

V27 - Zeeman Effekt

Ziel des Versuchs

In diesem Versuch soll der Zeeman-Effekt kennengelernt werden. Dabei wird die Aufspaltung und Polarisation von Spektrallinien von Atomen, welche dem Einfluss eines Magnetfeldes unterworfen sind, untersucht. Mit Hilfe der Lummer-Gehrcke-Platte werden spektroskopische Messungen mit sehr hoher Auflösung durchgeführt. Dabei werden die Größe und die Vielfalt der Aufspaltung der Spektrallinien im Magnetfeld für die rote und blaue Linie von Cd-Atomen gemessen und die quantitative Beschreibung des Zeeman-Effekts für die entsprechenden optischen Übergänge gemacht.

Vorbereitung

Für die erfolgreiche Bearbeitung des Versuchs ist eine Einarbeitung in die elementaren Grundlagen der Atomphysik nötig. Dies umfasst drei Hauptthemen: Energiespektrum des Atoms, optisch erlaubte Übergänge und ihre Polarisation, sowie Wechselwirkung mit dem Magnetfeld. Die Grundlagen zum Energiespektrum und zur Spinstruktur finden Sie in den Referenzen [1] (Kapitel 12) oder [2] (Abschnitte 5.5.3 und 6.5). Der Zeeman-Effekt ist in den Referenzen [1] (Kapitel 13.3 und 14.3) oder [2] (Abschnitte 5.2 und 5.5.4) beschrieben. Spezifisch zu den Auswahlregeln für die optischen Übergänge können Sie sich in den Referenzen [1] (Abschnitt 16.1.3) oder [2] (Kapitel 7.2) einlesen. Die umfassende Beschreibung der Lummer-Gehrcke-Platte finden Sie in Referenz [3] (Abschnitt 7.6.5, Seiten 380 – 386).

Nach Einarbeitung in die Literatur sollten Sie folgende Leitfragen beantworten können:

