

GRUNDPRAKTIKUM DER FAKULTÄT FÜR PHYSIK
UNIVERSITÄT GÖTTINGEN

Versuch 24
Elektronenspinresonanz

Praktikanten: Jonas Isensee
Lennart Jahn
E-Mail: jonas.isensee@stud.uni-goettingen.de
l.jahn@stud.uni-goettingen.de
Betreuerin: Jack Sparrow
Datum: 22.06.2017

Testat:

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Theorie	3
2.1	Magnetisches Moment des Elektronenspins	3
2.2	Ausrichtung des Elektronenspins	3
2.3	Helmholtz-Spulenpaar	4
2.4	Elektronenspinresonanz	4
2.5	DPPH	4
3	Durchführung	5
3.1	Aufbau	5
3.2	Justierung	5
3.3	Messungen	5
4	Auswertung	6
5	Diskussion	7
	Literatur	7

1 Einleitung

Befindet sich ein Atom oder Molekül in einem äußeren magnetischen Feld, so tritt nicht nur eine Richtungsaufspaltung bezüglich der Bahndrehimpulse der Elektronen auf, sondern auch die Eigendrehimpulse der Elektronen richten sich aus. In den meisten Molekülen vermischen sich beide Effekte so, dass man sie schlecht auseinanderhalten kann. In diesem Versuch soll ein spezielles Molekül 1,1-Diphenyl-2-Pikryl-Hydrazil (DPPH) mittels Elektronenspinresonanz untersucht werden, bei dem es keine Effekte durch Bahndrehimpulse gibt. Ziel ist, den Landé-Faktor, der die Stärke der Effekte durch die Ausrichtung des Elektronenspins beschreibt, für DPPH zu bestimmen.

2 Theorie

2.1 Magnetisches Moment des Elektronenspins

Ein Elektron besitzt eine intrinsische Eigenschaft, genannt Spin, die sich nach außen wie ein Eigendrehimpuls verhält. In dem Wissen, dass sie bei einem punktförmigen Teilchen nicht wirklich ein Drehimpuls sein kann, sich aber nach außen genauso verhält, wird der Spin wie ein Eigendrehimpuls behandelt und über die Spinquantenzahl s beschrieben. Elektronen haben einen halbzahligen Spin von $s = \frac{1}{2}$. Genau wie beim magnetischen Moment des Bahndrehimpulses, folgt dann auch aus dem Spin ein magnetisches Moment, das auch genau analog definiert wird (vgl. [1] SW. 192 f.):

$$\mu_s = -g_s \frac{\mu_B}{\hbar} \vec{s}.$$

Dabei ist μ_B das Bohr'sche Magneton, \hbar das reduzierte plancksche Wirkungsquantum, \vec{s} der Elektronenspin und g_s der Landé-Faktor des Spinmagnetismus. Der Wert dieses Faktors g_j ist somit das einzige in dieser Definition, das sich von der Definition des bahnmagnetischen Moments unterscheidet.

2.2 Ausrichtung des Elektronenspins

In einem externen Magnetfeld richtet sich der Elektronenspin aus. Die Ausrichtung wird durch die z-Komponente des Spins \vec{s} beschrieben, die m_s genannt wird. Es sind nur die beiden Ausrichtungen $m_s = \pm \frac{1}{2}$ erlaubt. Für die potentielle Energie, des spinmagnetischen Moments im externen Magnetfeld gilt dann:

$$E_{\text{pot}} = g_s \mu_B m_s |\vec{B}|.$$

$|\vec{B}|$ ist dabei die Flussdichte des externen Magnetfeldes. Der Energieunterschied zwischen den beiden erlaubten Ausrichtungen beträgt dann (nach [1] S. 212) genau

$$\Delta E = g_s \mu_B |\vec{B}|. \tag{1}$$

2.3 Helmholtz-Spulenpaar

Ein Helmholtz-Spulenpaar sind zwei Spulen, die genau im Abstand ihres Radius R nebeneinander gestellt werden. Sie erzeugen (vgl. [4] S. 92) dann in ihrer Mitte ein bis zur zweiten Ordnung homogenes Magnetfeld der Stärke

$$B = \mu_0 \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{NI}{R}. \quad (2)$$

I ist dabei der Strom, der durch die Spulen fließt, N die Windungszahl einer Spule und μ_0 die magnetische Feldkonstante.

2.4 Elektronenspinresonanz

Hat sich der Spin im äußeren Magnetfeld ausgerichtet, so kann er nicht exakt in eine Richtung zeigen, das widerspräche der Heisenberg'schen Unschärferelation. Er präzidiert also um die Richtung des Magnetfelds. Regt man das Elektron nun mit genau dieser Präzessionsfrequenz an, so kann man ihm so viel Energie hinzufügen, dass es seine Ausrichtung im Magnetfeld umkehrt. Diese Umkehrung entzieht dem anregenden Magnetfeld dann genau die Energie ΔE aus Gleichung (1).

