

# V21 - Optisches Pumpen

## Ziel der Arbeit

Bestimmung des Kernspins der Rubidium-Isotope  $^{87}\text{Rb}$  und  $^{85}\text{Rb}$  durch die optisch induzierte nicht-thermische Besetzung unter Einwirkung der Hochfrequenz-Strahlung.

## Vorbereitung

Die Bearbeitung dieser Fragen soll Sie auf den Gespräch mit Ihrer Betreuerin / Ihrem Betreuer und die Versuchsdurchführung vorbereiten. Die benötigte Information sollen Sie in der angegebenen Literatur finden können.

1. Zur welchen Klasse der Materialien zählt das Rubidium? Welchen Wert haben die Quantenzahlen: Bahndrehimpuls ( $L$ ), Spin ( $S$ ), Gesamtdrehimpuls der Elektronenschale ( $J$ ), und Kernspin ( $I$ ) eines  $^{85}\text{Rb}$ -Atoms im Grundzustand? Welche Werte ergeben sich für Gesamtdrehimpuls des Atoms (Quantenzahl  $F$ ) im Grund- und in dem ersten angeregten Zustand (Kapitel 2 in Ref. [1])?
2. Welche Aufspaltungen entstehen durch das äußere Magnetfeld bei den  $^2\text{S}_{1/2}$  und  $^2\text{P}_{1/2}$  Niveaus? Wie sieht ein Niveauschema aus? Wovon hängt die Zeeman-Aufspaltung ( $\Delta E_Z$ ) zwischen einzelnen Niveaus ab (Kapitel 2.5.7 in Ref. [1])?
3. Welche Auswahlregeln gibt es für einen elektrischen Dipolübergang zwischen den beiden  $^2\text{S}_{1/2}$  und  $^2\text{P}_{1/2}$  Niveaus? Was bewirkt die Anregung dieser Zustände mit einem zirkular polarisierten Licht bei einem angelegten Magnetfeld? Woran liegt der Unterschied zwischen stimulierten und spontanen Emission? Wie hängt die spontane Emission von der Frequenz ab (Kapitel 1.7.3 in Ref. [1])?
4. Welcher Zustand stellt sich bei der kontinuierlichen Beleuchtung mit zirkular polarisierten Licht ein? Was bedeutet Optisches Pumpen? Wie sieht dabei der zeitliche Verlauf der Intensität des transmittierten Lichtes [2,3]?
5. Welche Auswahlregeln gibt es für magnetische Dipolübergänge? Was passiert in dem optisch gepumpten System, wenn durch die RF-Feld-Frequenz (Hochfrequenz)  $f$  gegebene Energie ( $E_{\text{RF}} = hf$ ) der Zeeman Energie ( $\Delta E_Z$ ) entspricht? Was geschieht dabei mit dem Absorptionsverhalten? Überlegen Sie wie eine Absorptionspeak-vs.-Magnetfeld Abhängigkeit aussehen soll. Wie ermittelt man dadurch den Lande-Faktor  $g_F$ ? Was passiert mit der transmittierten Lichtintensität bei null Magnetfeld?
6. Was passiert wenn man die  $E_{\text{RF}}$  gleich der  $\Delta E_Z$  wählt und dabei die RF-Feld-Amplitude variiert? Welche Beziehung erwarten Sie dort zwischen der Frequenz der Rabi-Oszillationen und der Stärke des angelegten RF-Feldes [2,3]?

## Versuchsdurchführung

Der Aufbau der Messapparatur ist in der Abb. 1 dargestellt. Das von der Lichtquelle erzeugte Licht wird kollimiert und durch ein Interferenzfilter geschickt, welches nur die  $D_1$ -Linie des Rb-Spektrums ( $\lambda = 794,8 \text{ nm}$ ) durchlässt. Anschließend wird aus dem unpolarisierten Licht mittels einer Kombination aus einem Polarisationsfilter und einer  $\lambda/4$ -Platte zirkular-polarisiertes Licht erzeugt, welches auf die Dampfzelle fällt. Diese kann durch einen kleinen Ofen geheizt werden, um einen optimalen Rb-Dampfdruck zu erzeugen. Der Ofen sollte ca.  $\frac{1}{2} \text{ h}$  vor Beginn der Messungen eingeschaltet werden. Das durch die Dampfzelle hindurchtretende Licht wird schließlich auf ein Si-Photoelement fokussiert, welches über einen Linearverstärker an einen Oszillographen angeschlossen ist. Schwankungen in der Lichtintensität führen somit zur Y-Auslenkung des Elektronenstrahls im Oszillographen.

