das Kamerabild als png sowie die Schnitte als csv-Datei im Ordner „Zeemandaten“ auf dem Desktop unter dem aktuellen Datum gespeichert. Die Dateien werden dabei automatisch durchlaufend nummeriert. Die csv-Dateien enthalten als Metadaten den gemessenen Strom, die Position der Schnitte sowie das zugehörige Magnetfeld, ausgehend von der letzten Kalibrierung, die am jeweiligen Tag durchgeführt wurde. Die Schnitte können über 1, 3, 5 oder 7 Pixel gemittelt werden, dies kann im Dropdown-Menü ausgewählt werden.
- Im Modus „Magnetfeldkalibrierung“ werden beim Speichern die Daten als csv-Datei im Ordner „Zeemandaten“ auf dem Desktop unter dem aktuellen Datum gespeichert. Die Dateien werden dabei ebenfalls automatisch durchlaufend nummeriert.
- Die Pixel der Kamera haben eine Größe von  $9.6 \mu\text{m} \times 9.6 \mu\text{m}$ .

## P401.5.2 Beobachtung mit dem Okular

Zu Beginn wird die Aufspaltung in transversaler Konfiguration qualitativ mit dem Okular beobachtet.

### 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.

### Beobachtung der Aufspaltung

- Zunächst das Interferenzmuster ohne Magnetfeld beobachten.
- Magnetstrom langsam erhöhen, bis die aufgespaltenen Ringe deutlich voneinander getrennt sind.
- Zur Unterscheidung von  $\pi$ - und  $\sigma$ -Komponenten den Polarisationsfilter vor das Etalon stellen.
  - Den Filter drehen, bis die  $\pi$ - bzw. die  $\sigma$ -Komponente verschwindet.

## P401.5.3 Magnetfeld

### Umbau zur Kalibrierung

- Das Hochstrom-Netzgerät zunächst ausschalten.
- Die Messbox zur Strom- und Magnetfeldmessung in den Stromkreis der Magnetspulen einbauen. Diese Enthält einen Arduino Micro Controller mit integrierten ADC (analog to digital converter).
- Die ausgeschaltete Cadmiumlampe *vorsichtig* zwischen den Polschuhen des Magneten herausziehen.
  - Die Knebelschrauben *nicht* lösen!
- Die Hall-Sonde mit einem Reiter auf der optischen Bank platzieren und dann den vorderen, tangentialen Fühler der Sonde vertikal in der Mitte der Polschuhe platzieren.
- Die Verknüpfung „Zeeman-Effekt“ auf dem Computer starten.
- Innerhalb der Zeeman-Software den Unterpunkt „Magnetfeldkalibrierung“ auswählen.

### Untersuchung der Abhängigkeit der Magnetfeldstärke vom Ort

Bei einer festen Einstellung der Stromstärke ist die Hallsonde im Bereich von etwa  $\pm 5$  mm um die Position mit maximaler Magnetfeldstärke in 1 mm-Schritten zu verschieben. Für jede Position ist die Magnetfeldstärke zu notieren.

### Magnetfeldkalibrierung

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

- Die Sonde ist nach der vorherigen Messung so zu justieren, dass sie mittig zwischen den Polschuhen sitzt.
- Den Strom nun langsam erhöhen, sodass ein Strom von 0 A bis 10 A durchfahren wird.
- Mithilfe der Software sind ausreichend viele Messpunkte zu setzen.
- Den Strom wieder auf 0 A drehen.
- Anschluss der Spulen umpolen und den Bereich  $-10$  A bis 0 A analog vermessen und den Strom wieder auf 0 A drehen.
- Messdaten abspeichern und vor Verlassen des Unterpunkts „Magnetfeldkalibrierung“ überprüfen, ob die Datei auch wirklich angelegt wurde!

## P401.5.4 Beobachtungen mit der Kamera

### Umbau und Justierung der Apparatur

- Die Hall-Sonde wieder entfernen und die Cadmiumlampe, wie in P401.5.1 beschrieben, wieder *vorsichtig* einsetzen.
- Das Okular nun gegen die USB-Kamera (IDS U3-3800CP-C-HQ) tauschen. Beobachtung der Ringe mit der USB-Kamera:
  - Querschnitte und Ringe sind mittig im Messfenster zu zentrieren, sodass das 1-dimensionale Profil der Intensitäten symmetrisch ist.
  - Die Kalibrierung der Kamera ist so zu wählen, dass die Peaks mind. 50% des Messbereichs erreichen, aber nicht abgeschnitten werden.
  - Eine gleichmäßige Ausleuchtung der Kamera muss für die Messung gewährleistet sein und kann durch Verschieben der Kondensorlinse erreicht werden.