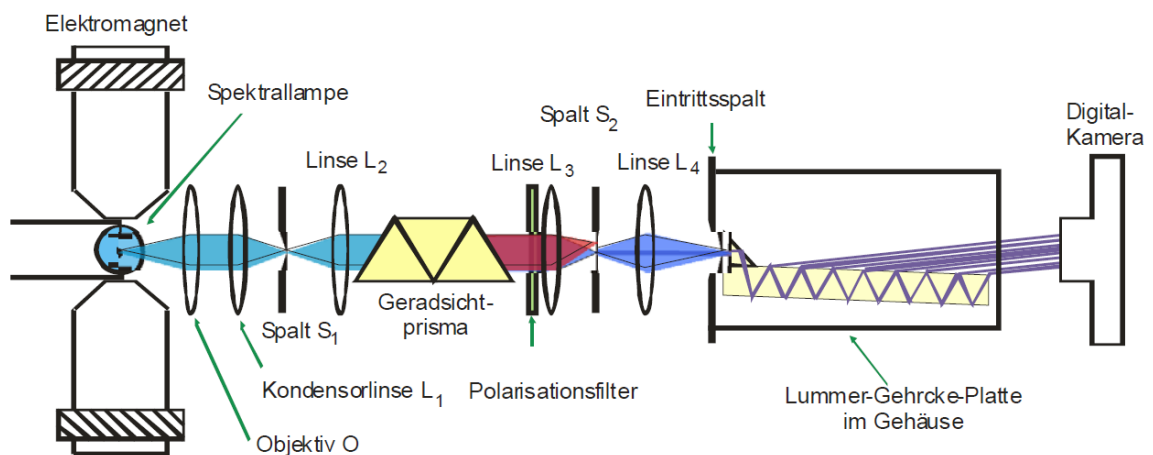
1. Energiestruktur des Atoms: Welche Quantenzahlen definieren den Zustand des Elektrons im Wasserstoffatom? Was ist die Feinstruktur (Spin-Bahn-Kopplung)? Beschreiben Sie die Elektronenkonfigurationen und Drehimpulskopplungen in Mehrelektronenatomen (LS-Kopplung und jj-Kopplung).
2. Magnetisches Moment des Atoms: Wie ist der Zusammenhang zwischen dem magnetischen Moment eines Elektrons und seinen Drehimpulsquantenzahlen? Was ist der Unterschied zwischen dem gyromagnetischen Verhältnis für den Elektronenspin und demjenigen für den Drehimpuls?
3. Aufspaltung des Energieniveaus eines Atoms im homogenen Magnetfeld: Landé-Faktor. In wie viele Niveaus spaltet sich der Zustand mit Gesamtdrehimpuls J ? Wie ändert sich die Aufspaltung mit der Magnetfeldstärke? Was versteht man unter dem Paschen-Back-Effekt?
4. Optische Übergänge zwischen Zeemanaufgespaltenen Energieniveaus: Zwischen welchen Zuständen sind die optischen Übergänge erlaubt? Wie viele Spektrallinien beobachtet man im normalen und anormalen Zeeman-Effekt? Wie sind die Spektrallinien polarisiert? Beachten Sie dabei die geometrischen Verhältnisse des Experiments, d.h. wie ändert sich das Spektrum und die Polarisation der Linien bei der Beobachtung entlang der Magnetfeldrichtung (longitudinale Geometrie) oder senkrecht zur Magnetfeldrichtung (transversale Geometrie)?
5. Optische Übergänge in Cd Atomen: Stellen Sie das Termschema für die rote ($^1P_1 \leftrightarrow ^1D_2$) und blaue ($^3S_1 \leftrightarrow ^3P_1$) Linie der Cd-Lampe auf. Berechnen Sie die Landé-Faktoren g_i und die Aufspaltung ΔE der Zeeman-Linien. Zeichnen Sie die erwarteten Spektren. Wie viele Linien erwarten Sie im Magnetfeld? Ordnen Sie den beobachtbaren Linien ihre Polarisation zu.
6. Dispersionsgebiet und spektrale Auflösung der Messapparatur: Berechnen Sie für $\lambda = 643.8 \text{ nm}$ und $\lambda = 480 \text{ nm}$ das Dispersionsgebiet $\Delta\lambda_D$ und das Auflösungsvermögen A der Lummer-Gehrcke-Platte ($d = 4 \text{ mm}$, $L = 120 \text{ mm}$, $n(@644 \text{ nm}) = 1.4567$, $n(@480 \text{ nm}) = 1.4635$).
7. Optimale Einstellung der Magnetfeldstärke: Die Messung ist nur sinnvoll für die Aufspaltungen innerhalb des Dispersionsgebiets $\Delta\lambda_D$. Das bedeutet, dass es eine Begrenzung für die Magnetfeldstärke gibt. Bestimmen Sie die Bedingung für die optimale Aufspaltung $\Delta\lambda$. Daraus

schätzen Sie die entsprechende optimale Magnetfeldstärke für jede spektrale Linie, die Sie anschließend messen sollen.

Versuchsaufbau

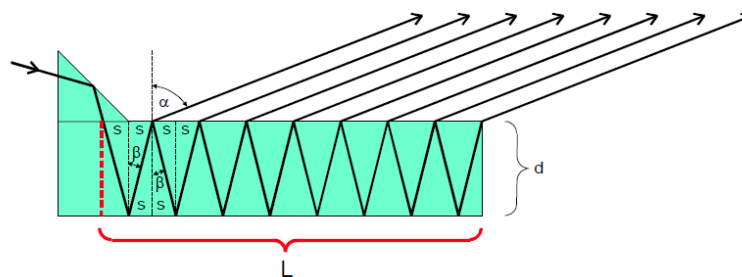
Der normale und der anomale Zeeman-Effekt sollen mit der roten (normaler) und der blauen (anomaler) Linie einer Cd-Lampe beobachtet und ausgewertet werden. Hierzu wird eine Cd-Lampe zwischen die Polschuhe eines Elektromagneten gebracht. Transversal zum Magnetfeld werden die Emissionslinien der Cd-Lampe kollimiert und von einem Gradsichtprisma nach ihrer Wellenlänge separiert. Anschließend wird der zu untersuchende Übergang durch einen Polarisationsfilter und einen Spalt nach Wellenlänge und Polarisationsrichtung ausgewählt und auf die Eintrittsfläche einer Lummer-Gehrcke-Platte abgebildet. Das von der Lummer-Gehrcke-Platte erzeugte Interferenzmuster wird mit einer Digitalkamera aufgenommen.

Abbildung 1: Schematischer Aufbau der Messapparatur.