2.5 DPPH

Das Molekül 1,1-Diphenyl-2-Pikryl-Hydrazil (DPPH) (Strukturformel in Abbildung 1) ist für die Vermessung der Elektronenspinresonanz besonders gut geeignet, da es ein ungepaartes Elektron besitzt. Alle anderen Elektronen sind gebunden. Zusätzlich heben sich auch noch alle Effekte der Bahndrehimpulse nahezu auf. Der Landé-Faktor dieses Moleküls ist deswegen nahezu der Landé-Faktor des Elektronenspins.

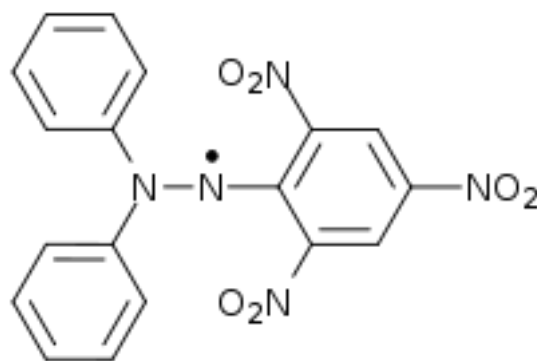


Abbildung 1: Strukturformel von DPPH. Gut erkennbar ist das einzelne ungepaarte Elektron in der Mitte der Zeichnung.

3 Durchführung

3.1 Aufbau

Zunächst muss der Versuch aufgebaut werden. Anders als üblich ist das Helmholtzspulenpaar nicht auf einem gemeinsamen Sockel montiert. Die Spulen haben einen Radius von 6.8 cm und werden in diesem Abstand voneinander gestellt. Dabei ist besonders darauf zu achten, dass sie parallel stehen, da sich die Magnetfelder nicht zu einem homogenen Feld addieren. Dann werden die beiden Spulen in Reihe geschaltet und mit dem entsprechenden Ausgang des ESR-Betriebsgeräts verbunden. Seitlich zwischen den Spulen steht ein Schwingkreiskasten in den die Steckspulen geschoben werden. Die Steckspulen sollen dabei möglichst mittig in den Helmholtz-Spulen befinden. In die Steckspulen wird dann die DPPH-Sonde, mit der schwarzen Seite zuerst, geschoben. Der Schwingkreiskasten wird über ein 6-poliges Kabel mit dem Betriebsgerät verbunden. Zum Schluss werden noch die Ausgänge "B SIGNAL" und "ESR SIGNAL" des Betriebsgerätes mit einem Oszilloskop verbunden.

3.2 Justierung

Vor Beginn der Messungen müssen zunächst einige Einstellungen vorgenommen werden. An der Seitenwand des Schwingkreiskastens befindet sich ein Drehknopf zur Wahl der Verstärkung. Diese wird auf das Maximum gestellt. Mit dem Potentiometer, das sich ebenfalls am Schwingkreiskasten befindet, wird die Resonanzfrequenz auf 15 MHz gestellt und am Betriebsgerät wird die Modulationsamplitude auf den mittelsten Wert gedreht und die Phasenverschiebung nivelliert.

Nun wird das Betriebsgerät eingestellt: Dazu wird das ESR-Betriebsgerät auf Anzeige $A =$ gestellt und das Oszilloskop im xy -Modus betrieben. Das Potentiometer $I =$ wird so justiert, dass die Minima des Stroms äquidistant auf der Zeitachse verteilt sind. Dabei wird der Modulationsstrom so wie möglich gewählt um Störeffekte zu vermeiden. Anschließend wird der Modus des Oszilloskops auf xy geändert. In dieser Ansicht wird die Phasenverschiebung am Betriebsgerät eingestellt, sodass die zwei sichtbaren Minima überlappen. Eventuell muss noch der Gleichstrom I durch die Spulen angepasst werden, bis das Signal symmetrisch ist.

3.3 Messungen

Die Messungen für diesen Versuch bestehen aus einer einzigen Messreihe. Dafür wird die Resonanzfrequenz ν_R von 15 MHz bis 125 MHz in 5 MHz Schritten variiert. Gegebenenfalls muss dafür die Steckspule für den jeweiligen Bereich gewechselt werden. Dann wird mit Hilfe des ESR-Betriebsgeräts und des Oszilloskops für jede der Resonanzfrequenzen die zugehörige Spulenstromstärke I bestimmt. Die Einstellungen dazu werden wie im Abschnitt 3.2 vorgenommen.