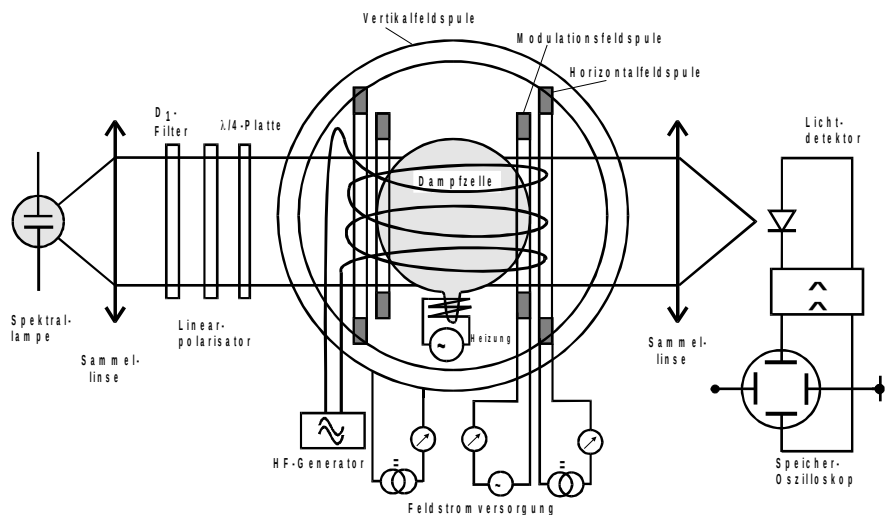


Abb. 1 Schematische Darstellung der kompletten Messapparatur (von oben gesehen)

Der Versuchsaufbau verfügt über drei Helmholtz-Spulenpaare, von denen zwei zur Erzeugung von horizontalen Feldern aufeinander aufgewickelt sind: Sweep-Spule (Modulationsfeldspule) und Horizontalfeld-Spule. Die Sweep-Spule hat einen mittleren Radius von  $R = 16.39 \text{ cm}$  und eine Windungszahl  $N$  von 11 Windungen je Spule. Bei Horizontalfeld-Spule ist  $R = 15.79 \text{ cm}$  und  $N = 154$ . Die Vertikalfeld-Spule hat  $R = 11.735 \text{ cm}$  und  $N = 20$ .

Alle drei Spulen können über das Kontrollgerät separat angesteuert werden. Das Kontrollgerät ermöglicht ein langsames Variieren des Sweep-Spulenstroms. Dafür muss ein Startwert, eine Amplitude und eine Dauer für einen Durchlauf am Gerät gewählt werden.

Der maximale Spulenstrom durch die Sweep- und Vertikalfeld-Spulen beträgt 1 A. Mit den Potentiometern kann der Strom relativ genau (1 Umdrehung = 0.1 A) variiert werden. Bei der Horizontalfeld-Spule beträgt der Maximalstrom 3 A und 1 Umdrehung am Potentiometer = 0.3 A.

Da Spulen-Feldstärken mit der des Erdfeldes vergleichbar sind, muss letztere bei den Messungen berücksichtigt werden. Insbesondere stört die Vertikalkomponente des Erdmagnetfeldes, da der Lichtstrahl horizontal verläuft.

Man muss sie daher vor Beginn der Messung durch ein vertikal verlaufendes Magnetfeld kompensieren. Zusätzlich dreht man die gesamte Messapparatur um eine vertikale Achse, bis der Lichtstrahl (bzw. die Feldrichtung des Horizontalfeldes) genau in Nord-Süd-Richtung verläuft. Damit steht die Horizontalkomponente entweder parallel oder antiparallel zum Feld der Horizontalfeldspule. Durch diese Maßnahme lässt sich der Einfluss der Horizontalkomponente des Erdfeldes in einfacher Weise bei der Auswertung der Ergebnisse berücksichtigen.

Die Resonanzstelle lässt sich nun auf folgende Weise beobachten. Bei festgehaltener RF-Frequenz kann man die Horizontalfeldstärke langsam verändern und dabei die Transmission der Dampfzelle beobachten. Zu diesem Zwecke besitzt die Apparatur ein weiteres Helmholtz-Spulenpaar, mit dem ein horizontales Modulationsfeld erzeugt werden kann, das sich dem vorhandenen Horizontalfeld überlagert, sog. Sweep-Spule. Beim Erreichen der Resonanzfeldstärke nimmt die Transmission der Dampfzelle stark ab. Das entstehende Signal kann, falls die Modulationsfrequenz  $f$  hinreichend niedrig ist, mit einem XY-Oszilloskop in Abhängigkeit von der Sweep-Feldstärke aufgezeichnet werden. Die Gestalt des Resonanzsignals hängt von den eingestellten Parametern ab. Ein typisches Beispiel ist in Abb. 2 wiedergegeben.