Die Lummer-Gehrcke-Platte benutzt die Interferenz an planparallelen Platten, um ein hohes Auflösungsvermögen ($\sim 10^5$) zu erzielen. Über ein Prisma wird das parallel einfallende Licht innerhalb der planparallelen Platte reflektiert. Bei jeder Reflektion tritt ein geringer Teil der Strahlung aus dem Glas aus und kann mit einem anderen Strahlenbündel interferieren, wobei die Bedingung für konstruktive Interferenz

Abbildung 2: Strahlengang in der Lummer-Gehrcke-Platte.



$$2nd\cos(\beta) = m\lambda$$

durch die Dicke d der Platte und die eingestrahlte Wellenlänge λ bestimmt wird. Dabei ist $n=\sin(\alpha)/\sin(\beta)$ der Brechungsindex der Platte und m ist die Ordnungszahl der Interferenz. Bei monochromatischem Licht erzeugt die Lummer-Gehrcke Platte Interferenzstreifen, deren Gangunterschied genau die eingestrahlte Wellenlänge λ ist. Bei eingeschaltetem Magnetfeld verändert sich die Wellenlänge um $\delta\lambda$ und damit verschieben sich die Interferenzstreifen um δs .

Für einen großen Austrittswinkel ($\sin\alpha \approx 1$) ist der Spektralbereich $\Delta\lambda_D$ (genannt Dispersionsgebiet), wo die Messung möglich ist, durch den folgenden Ausdruck gegeben

$$\Delta\lambda_D = \frac{\lambda^2}{2d} \frac{1}{\sqrt{n^2 - 1}}.$$

Damit unterschiedliche Ordnungen sich nicht überlagern, dürfen zwei aufgespaltene Wellenlängen maximal eine Wellenlängendifferenz $\Delta\lambda_D$ besitzen.

Das Auflösungsvermögen A der Lummer-Gehrcke-Platte hängt von ihrer Länge L , dem Brechungsindex n und der Wellenlänge des verwendeten Lichtes ab

$$A = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{L}{\lambda} (n^2 - 1).$$

Aufgaben

- Eichen Sie den Elektromagneten. Messen Sie hierzu das B-Feld in Abhängigkeit vom Feldstrom.
- Messen Sie die Wellenlängenaufspaltung für verschiedene Ordnungen der roten ($\lambda = 643,8 \text{ nm}$) und der blauen ($\lambda = 480,0 \text{ nm}$) Spektrallinie des Cd-Spektrums für ein geeignetes Magnetfeld B . Für die blaue Linie nehmen Sie die Zeeman-Aufspaltung sowohl für die π - als auch die σ -Linie auf.
- Berechnen Sie aus $\Delta\lambda$ und B die Landé-Faktoren $g_{ij} = |g_j \pm g_i|$, wobei g_i und g_j die Landé-Faktoren im Grund- und angeregten Zustand sind. Vergleichen Sie diese Werte mit den berechneten Ergebnissen.

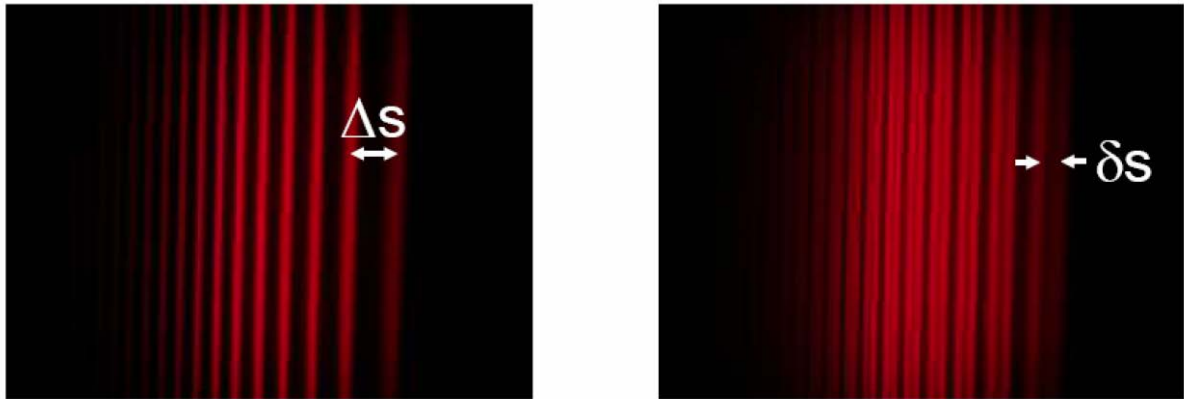
Messprogramm

Das Experiment wird gemäß Abb. 1 aufgebaut, dabei darf das Gradsichtprisma und die Lummer-Gehrcke-Platte nicht aus ihrer Halterung genommen werden. Gehen Sie wie folgt vor:

