

Fortgeschrittenenpraktikum

Versuch 33: Optisch detektierte magnetische Resonanz (Optisches Pumpen)

Ort: F-Praktikum, P 047 (rechts hinten)

Mit magnetischen Resonanz-Experimenten lassen sich die Abstände elektronischer Energieniveaus von Atomen (Molekülen) mit unterschiedlicher Magnetquantenzahl m bestimmen. Dabei kann es sich sowohl um elektronische Magnetquantenzahlen (m_s, m_l) oder auch um Magnetquantenzahlen des Kernspins (m_I) handeln. Im ersten Fall spricht man von Elektronenspinresonanz (ESR) im zweiten Fall von Kernspinresonanz (NMR). In „gewöhnlichen“ magnetischen Resonanzexperimenten wird direkt die Absorption (bzw. Emission) von Quanten, die diesen Übergängen entsprechen, beobachtet. Die Energie dieser Quanten ist sehr klein: typischerweise liegt E/h für ESR-Übergänge im Bereich von einigen GHz und für NMR-Übergänge im Bereich einiger 10 MHz. Daher kann man einen Gewinn an Signal-Rauschverhältnis erzielen, wenn es gelingt, die durch die Absorption dieser kleinen Quanten erzeugte Umbesetzung zwischen magnetischen Subniveaus anhand von Absorptions- (bzw. Emissions-) Änderungen zwischen daran angekoppelten optischen Übergängen mit ihren großen Quanten ($E/h = 5 \cdot 10^{14}$ Hz) zu detektieren. Man spricht dann von optisch detektierter magnetischer Resonanz.

Im vorliegenden Versuch wird ein solches Experiment am Grundzustand von Rubidiumatomen durchgeführt. Dabei sind die Drehmomente (und damit die magnetischen Momente) von Elektron und Kern zu einem Gesamtmoment F gekoppelt. Im Magnetfeld spalten die Zustände in die $2F + 1$ Unterzustände mit unterschiedlicher Magnetquantenzahl m_F auf. Die Übergänge zwischen diesen Niveaus werden im Experiment beobachtet. Dabei erfolgt durch optisches Pumpen (Einstrahlung von Licht in den Übergang zum ersten elektronisch angeregten Zustand und anschließende spontane Emission) eine Ungleichbesetzung dieser Unterzustände. Diese wird durch die Einstrahlung von Hochfrequenz entsprechend dem Abstand von Niveaus mit m_F und m_{F-1} verändert, was unmittelbar zu einer Änderung der Absorption auf dem optischen Übergang führt.

Mess-/Arbeitsprogramm:

1. Justieren Sie den Aufbau für optimale Signalintensität an der Photodiode.
2. Überprüfen Sie, dass „die Zelle optisch pumpt“: Dazu wird ohne Hochfrequenz der Strom in den Helmholtzspulen rasch umgepolt (entspricht einem Wechsel von σ_+ zu σ_- Licht). Dabei muss kurzzeitig ein Signalausschlag zu sehen sein.
3. Führen Sie einen weiten Frequenzscan durch, um die Signale der beiden Isotope (vergl. Berechnung in den Hinweisen zur Vorbereitung) zu finden.
4. Versuchen Sie mit zwei kleinen Frequenzscans um die in 3.) gefundenen Resonanzstellen, alle möglichen Übergänge aufzulösen.

Stichwortverzeichnis:

Optisches Pumpen, Hyperfeinstrukturaufspaltung, Zeeman-Effekt (der Hyperfeinstruktur), Paschen-Back-Effekt (der Hyperfeinstruktur), Breit-Rabi-Formel, g-Faktor(en), Auswahlregeln für optische Übergänge.

Literaturangaben:

Haken, H. u. Wolf, H. C.: Atom und Quantenphysik, Springer-Verlag, 1990
(insbesondere die Kapitel 12.7 - 12.10; 13; 20.1 - 20.5) Mayer-Kuckuck, T.: Atomphysik, Teubner-Verlag, 1994 *
(insbesondere die Kapitel 6.2; 9.1 - 9.3)

für theoretisch Interessierte:

Otter, G. u. Honecker, R.: Atome-Moleküle-Kerne, Bd. I Atomphysik, Teubner-Verlag
Cohen-Tannoudji, C., Diu, B. u. Laloë, F.: Quantum Mechanics Vol. II, Wiley-Interscience

* In der Literaturliste enthalten.