### Messung - Transversale Konfiguration

- Zunächst wird das Interferenzmuster ohne Magnetfeld beobachtet und eine Messung gespeichert.
- Dann wird der Magnetstrom langsam erhöht, bis die aufgespaltenen Ringe deutlich voneinander getrennt sind. So kann ein sinnvoller Messbereich ermittelt werden. Die Messung mit den aufgespaltenen Ringen wird gespeichert.
- Eventuell Belichtungszeit anpassen, da das Magnetfeld die Intensität der Cadmium Lampe beeinflusst.
- Zur Unterscheidung von  $\pi$ - und  $\sigma$ -Komponenten den Polarisationsfilter vor das Etalon stellen.
  - Den Filter drehen, bis die  $\pi$ - bzw. die  $\sigma$ -Komponente verschwindet.
  - Die Winkel des Filters und ein Bild der jeweils zugehörigen Beobachtung speichern.
- 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.
- In einem sinnvollen Messbereich wird nun die Aufspaltung für verschiedene Magnetströme gemessen.
  - Es sind mindestens zehn Messungen mit verschiedenen Strömen durchzuführen.
  - Da sich die Spulen mit der Zeit erhitzen, sollte die Messung nicht zu lange dauern.

## Messung - Longitudinale Konfiguration

- Hierzu den kompletten Aufbau der Cadmiumlampe mit Polschuhen auf dem Reiterfuß mit Gewinde um  $90^\circ$  drehen.
- Zunächst das Interferenzmuster ohne Magnetfeld beobachten und eine Messung aufnehmen.
- Magnetstrom langsam erhöhen, bis die aufgespaltenen Ringe deutlich voneinander getrennt sind und eine Messung speichern.
- Zur Unterscheidung zwischen  $\sigma^+$ - und  $\sigma^-$ -Komponente vor das Etalon zusätzlich zum Polarisationsfilter eine Viertel-Wellenlängen-Platte stellen und letztere auf  $0^\circ$  drehen.
  - Den Filter nun drehen, bis jeweils eine der beiden Dublettkomponenten verschwindet.
  - Die Winkel des Filters und ein Bild der jeweils zugehörigen Beobachtung speichern.
- Den Filter und die Viertel-Wellenlängen-Platte wieder aus dem Strahlengang entfernen.
- Nun wird der Strom so eingestellt, dass die aufgespaltenen Linien gerade unterschieden werden können. Wiederum ist der Magnetstrom zu notieren.

## Zweite Magnetfeldkalibrierung

Abschließend ist noch eine zweite Magnetfeldkalibrierung durchzuführen, wie in P401.5.3 beschrieben. Diese zusätzliche Kalibrierung hilft bei der Abschätzung von thermischen Effekten auf das Magnetfeld.

## P401.5.5 Auswertung

### Beobachtung des Zeeman-Effektes

- Es sind die in P401.5.2 beobachteten Interferenzmuster zu erklären.
- Die Polarisation der einzelnen Linien ist zu diskutieren.

### Messung des Zeeman-Effektes

- Die Unsicherheit der Position der Lampe auf die Angabe des Magnetfeldes ist abzuschätzen.
- Zur Kalibrierung des Magnetfeldes ist eine geeignete Funktion an die aufgenommenen Daten anzupassen, die die Sättigung der Messkurve berücksichtigt. Beide aufgezeichneten Messkurven sind zu benutzen und die Unterschiede sind zu diskutieren.
- Die Polarisation der Linien ist anhand der aufgenommenen Bilder und der dazugehörigen Einstellungen der Polarisationsfilter zu visualisieren.



- Für jede Messung der Aufspaltung mit verschiedenen Magnetströmen sind für die  $\pi$ - und  $\sigma$ -Peaks einer Seite eines inneren Rings die Peakschwerpunkte zu bestimmen. Hierzu werden Gauß-Funktionen – eine Überlagerung dreier Gauß-Kurven ist sinnvoll – an die Peaks angepasst. (Umrechnung der Position der Peakschwerpunkte in Winkel nicht vergessen!)
- Die Energieverschiebung  $\Delta E$  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  $\Delta E$  ist als Funktion der magnetischen Flussdichte  $B$  aufzutragen. Daraus ist das Bohrsche Magneton  $\mu_B$  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 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 Kamera aufgenommenen Linie zu vergleichen.
- Es ist ein gegebenenfalls vorhandener Unterschied zwischen theoretischer und gemessener Finesse zu diskutieren.

## Teil II – Franck-Hertz-Versuch

### P401.5.6 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.

### P401.5.7 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  $U_1^{\text{max}}$  erhöht. Die Messung wird mit dem „Start/Stop“-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.

