

ANFÄNGERPRAKTIKUM DER FAKULTÄT FÜR PHYSIK,
UNIVERSITÄT GÖTTINGEN

Versuch 24
Elektronenspinresonanz

Praktikanten: Maximilian Kurjahn
Lukas Hupe

E-Mail: m.kurjahn@stud.uni-goettingen.de
lukas.hupe@stud.uni-goettingen.de

Betreuer: DeForest Kelley

Testat:

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
2. Theorie	3
2.1. Magnetisches Spinmoment	3
2.2. Helmholtzspulen	3
2.3. Probenkörper	4
3. Durchführung	4
4. Auswertung	5
4.1. Bestimmung des Magnetfeldes	5
4.2. Bestimmung des Landé-Faktors	5
5. Diskussion	7
5.1. Güte der Messung	7
5.2. Mögliche Fehlerquellen	7
A. Literatur	8

1. Einleitung

Die Elektronenspinresonanz (ESR) findet heute eine breite Anwendung in Forschung und Industrie. In der Biophysik wird die ESR zur Vermessung von Gewebe und anderen biologischen Proben verwendet. Zur Materialüberprüfung von Verunreinigungen in der Photovoltaik wird ebenfalls die ESR verwendet.

In diesem Versuch wird mit der ESR der Landé-Faktor eines freien Elektrones durch das Spinmoment in einem Magnetfeld bestimmt.

2. Theorie

2.1. Magnetisches Spinmoment

Das Elektron hat eine intrinsische Eigenschaft, die als Spin bezeichnet wird und mit einem Eigendrehimpuls assoziiert werden kann. Dadurch ergibt sich für das Elektron ein magnetisches Spinmoment [1, S.212]

$$\vec{\mu}_s = -g_s \cdot \frac{\mu_B}{\hbar} \vec{s} \quad (2.1)$$

mit Bohrschem Magneton μ_B und Landé-Faktor g_s . In einem externen Magnetfeld $|\vec{B}|$ ist damit eine potenzielle Energie

$$E_{\text{pot}} = g_s m_s \cdot \mu_B |\vec{B}| \quad (2.2)$$

über die magnetische Spinquantenzahl $m_s = \pm 1/2$ verbunden. Ein sogenannter Spinflip, also eine Neuausrichtung des Spins parallel oder antiparallel zum Magnetfeld erfordert demnach eine Energieänderung von

$$\Delta E = g_s \cdot \mu_B |\vec{B}|. \quad (2.3)$$

Wird nun das konstante Magnetfeld $|\vec{B}|$ mit einem Wechselfeld überlagert, das mit der Frequenz $\nu = \frac{\Delta E}{h}$ oszilliert, kann die absorbierte Energie beobachtet werden und die sogenannte *Elektronenspinresonanz* findet statt. [1, S.212]

2.2. Helmholtzspulen

Für ein Helmholtz-Spulenpaar, bestehend aus zwei parallelen Ringspulen mit Radius und Abstand R , lässt sich mit dem Gesetz von BIOT-SAVART [2, S.380]

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi r^3} d\vec{l} \times \vec{r},$$

wobei \vec{r} den Abstand zwischen der Leiterschleife $d\vec{l}$ und dem betrachteten Punkt sowie μ_0 die magnetische Feldkonstante bezeichnet, die magnetische Flussdichte B berechnen. Nach Berechnung und Taylornäherung ergibt sich damit für das Magnetfeld nach [2, S.92]

$$B = \frac{\mu_0 n I}{R} \left(\frac{4}{5} \right)^{\frac{3}{2}}. \quad (2.4)$$

2.3. Probenkörper

In diesem Versuch wird das Molekül 1,1-Diphenyl-2-Picryl-Hydrazyl (DPPH) verwendet. Diese Verbindung hat ein freies Radikal und damit kann das einzelne Elektron als näherungsweise frei betrachtet werden, sodass dieses auch den entsprechenden Landé-Faktor besitzt. In Abbildung 2.1 ist die Strukturformel von 1,1-Diphenyl-2-Picryl-Hydrazyl dargestellt. Erkennbar ist hier das Radikal an einem der Stickstoffatome. Für so ein Elektron wird ein Landé-Faktor von $g_s = 2.0036$ [4, S.443] erwartet, wobei ein Elektron nach der DIRAC-Theorie einen Landé-Faktor von $g_{s,0} = 2.0023$ hat.

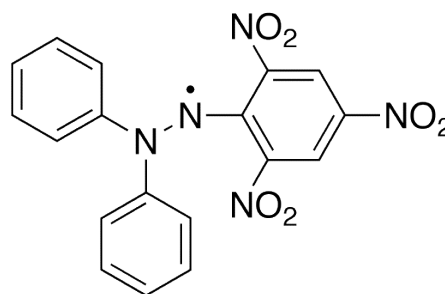


Abbildung 2.1: Strukturformel der Verbindung DPPH [3].