4 Auswertung

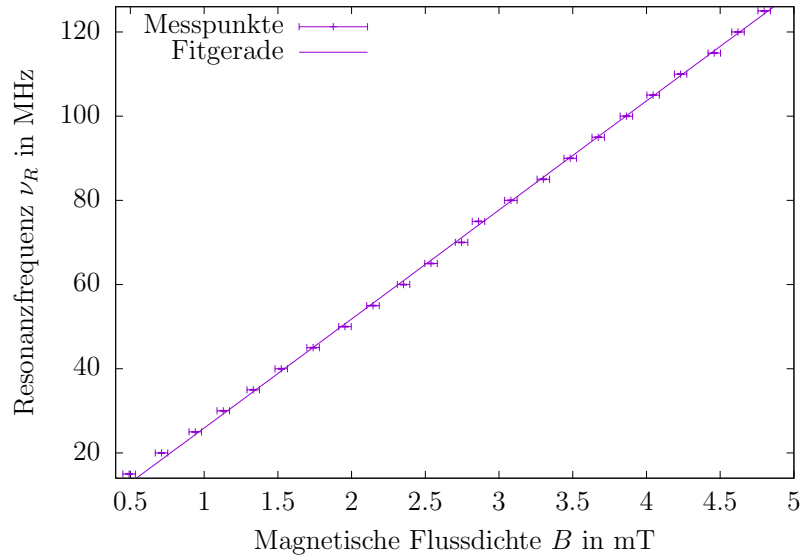


Abbildung 2: In dieser Grafik ist die Resonanzfrequenz ν_R aufgetragen über dem berechneten Magnetfeld B . Zusätzlich wurde ein mit gnuplot erstellter linearer Fit abgebildet. Die Ursprungsgerade hat den Steigungsparameter $\alpha = 25.91 \pm 0.06 \frac{\text{MHz}}{\text{mT}}$.

Während der Versuchsdurchführung wurde die Stromstärke I , die durch das Helmholtzspulenpaar floss, gemessen. Die zugehörige magnetische Flussdichte berechnet sich nach Formel (2) und der Fehlerformel:

$$\sigma_B = \sigma_I \frac{B}{I}.$$

Über dieser berechneten magnetischen Flussdichte B wurde in Abb. 2 die zugehörige Resonanzfrequenz aufgetragen. Zusätzlich wurde durch die Werte eine Ursprungsgerade gefittet und der freie Parameter ergab sich zu $\alpha = 25.91 \pm 0.06 \frac{\text{MHz}}{\text{mT}}$. Aus der Resonanzfrequenz ν_R lässt sich die Energiedifferenz $\Delta E = h\nu_R$ berechnen und für diese gilt, wie in der Theorie beschrieben, die Gleichung (1). Folglich können wir den Landé-Faktor g_s mit folgender Formel bestimmen. Es ist:

$$g_s = \frac{\Delta E}{\mu_B |\vec{B}|} = \frac{h \nu_R}{\mu_B |\vec{B}|} = \frac{h}{\mu_B} \cdot \alpha$$

und

$$\sigma_{g_s} = \sigma_\alpha \frac{h}{\mu_B}$$

mit dem Bohrschen Magneton $\mu_B = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$ und dem Planckschen Wirkungsquantum h . Es folgt, dass

$$g_s = 1.851 \pm 0.005.$$

5 Diskussion

In der Auswertung wurde der Landé-Faktor zu $g_s = 1.851 \pm 0.005$ bestimmt. Der Literaturwert für das Material DPPH ist allerdings $g_s = 2.0036$ [5]. Das liegt nur im 31σ Intervall unseres Wertes. Ein Blick auf Abb. 2 zeigt jedoch, dass die Messungen sehr gut mit dem berechneten g_s , bzw. dem Fit, übereinstimmen. Damit ist deutlich, dass es sich um einen systematischen Fehler handeln muss. Höchstwahrscheinlich gibt es ein Problem mit der Berechnung des Magnetfelds.

Das Magnetfeld der Helmholtz-Spulen ist natürlich nicht vollkommen homogen. Das ist in diesem Versuch aber nicht von großer Bedeutung, da sich die Probe zentral an einem wenig ausgedehnten Ort befindet. Wir vermuten jedoch, dass ein weiterer systematischer Fehler (wie z.B. Ungenauigkeit im Betriebsgerät) dafür gesorgt hat, dass das Magnetfeld in der Spule immer zu gering war. Das erklärt, warum der Wert für g_j zu klein ist, die Regressionsgerade aber immer noch sehr genau ist.

Literatur

- [1] Haken und Wolf, Atom- und Quantenphysik, Springer, 7. Auflage (2000)
- [2] Lukas Hupe, *Stilleben mit Spulen*, ©LUKASARTS
- [3] J. Große-Knetter, P. Schaaf, Das Physikalische Praktikum Band II, Universitätsdrucke Göttingen 2016
- [4] D. Meschede, Gerthsen Physik, Springer, 25. Auflage (2015)
- [5] M.J. Davies, Electron Paramagnetic Resonance, Royal Society of Chemistry (2000), S. 178.