- Zuerst wird der Messbereich für  $U_1$  bei der niedrigsten Gegenspannung  $U_2$  und der niedrigsten Temperatur bestimmt: Als Startwert für  $U_1$  soll eine Spannung von etwa 30 V benutzt werden, die dann in kleinen Schritten erhöht wird, bis die Messkurve kurz vor der Sättigung ist. Dieser Wert von  $U_1$  ist als maximaler Wert für die folgenden Messungen zu setzen, da so der Messbereich optimal ausgenutzt wird. Es ist darauf zu achten, dass im Messbereich jeweils mindestens 4 Maxima zu sehen sind.
- 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  $U_1^{\max} = 60 \text{ V}$  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.

## P401.5.8 Auswertung

- Aus den Anodenstromkurven  $I_A$  ist die Energiedifferenz  $\Delta E$  zwischen dem 6S- und dem 6P-Niveau des Hg-Atoms zu bestimmen. Hierbei ist auch die Breite der Kurven zu bestimmen.
- Die bestimmte Energiedifferenz  $\Delta E$  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

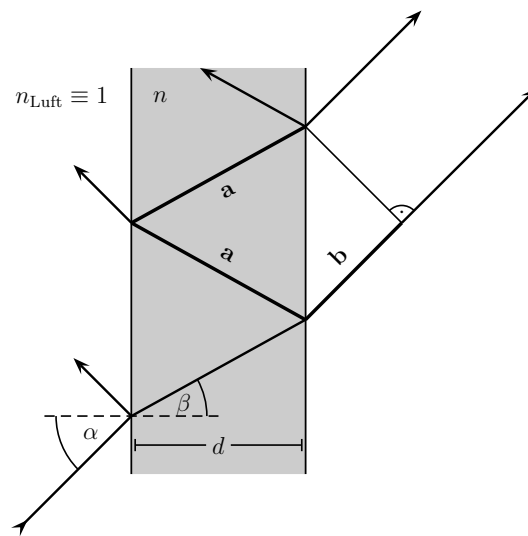


Abbildung P401.2: Strahlengang im Fabry-Pérot-Etalon.

Viel Erfolg bei der Durchführung!

Stand: 10/2025

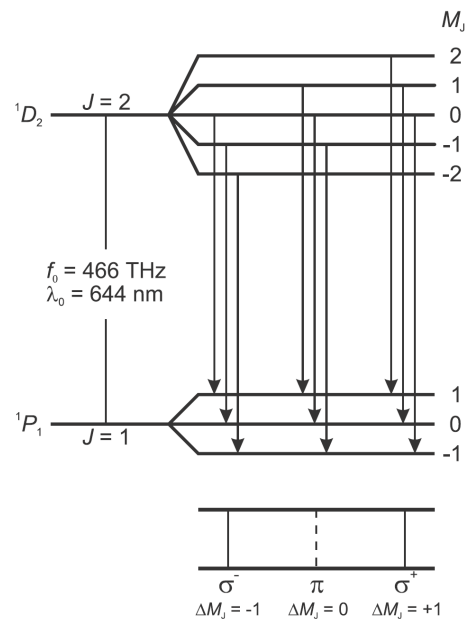


Abbildung P401.3: Niveaufspaltung und Übergänge beim normalen Zeeman-Effekt an Cadmium (LD Handblätter Physik).

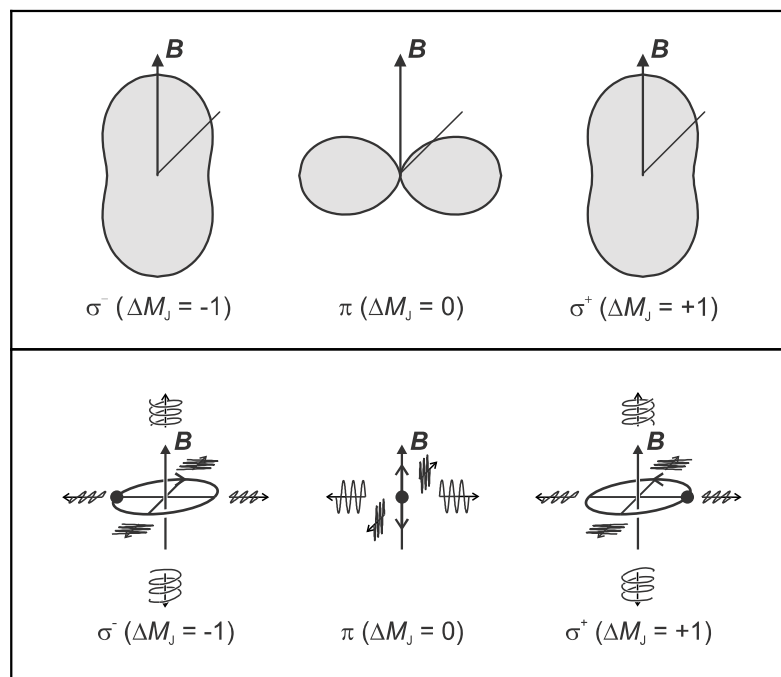


Abbildung P401.4: Abstrahlungsrichtungen (oben) und Polarisationsverteilung (unten) der elektrischen Dipolübergänge für  $\Delta M_J = 0, \pm 1$  (LD Handblätter Physik).