3. Durchführung

In Abbildung 3.1 ist der Versuchsaufbau schematisch dargestellt. Man stellt die beiden Helmholtzspulen im Abstand von $d = 6.8\text{ cm}$ auf, verbindet sie wie in der Abbildung dargestellt und schließt sie an das ESR-Betriebsgerät an.

Justierung Die lange Spule wird in den Schwingkreiskasten gesteckt und die Probe aus DPPH in die Spule eingeführt. Dabei soll sich der schwarze Teil der Probe in der Mitte der Helmholtzspulen befinden. Der Drehknopf an der dem Schwingkreiskasten wird auf maximale Verstärkung, die Resonanzfrequenz auf 15 MHz und die Phasenverschiebung auf 0° gestellt. Das Oszilloskop wird so eingestellt, dass sich im xy -Betrieb die Minima in x -Richtung überlappen. Nun wird der Spulenstrom so justiert, dass das Bild symmetrisch ist.

Messung Für den Frequenzbereich 15 . . . 30 MHz wird die lange Spule, für 35 . . . 70 MHz die mittlere Spule und für 75 . . . 125 MHz die kurze Spule verwendet. In 5 MHz-Schritten wird der Spulenstrom jeweils so nachjustiert, dass das Bild des Oszilloskops wieder symmetrisch ist und dann notiert.

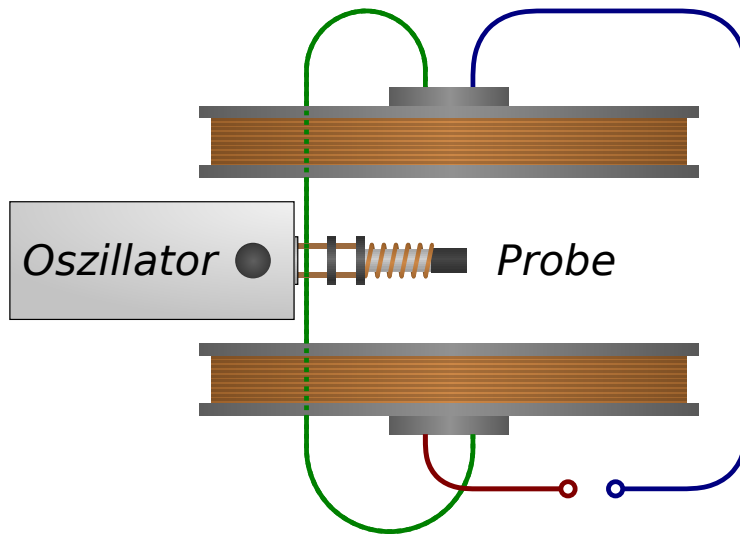


Abbildung 3.1: Schematische Abbildung des Versuchsaufbaus mit der Probe (siehe 2.3), Oszillator und Helmholtz-Spulenpaar; dort muss auf die richtige Beschaltung geachtet werden, die hier farblich markiert ist [eigene Arbeit].

4. Auswertung

4.1. Bestimmung des Magnetfeldes

Das Magnetfeld kann mit Formel (2.4) für die Feldstärke im Helmholtzspulenpaar berechnet werden, da sich die DPPH-Probe genau in der Mitte der Spulen befindet. Es gilt für den Fehler σ_B nach Gauß

$$\sigma_B = \left| \frac{\mu_0 n \sigma_I}{R} \left(\frac{4}{5} \right)^{\frac{3}{2}} \right|$$

unter Annahme eines konstanten und fehlerfrei bekannten Radius. Der Fehler der Stromstärke wurde im Versuch zu 5 mA abgeschätzt; man erhält für den Fehler der Feldstärke

$$\sigma_B \approx 0.03 \text{ mT}$$

Für den Resonanzfall wurden die $|\vec{B}|$ aus den gemessenen Stromstärken bestimmt und mit den jeweiligen Resonanzfrequenzen ν in Abbildung 4.1 aufgetragen.

4.2. Bestimmung des Landé-Faktors

Aus der theoretisch geforderten Energieänderung (2.3) kann man – wie in Abschnitt 2.1 beschrieben – eine Gleichung für die Frequenz des Wechselfeldes aufstellen.