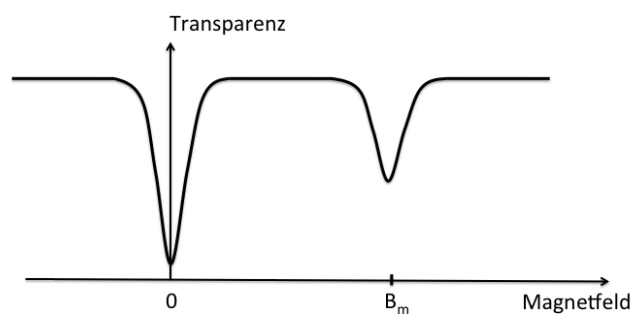


Abb. 2 Transparenz einer Alkali-Dampfzelle für rechtszirkular-polarisiertes Licht in Abhängigkeit vom Magnetfeld der Sweep-Spule bei angelegtem Hochfrequenzfeld (idealisierte Kurve).

Vor Beginn der Messungen muss die Vertikalkomponente des Erdmagnetfeldes kompensiert werden. Man schickt zu diesem Zweck bei **abgeschaltetem** RF-Feld einen Strom durch die Sweep-Spulen. Dieser Wert ist so gewählt, dass mit Sicherheit der Wert Null für  $\mathbf{B}_{\text{hor}}$  (!) zu bestimmten Zeitpunkten durchlaufen wird, wenn kein Gleichstrom durch die Horizontalfeldspulen fließt. Auch unter diesen Bedingungen ist bereits ein Absorptionssignal zu beobachten; denn bei jedem Nulldurchgang des **Gesamtfeldes** verschwindet die Zeeman-Aufspaltung. Beim erneuten Anwachsen des Feldes kann daher der Pumpvorgang wieder einsetzen, was zu der bekannten Zunahme der Transmission führt. Ist jedoch noch eine **Vertikalfeldkomponente** vorhanden, so kann das Gesamtfeld in der Dampfzelle zu keinem Zeitpunkt den Wert null erreichen und damit ein Signal zu sehen sein (auch wenn das Sweepfeld zu bestimmten Zeitpunkten die Horizontalkomponente des Erdfeldes kompensiert). Man regelt also unter den genannten Bedingungen den Feldstrom für die Vertikalspule so ein, bis ein optimales Signal (schmale Linie) zu sehen ist. Damit hat man die Vertikalkomponente des Erdfeldes kompensiert.

## Messprogramm und Auswertung

a) Man justiere den Strahlengang so ein, dass die auf den Lichtdetektor einfallende Intensität maximal ist. Dazu sind alle „Gain“-Knöpfe am Hauptblock („Gain“, „Gain Multiplier“ und „Meter Multiplier“) auf 1 zu stellen. Zeitkonstante rechts unten auf dem Hauptblock auf 100ms setzen. Danach platziert man erst nur die beiden Linsen im ungefähren Fokusabstand und justiert sie nach Signalstärke am Galvanometer. Wenn der Pfeil am Galvanometer rechts am Anschlag liegt, DC-Offset im Uhrzeigersinn drehen, bis sich der Pfeil wieder bewegt. Danach weitere optischen Elemente einsetzen und den optischen Aufbau mit der schwarzen Decke zudecken.

b) Potenziometer für die Vertikal- und Horizontal-Spule und Start-Feld für die horizontale „Sweep“-Spule sind auf Null zu drehen. „Range“ auf Maximum. Unteren Schalter für die „Sweep“-Spule auf „Continuous“ und oberen auf „Start“ setzen. Zeit für die Periode auf 2 Sekunden stellen. „Recorder“-Ausgang der Horizontal-„Sweep“-Spule an Kanal 1 und die Dioden-Spannung „Detector amplifier output“ an Kanal 2 des Oszilloskops mit BNC-Kabeln anschließen. Oszilloskop durch [Display]->[Format]->[XY] Knöpfe umstellen. Beide Kanäle sollen in DC-Kopplung eingestellt sein. Es soll ein Leuchtpunkt von „Start“ bis zum „Range“ der „Sweep“-Spule am Oszilloskop durchlaufen. Setzen Sie den „Gain“ auf 20, „Gain Multiplier“ auf x10 und „Meter multiplier“ auf x2.

Es sollte jetzt ein sehr breiter Peak zu sehen sein. Dieser soll schmaler gemacht werden, indem die Erdmagnetfelder kompensiert werden. Benutzen Sie dazu die Vertikal-Spule und die Orientierung des Tisches im Raum in horizontaler Ebene, benutzen Sie den Kompass als Richtwert.

c) Man messe die Stärke des gesamten Horizontalfeldes (Sweepfeld+Horizontalfeld) bei induzierter Emission in Abhängigkeit von der Resonanzfrequenz für beide Rb-Isotope. Die Frequenzen an der RF-Spule sollen zwischen 100 kHz und 1 MHz in Schritten von 100 kHz variiert werden. Um die RF-stimulierten Resonanzen zu sehen, schließt man einen Frequenzgenerator an den Eingang „RF Amplifier input“ an. „RF Amplifier Gain“ auf 2 stellen. Man legt eine Sinus-Spannung mit 100 kHz und einer Amplitude von  $4 V_{pp}$  an.