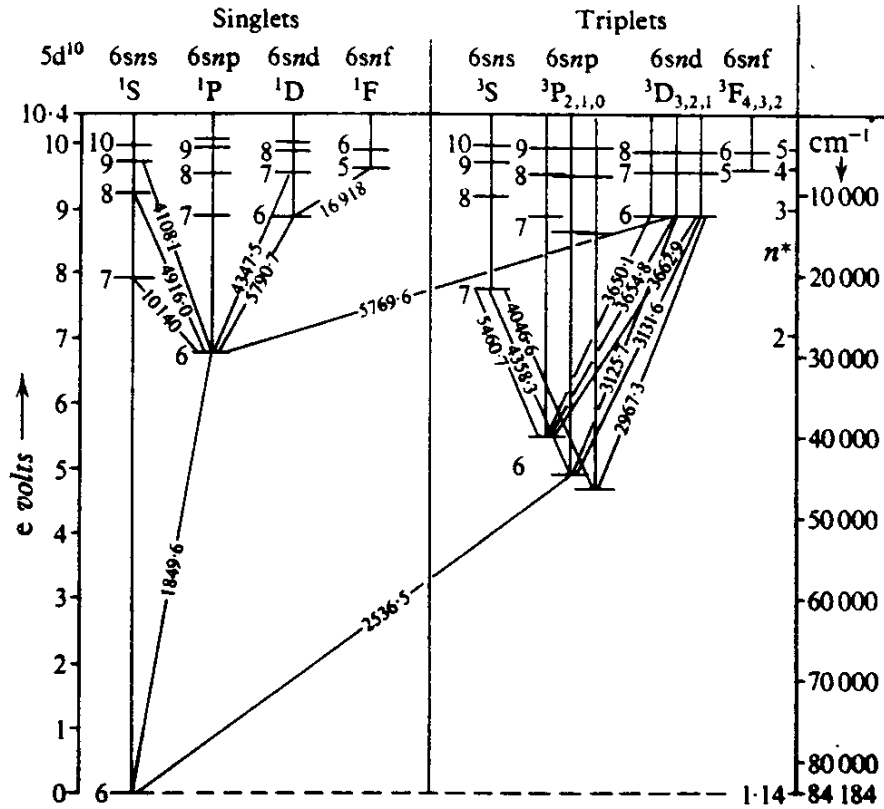


FIG. III, 28. Term diagram of Hg.

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

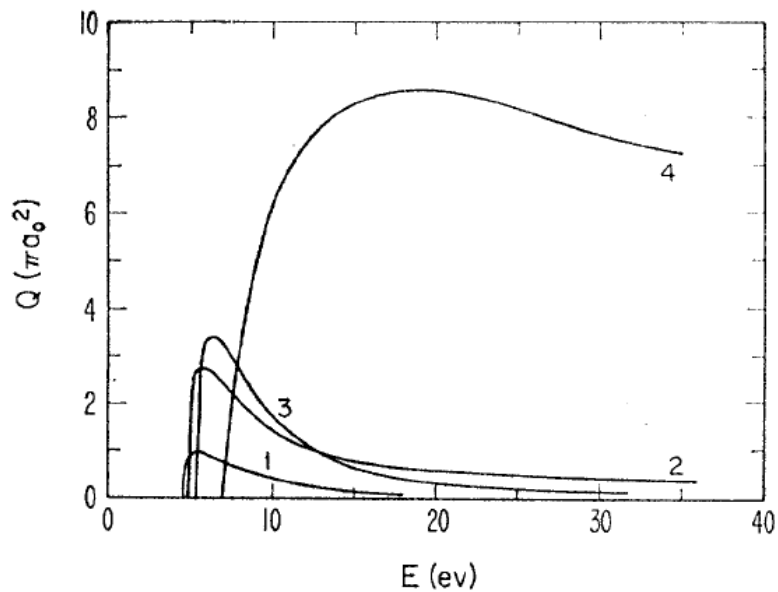


Abbildung P401.6: Totaler Wirkungsquerschnitt  $Q(\pi a_0^2)$  von Hg für Elektronenstoßanregung.  
 1:  $6^1S_0 \rightarrow 6^3P_0$ ;    2:  $6^1S_0 \rightarrow 6^3P_1$ ;    3:  $6^1S_0 \rightarrow 6^3P_2$ ;    4:  $6^1S_0 \rightarrow 6^1P_1$ .  
 (Moiseiwitsch, „Electron Impact Excitation of Atoms“,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