

# Übungen zur Vorlesung Mod. Experimentalphysik I

KIT, Sommersemester 2024

Prof. Dr. T. Müller, Dr. D. Hinz



---

Vorlesungen	Di 9:45 + Do 11:30, Gerthsen-Hörsaal 30.21
Übungen	Mo 8:00, 9:45, 11:30 (Anmeldung im Ilias)
Sprechstunde	Dr. Hinz: nach Vereinbarung (dominic.hinz@kit.edu)
Ilias	s.kit.edu/ex4ss24

---

## Übungsblatt 7 – Bearbeitung bis 17.06.2024

### (21) Lamb-Verschiebung

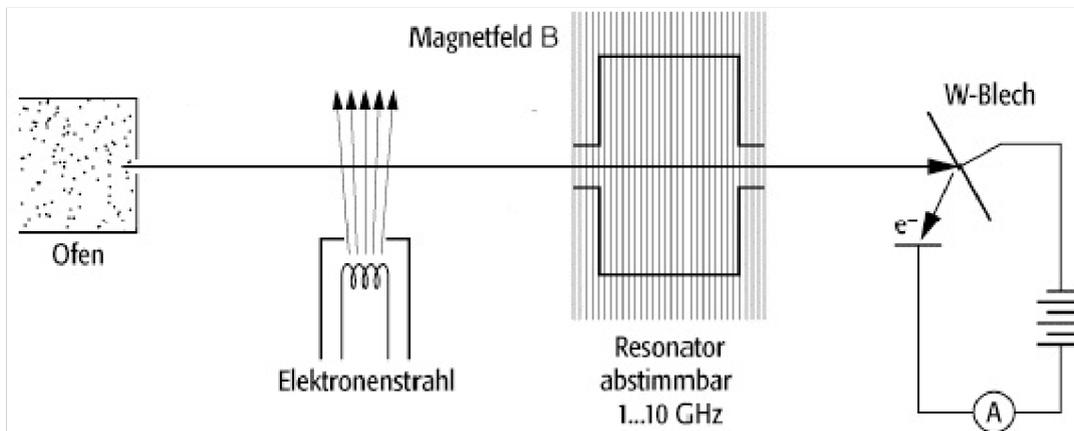
In der Vorlesung wurde das recht aufwendige Experiment von Lamb und Retherford vorgestellt.

- (a) Die Lamb-Verschiebung sollte sich auch mit optischer Spektroskopie messen lassen. In Aufgabe 12 haben wir die Balmer- $\alpha$ -Linie kennengelernt (d.h. der Übergang von  $n = 3$  auf  $n = 2$ ). In Bohrs Theorie entsprach dem genau ein Übergang. Nun wissen wir, dass es in der quantenmechanischen Beschreibung mehr als einen Zustand für  $n = 3$  und  $n = 2$  gibt. Die Entartung wird durch die Spin-Bahnkopplung und die relativistischen Effekte aufgehoben. Die Balmer- $\alpha$ -Linie besteht daher aus ganzen sieben einzelnen Übergängen, die die Auswahlregeln für optische Übergänge beachten. Geben Sie die Übergänge an in spektroskopischer Notation.
- (b) Wenn man nun mit beliebig hoher Auflösung messen würde, wie viele Linien könnte man dann beobachten?
- (c) In Aufgabe 9 haben wir zwei Effekte kennengelernt, die zu einer Verbreiterung der Linie führen (Lebensdauererweiterung und Stoßverbreiterung). Darüber hinaus ist eine der wichtigsten Linienverbreiterungen in der Spektroskopie die sogenannte Dopplerverbreiterung. Dabei ist zu beachten, dass sich das emittierende oder absorbierende Teilchen relativ zum Spektrographen (Emission) oder zur Lichtquelle (Absorption) bewegt und dadurch die beobachtete Frequenz blau(+) oder rot(-) verschoben wird:  $\nu = \nu_0 \cdot (1 \pm \frac{v}{c})$ . Da die Geschwindigkeit der Teilchen einer thermischen Verteilung folgt, ergibt sich eine Linienverbreiterung von

$$\Delta\nu = \frac{2\nu_0}{c} \sqrt{\frac{2k_B T \ln 2}{m}}$$

Wie groß ist die Dopplerverbreiterung bei Raumtemperatur? Vergleichen Sie diese Breite mit den Unterschieden zwischen dem Übergang  $3^2p_{3/2} \rightarrow ?$  und dem Übergang  $3^2d_{3/2} \rightarrow ?$  (größter Unterschied), bzw. dem Übergang  $3^2d_{5/2} \rightarrow ?$  und dem Übergang  $3^2d_{3/2} \rightarrow ?$  (kleinster Unterschied). Was bedeutet dies für die Messung?