Um die Resonanzpositionen auszulesen, stellt man den Schalter „Start/Reset,“ auf „Reset“ und dreht den Potenziometer „Start field“ bis zur Resonanzstelle. Der Strom kann am Potentiometer abgelesen werden, 1 Umdrehung =  $0.1 V = 0.1 A$  (wegen  $R = 1 \text{ Ohm}$ ).

Bei Frequenzen höher als 200-300kHz muss man zusätzlich ein horizontales Feld anlegen („Horizontal magnetic field“), um den Sweep-Feld-Bereich auf die Resonanzen zu verschieben.

d) Man berechne aus c) die Horizontalkomponente des lokalen Erdmagnetfeldes sowie die

Landéschen  $g_F$ -Faktoren der beiden Rb-Isotope, die zu den beobachteten Übergängen gehören.

e) Man ermittle aus den errechneten  $g_F$ -Werten die Kernspins für den  $^{85}\text{Rb}$ - und den  $^{87}\text{Rb}$ -Kern.

- f) Man fertige einen Ausdruck eines typischen Signalbildes an (Abfotografieren oder mit dem Oszilloskop speichern).
- g) Man ermittle das Isotopenverhältnis aus der beobachteten Amplituden der Resonanzen bei 100 kHz. Wie stark weicht es von dem von der Natur gegebenem Verhältnis ab?
- h) Man schätze die Größe des quadratischen Zeeman-Effektes bei den hier verwendeten B-Feldern ab. (Hyperfeinstrukturaufspaltung des Grundzustandes bei  $^{87}\text{Rb}$ :  $4,53 \times 10^{-24}$  Joule,  $^{85}\text{Rb}$ :  $2,01 \times 10^{-24}$  Joule)
- i) Man stellt die Frequenz wieder auf 100 kHz ein, geht auf „Reset“ bei der „Sweep“-Spule und stellt das Magnetfeld mit Hilfe des „Start field“-Potenziometers auf die Resonanzstelle von einem Rb-Isotop. Jetzt nimmt man einen zweiten Funktionsgenerator hinzu und gibt eine Rechteckspannung mit 5 Hz und 0-5 V (TTL-Signal) auf den „Input RF Modulation“-Anschluss. Mit einem zusätzlichen BNC-Kabel legt man das Signal auf Kanal 1 des Oszilloskops. Das Oszilloskop ist in den „YT“-Modus zu stellen ([Display]->[Format]->[YT]). Die horizontale Zeitskala ist anzupassen und der Trigger auf Kanal 1 zu stellen. Die Zeitkonstante auf dem Hauptblock soll jetzt auf „min“ gestellt werden.

Die ansteigende Kurve kann aufgenommen und mit einer ansteigenden Exponentialfunktion gefittet werden. Es ist ratsam zuvor eine Mittelungsfunktion des Oszilloskops zu verwenden um die zusätzlichen Modulationen weg zu mitteln. Benutzen Sie dafür [Acquire]->[Mittelwert]. Man kann die Aufnahme mit dem Knopf [Stop] rechts oben auf dem Oszilloskop stoppen und dann speichern oder abfotografieren. Danach auf die andere Flanke der RF-Modulation umstellen (Trigger von positiv auf negativ umschalten). In die Oszillation reinzoomen. Man bestimme die Perioden der Oszillationen als Funktion der RF-Amplitude. Am besten verändert man die Amplitude mit dem Funktionsgenerator, der 100 kHz anlegt, im Bereich von 0.5 V bis 10 V mit 1 V Schritten. Die Perioden können mit Hilfe der [Cursor]-Funktion des Oszilloskops bestimmt werden. Zur Auswertung plottet man die Periode (T) gegen die RF-Amplitude (in V) auf und fittet diese mit einer Hyperbel-Funktion:  $y = a + b/(x - c)$ . Dies für beide Isotope durchführen und dann  $b_1/b_2$  berechnen. Der theoretische Wert beträgt 1.5.

## Literatur

- [1] „Quanten, Atome, Kerne, Teilchen“, W. Pfeiler, Band 5; <https://www.ub.tu-dortmund.de/katalog/titel/HT018787625>
- [2] [https://www.phas.ubc.ca/~phys409/manuals/Optical\\_Pumping-CalTech.pdf](https://www.phas.ubc.ca/~phys409/manuals/Optical_Pumping-CalTech.pdf), abgerufen am 06.12.2018
- [3] <http://www.teachspin.com/optical-pumping.html>, abgerufen am 06.12.2018