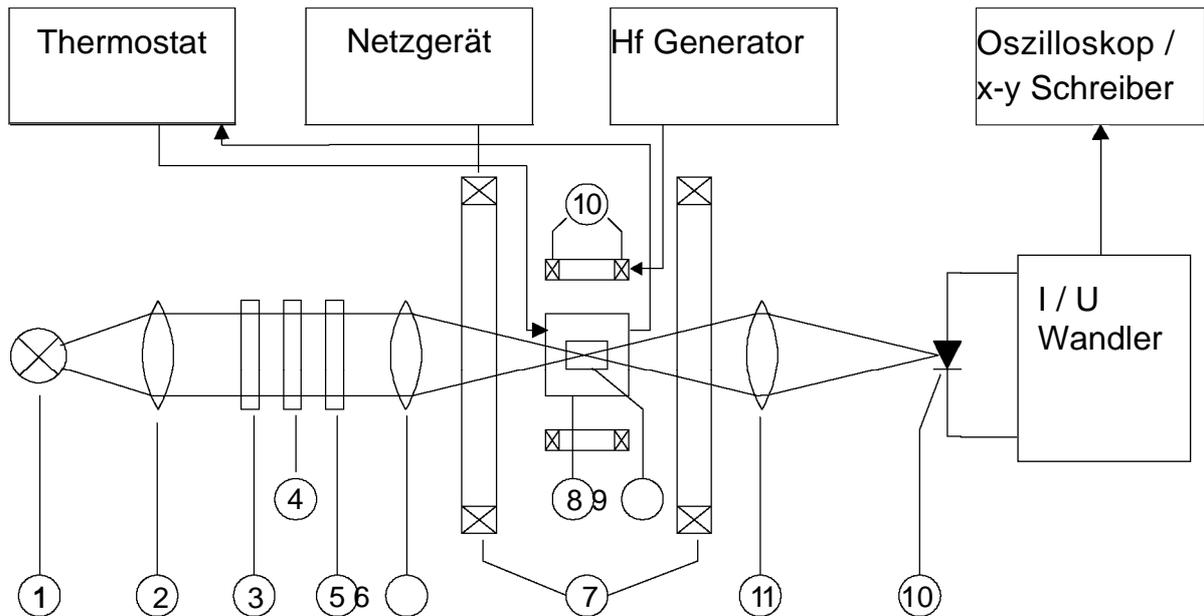
Hinweise zur Vorbereitung:

Eine sorgfältige Vorbereitung ist wichtig. Kommen Sie bei Verständnisproblemen **VOR** dem Praktikumstag zum betreuenden Assistenten.

- Die Versuchsdurchführung läuft analog dem optischen Pumpen, wie es im „Haken-Wolf“ für Natrium in Kapitel 13.5 geschildert ist.
Der optische Übergang erfolgt vom Grundzustand $^2S_{1/2}$ zum angeregten Zustand $^2P_{1/2}$ (D₁ Linie bei 794,8 nm).
Rubidium besitzt zwei Isotope: ^{85}Rb mit Kernspin $I = 5/2$ und $g_I = 0,541$
 ^{87}Rb mit Kernspin $I = 3/2$ und $g_I = 1,834$
Elektronischer Gesamtspin $j = 1/2$ und Kernspin I koppeln zu einem Gesamtspin F .
– Hyperfeinstrukturaufspaltung im Nullfeld.
- Zeichnen Sie das Termschema für ^{87}Rb ($I = 3/2$) für $^2S_{1/2}$ und $^2P_{1/2}$ als Funktion des Magnetfeldes B_0 .
 - Wählen Sie in Anlehnung an Abb. 98 bzw. 102 in „Mayer-Kuckuck“ für die x-Achse Einheiten von $\mu_B B_0 / \Delta E_0$ (ΔE_0 ist die Hyperfeinstrukturaufspaltung im Nullfeld.), x-Bereich: 0 2.
 - Dazu notwendig: Berechnung von g_J für die einzelnen Zustände sowie g_F (Näherung $\mu_K / \mu_B \approx 0$).
 - Zeichnen Sie zunächst die Grenzfälle für kleines Feld (Zeeman-Effekt) und für großes Feld (Paschen-Back-Effekt). Interpolieren Sie den Übergangsbereich (der theoretisch durch die Breit-Rabi-Formel beschrieben wird) von Hand.
- Welche optischen Übergänge zwischen den einzelnen nach m_F aufgespaltenen Niveaus von $^2S_{1/2}$ und $^2P_{1/2}$ sind bei Absorption von \perp Licht, welche bei Emission möglich? Welches Niveau wird folglich durch das optische Pumpen am meisten besetzt?

- Wieviele Hochfrequenzübergänge ($m_F = \pm 1$) mit verschiedener Energie gibt es jeweils im Zeeman-, im Paschen-Back- und im Übergangsbereich ($^2S_{1/2}$ Zustand)?
- Berechnen Sie diese Energiedifferenz im Zeeman-Bereich für $B_0 = 1 \text{ mT}$ ($^2S_{1/2}$ Zustand). (Welcher Frequenz entspricht das?) Führen Sie diese Rechnung auch für das Isotop ^{85}Rb durch.

Versuchsaufbau:



- 1 Rubidium-Hochfrequenz-Leuchte
- 2 Linse
- 3 Interferenzfilter
- 4 Linear-Polarisationsfilter
- 5 $\lambda / 4$ Plättchen
- 6 Linse
- 7 Helmholtzspule
- 8 Absorptionskammer, Wärmebad
- 9 Absorptionszelle
- 10 Hf-Spulen
- 11 Linse
- 12 Silizium-Photodetektor