04.07.2016

Versuch V21
Optisches Pumpen

Physikalisches Fortgeschrittenenpraktikum

Robert Rauter und Björn Lindhauer
robert.rauter@tu-dortmund.de bjoern.lindhauer@tu-dortmund.de

1 Einleitung

In diesen Versuch sollen die Landéschen g-Faktoren, der Spins der Elektronenhülle und der Spin des Kerns der stabilen Rubidium-Isotope ^{85}Rb und ^{87}Rb bestimmt werden.

2 Theoretische Grundlagen

Nach dem Aufbauprinzip von Bohr besitzt jedes Atom Elektronenhüllen, welche definierte Energieniveaus besitzen. Es werden zunächst die inneren Niveaus unter der Berücksichtigung des Paul-Prinzips voll besetzt. Ist die äußerste Schale nicht voll besetzt und befindet sich das Atom im thermischen Gleichgewicht, so folgt die Besetzung der Niveaus der äußeren Schale einer Boltzmann-Verteilung gemäß der statistischen Physik. Es lässt sich somit das Besetzungsverhältnis zweier Zustände mit den Energien W_1 und W_2 durch

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2}{g_1} \frac{\exp\left(-\beta W_2\right)}{\exp\left(-\beta W_2\right)} \tag{1}$$

bestimmen. Die g_i sind dabei statistische Gewichte, die die Zahl der Niveaus mit Energie W_i angibt.

2.1 Ziel des Optisches Pumpen

Durch ein Verfahren, welches optische Pumpen genannt wird, werden Abweichungen vom Besetzungsverhältnis 1 erzeugt. Diese nicht-thermische Besetzung geht mit der Zeit zurück in das thermische Gleichgewicht, welches durch 1 gegeben ist. Dabei werden Quanten mit einer Energie

$$h\nu = W_2 - W_1 \tag{2}$$

emittiert oder absorbiert.
Diese Energie kann mit hoher Präzision ausgemessen werden, auch wenn die Energie der Quanten kleiner als die dominierende Energieskala $h\nu \ll k_\mathrm{B}T$ ist. Dies ist beispielsweise bei Niveauunterschiede durch Hyperfeinstrukturaufspaltung oder bei Zeeman-Aufspaltung durch ein Magnetfeld gegeben.
Aus dieser Größe lässt sich sowohl der Landéschen g-Faktoren als auch der Spin der Elektronenhülle und des Kerns berechnen.
Im folgenden

2.2 Drehimpuls und magnetisches Moment

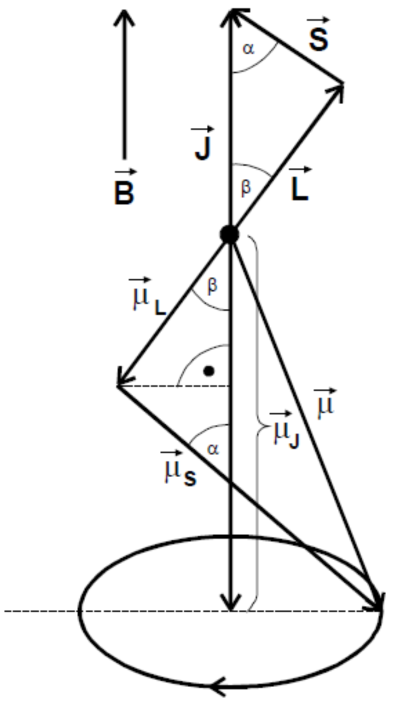

Abb. 1: Veranschaulichung der Zusammenhänge zwischen Drehimpulsen und magn. Momenten [1]

Der Gesamtdrehimpuls $\vec{J}$ der Elektronenhülle ist mit einem magnetischen Moment $\vec{\mu}_J$ gekoppelt. Der Zusammenhang ist durch

$$\vec{\mu}_J = -g_J \mu_B \vec{J} \tag{3}$$

gegeben. Es ist dabei μ_B das Bohrsche Magneton und g_J der Landé-Faktor.
Da $\vec{\mu}_J$ um die $\vec{J}$-Achse präzediert, sind nur die Komponenten $\vec{\mu}_J \parallel \vec{J}$ relevant, da die senkrechte Komponente sich heraus mittelt. Die Zusammenhänge zwischen den Drehimpulsen werden in Abbildung 1 veranschaulicht. Es lässt sich für den Landé-Faktor g_J der Ausdruck

$$g_J = \frac{(1+g_S)\left(J^2+J\right)(g_S-1)\left(S^2+S-L^2-L\right)}{2J\,(J+1)} \tag{4}$$

durch die Anwendung des Kosinus-Theorems herleiten.
Das Anlegen eines Magnetfeldes $\vec{B}$ führt zu einer Wechselwirkung zwischen $\vec{\mu}_J$ und $\vec{B}$ mit der Energie

$$U_{\text{mag}} = -\vec{\mu}_J \dot{\vec{B}} \ . \tag{5}$$

Die Wechselwirkungsenergie kann aufgrund der Richtungsquantelung nur diskrete Werte

$$U_{\text{mag}} = M_J g_j \mu_B B \ \text{ mit } \ M_J \in [-L, L] \in \mathbb{Z} \tag{6}$$

annehmen.
Jedes Energieniveau spaltet folglich in $2J + 1$ Unterniveaus auf. Dies wird auch als Zeeman-Effekt bezeichnet.