- Bilden Sie die Cd-Lampe mit einem Objektiv und einer Linse (L_1) scharf auf den Spalt S_1 ab.
- Justieren Sie die Linse L_2 so ein, dass ein möglichst paralleles Lichtbündel auf das Gradsichtprisma (GP) fällt. Um Strahlungsverluste zu vermeiden, darf der Durchmesser des Lichtbündels nicht größer als das Prisma sein.
- Mit der Linse L_3 wird ein scharfes Bild auf den Spalt S_2 abgebildet. Mit diesem kann jetzt eine Wellenlänge aus dem Spektrum der Cd-Lampe gewählt werden. Tipp: Fangen Sie mit der roten Cd-Linie an.
- Mit der Linse L_4 müssen Sie ein scharfes Bild auf die Lummer-Gehrcke-Platte (LG) abbilden. Achten Sie darauf, dass das Bild die Größe des Eintritts-Prismas an der LG-Platte hat.
- Stellen Sie nun den Polarisator in den Strahlengang. Je nach Stellung des Polarisators wird der Übergang $\Delta m = \pm 1, 0$ ausgeblendet.
- Vergewissern Sie sich durch einen Blick durch die LG-Platte, dass Sie durch Einschalten des B-Feldes eine Aufspaltung der Zeeman-Linien erkennen (Abb.3).
- Stellen Sie die Digital-Kamera ans Ende des Strahlenganges, und nehmen Sie die Aufspaltung der Spektrallinie für ein geeignetes B-Feld auf. Die Bilder können als *.jpg ausgelesen werden. Tipp: Nehmen Sie mehrere Bilder mit unterschiedlicher Belichtungszeit auf.
- Verfahren Sie mit der blauen Linie der Cd-Lampe analog. Hierzu ist eine neue Justierung ab 3. nötig.

9. Nehmen Sie hier die Zeeman-Aufspaltung sowohl für die π - als auch die σ -Linie auf. Dabei müssen Sie die Magnetfeldstärke dem geeigneten Wert anpassen (siehe P.7 in den Vorbereitungsfragen).

Abbildung 3. Interferenzspektrum ohne und mit Magnetfeld für die rote Linie.



Es wird darauf hingewiesen, dass man den Feldstrom des Elektromagneten niemals abrupt abschalten darf, sondern ihn langsam herunterregeln muss, da sonst durch die dabei auftretenden hohen Induktionsspannungen die Steuerelektronik zerstört wird.

Auswertung

Bestimmen Sie die Aufspaltung $\delta\lambda$ aus den Interferenzspektren für mehrere Ordnungen m aus der Verschiebung δs (siehe Abb. 3). Die Aufspaltung

$$\delta\lambda = \frac{1}{2} \frac{\delta s}{\Delta s} \Delta\lambda_D$$

in der Wellenlänge entspricht dabei einer Verschiebung der Frequenz. Wiederholen Sie dieses für mindestens 10-12 Ordnungen und mitteln Sie über die erhaltenen Werte¹. Berechnen Sie aus der Zeeman-Aufspaltung den Lande-Faktor g_{ij} und vergleichen Sie ihn mit der Theorie. Beachten Sie, dass die Photonenergie ΔE nicht linear mit λ geht. Bilden Sie hierzu die Ableitung $\frac{\partial E}{\partial \lambda}$ und setzen diese ein.

Literatur

[1] H. Haken und H.C. Wolf, Atom- und Quantenphysik, Springer Berlin 1983.

[2] Wolfgang Demtröder, Experimentalphysik 3, Atome, Moleküle und Festkörper, 5 Auflage, Springer Berlin 2016.

[3] M. Born and E. Wolff: Principles of Optics, 7th Edition, Cambridge University Press, 1999.

¹ : Sie werden bemerken, dass $\delta\lambda$ nicht linear mit der Ordnung m geht