- (d) Durch Kühlung der Wasserstoffentladung (z.B. durch flüssigen Stickstoff) kann die Dopplerbreite geringfügig verringert werden. R. Williams hatte so ein Experiment 1938 durchgeführt und gemessen, dass der  $3^2d_{3/2} \rightarrow ?$  und sein laut Dirac-Theorie entarteter Zustand  $3^2p_{3/2} \rightarrow ?$  nicht



**Abbildung 1:** Aufbau des Experiments von Lamb und Retherford.

übereinstimmen. Im Jahr 1947 führten dann W. E. Lamb und R. C. Retherford ihr berühmtes Experiment durch, mit dem sich dieser Effekt nochmals genau quantifizieren lässt. Beschreiben Sie die Funktion der einzelnen Elemente in Abbildung 1 und fügen Sie ein, wo welche Zustände des Wasserstoffs angetroffen werden und begründen Sie weshalb.

- Warum fallen die  $2^2s_{1/2}$ -Atome nicht wieder nach kurzer Zeit ( $\approx 10^{-8}$  s) in den Grundzustand  $1^2s_{1/2}$  zurück? Warum tun dies aber die  $2^2p_{3/2}$  und die  $2^2p_{1/2}$ -Zustände?
- Der Unterschied zwischen  $2^2s_{1/2}$  und  $2^2p_{1/2}$  wurde durch Lamb und Retherford auf ungefähr 1 GHz gemessen. Vergleichen Sie dies mit der Dopplerverbreiterung bei der Balmer-Spektroskopie. Warum ist die Dopplerverbreiterung hier kein Problem gewesen?
- Was bedingt nun diesen sogenannten Lamb-Shift?

## (22) Kernspin-Resonanz

Ein Wassertropfen befindet sich in einem Magnetfeld von  $B_0 = 2.5$  T. Nun wird über eine Spule zusätzlich ein alternierendes elektromagnetisches Wechselfeld eingekoppelt. Die Frequenz wird so eingestellt, dass sie mit der maximalen Spinumklapprate der im Wasser befindlichen Protonen übereinstimmt.

- Berechnen Sie die dazu notwendige Frequenz. Das Magnetfeld ist parallel zur  $z$ -Achse angelegt und das magnetische Dipolmoment eines Protons in Richtung dieses Magnetfeldes beträgt  $\mu_z = 1.4 \cdot 10^{-26} \text{ J/T}$ .
- Vergleichen Sie diese Frequenz mit typischen Frequenzen bei ESR Experimenten, die in der Vorlesung vorgestellt wurden. Woher kommt der Unterschied?
- Das NMR Signal hat in der Regel ein schlechtes Signal-zu-Rausch-Verhältnis, da es sich hierbei nur um einen kleinen Effekt handelt. Erklären Sie weshalb das Signal-zu-Rausch-Verhältnis durch folgende Maßnahmen verbessert werden kann:
  - Signal-Akkumulation durch mehrfache Messung einer Probe und Addition aller Spektren

- Erhöhung der Magnetfeldstärke  $B_0$
- Senkung der Temperatur der Probe

### (23) Zeemann Effekt

Beim Zeemann-Effekt kommt es zu einer Wechselwirkung des magnetischen Moment des Atoms  $\vec{\mu}$  mit einem externen Magnetfeld  $B$ .

- (a) In der Vorlesung wurde von „normalem“ und „anomalem“ Zeemann Effekt gesprochen. Was ist hierbei der Unterschied und welcher von beiden ist eigentlich nur ein Spezialfall des Anderen?
- (b) Mittels des Zeemann-Effekts lässt sich das Magnetfeld der Sonne messen, ohne direkt vor Ort zu sein. In einem Sonnenfleck misst man einen Übergang des Elements Eisen (reiner Bahndrehimpuls), der sich in drei Komponenten aufspaltet. (z.B. einen Übergang mit  $n + 1 \rightarrow n$  und  $l + 1 \rightarrow l$ ).
- In wie viele Energieniveaus spaltet ein Zustand  $l$  in diesem Fall auf?
  - Erklären, sie energetisch, wieso sich der Zustand, der ohne Magnetfeld entartet ist, nun im Magnetfeld aufspaltet. Nutzen Sie bei der Erklärung das Bild eines magnetischen Dipol im Magnetfeld.
  - Warum werden nur drei Linien gemessen?
  - Die Aufspaltung zwischen benachbarten Linien beträgt 0.1 pm und die zentrale Wellenlänge beträgt 350 nm. Wie stark ist das Magnetfeld an dem Sonnenfleck?
- (c) In wie viele Linien würde sich eine der Balmer- $\alpha$  Linien ( $3p_{3/2} \rightarrow 2s_{1/2}$ ) aufspalten?

### (\*) Punkteverteilung

Aufgabe	Teilaufgabe	Punkte
21	a, c, d	je 1,5
21	b, e, f	je 0,5
21	g	1
22	a, b, c	je 1
23	a, c	je 1
24	b	2

Bei Verständnisfragen gerne das Forum im ILIAS nutzen.