2.3 Hyperfeinstruktur

Besitzt ein Kern einen Kernspin $I \neq 0$, so Spalten die Energieniveaus weiter in die Hyperfeinstruktur auf.
Es koppelt der Gesamtdrehimpuls der Elektronen $\vec{J}$ und der Kernspin $\vec{I}$ zu einen Gesamtspin

$$\vec{F} = \vec{J} + \vec{I} \ . \tag{7}$$

Die dazugehörige Quantenzahl F läuft dabei von $I + J$ bis $|I - J|$. Der zu F gehörige Landé-Faktor g_F ist durch

$$g_F \approx g_J \frac{F(F+1) + J(J+1) + I(I+1)}{2F(F+1)} \tag{8}$$

gegeben.
In Abbildung 2 ist die Hyperfeinaufspaltung der Niveaus für ein Alkali-Atoms mit Kernspin $I = 3/2$ in zwei Unterniveaus dargestellt.

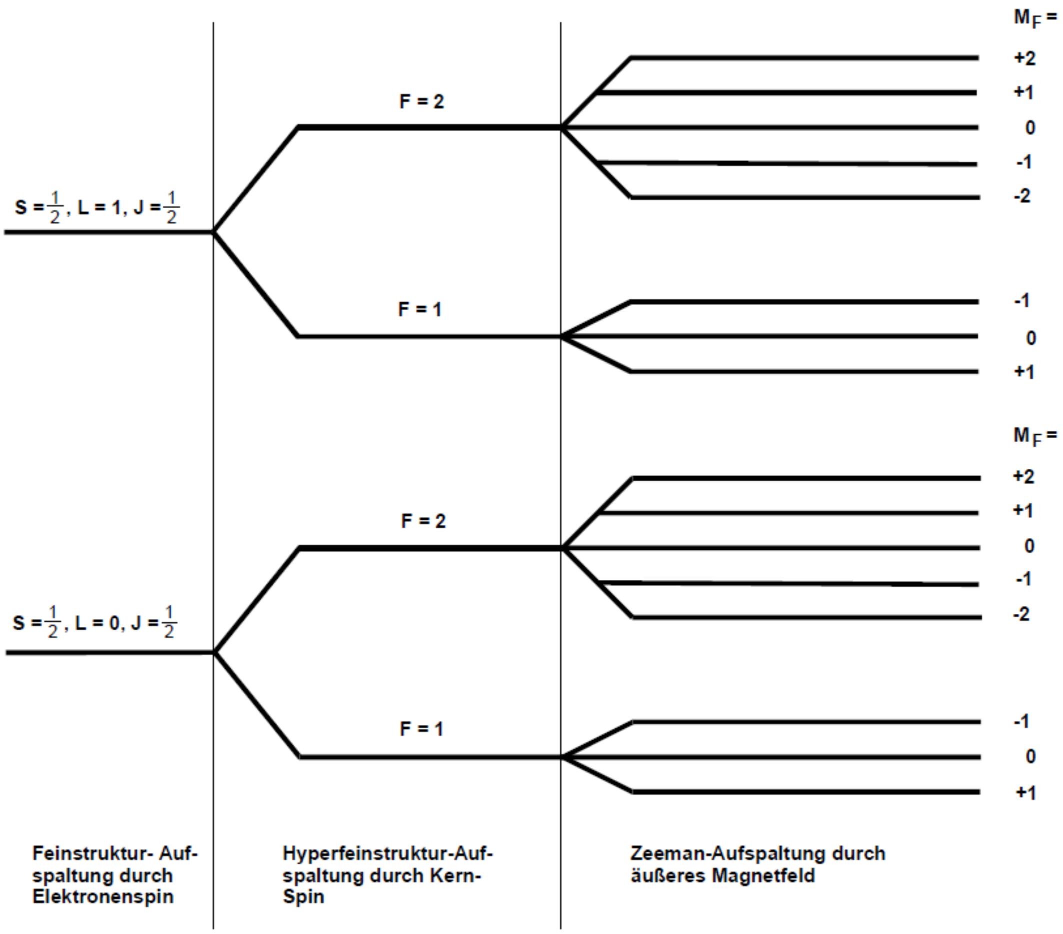

Abb. 2: Hyperfeinstruktur- und Zeeman-Aufspaltung der Energieniveaus eines Alkali-Atoms mit Kernspin $I = 3/2$ [1]

3 Durchführung

4 Quellen