$$\nu_R = \frac{g_s \mu_B}{h} |\vec{B}|$$

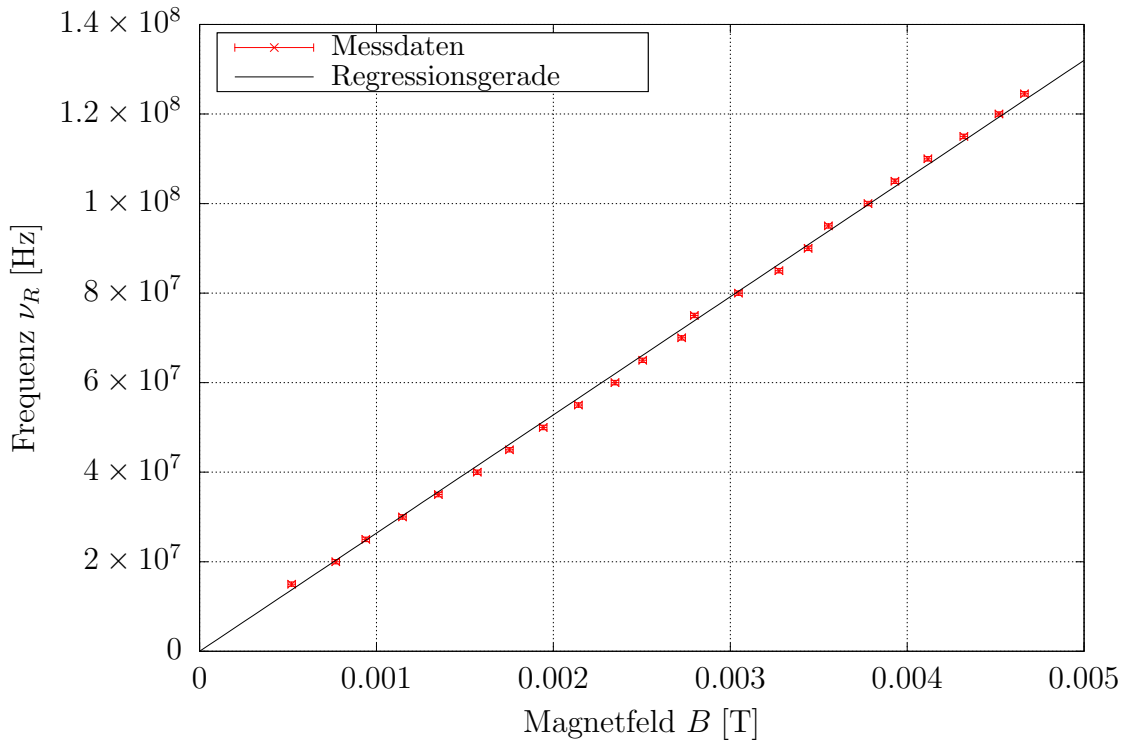


Abbildung 4.1: Resonanzfrequenzen ν_R aufgetragen über der Magnetfeldstärke $|\vec{B}|$ mit linearer Regression

Bestimmt man also aus den in Abbildung 4.1 aufgetragenen Messwerten per linearer Regression die Geradensteigung a , kann man mit

$$g_s = \frac{h}{\mu_B} a$$

den Landé-Faktor berechnen. Der Fehler folgt aus Gaußscher Fehlerfortpflanzung zu

$$\sigma_{g_s} = \left| \frac{h}{\mu_B} \sigma_a \right|$$

wobei σ_a der aus der Regression entnommene Fehler der Geradensteigung ist. Hier erhalten wir einen Landé-Faktor von

$$g_s = 1.886 \pm 0.007$$

5. Diskussion

5.1. Güte der Messung

Auffällig ist, dass das Ergebnis von $g_s = 1.886 \pm 0.007$ zwar mit sehr hoher Genauigkeit bestimmt wurde, aber auch weit vom Erwartungswert von $g_s = 2.0063$ [4, S.443] liegt. Die Abweichung beträgt rund 17σ -Umgebungen, das Ergebnis ist deutlich kleiner als erwartet.

5.2. Mögliche Fehlerquellen

Unter der Annahme, dass die Messgeräte korrekt bedient und abgelesen wurden, ist es sehr wahrscheinlich, dass der Fehler bei der Umrechnung des Spulenstroms in die magnetische Feldstärke entstand. Dies würde den auftretenden guten linearen Zusammenhang mit zu geringer Steigung erklären, da ein Umrechnungsfehler alle Datenpunkte gleich beeinflussen würde.

Geometrie der Helmholtzspulen Eine Möglichkeit ist, dass die Helmholtzspulen falsch aufgebaut wurden. Da die verwendeten Spulen nicht aneinander befestigt waren, mussten sie von Hand im richtigen Abstand parallel angeordnet werden. Dabei ist es schwierig, die nötige Genauigkeit zu erreichen und tatsächlich die Helmholtzbedingung zu erfüllen.

Position der Probe Auch ist es möglich, dass die Probe nicht korrekt zentriert im Feld der Helmholtzspulen ausgerichtet waren. Dadurch wäre das tatsächliche Magnetfeld in der Probe kleiner als die berechnete Feldstärke. Daraus kann abgeleitet werden, dass das berechnete g_s *kleiner* als das tatsächliche g_s ist, was den Beobachtungen entspricht.

Allerdings sind Helmholtzspulen auf einen möglichst konstanten Verlauf der Feldstärke um ihr Zentrum optimiert – es ist also unwahrscheinlich, dass allein dieser Effekt für die Abweichung des Messergebnisses verantwortlich ist.

Genauigkeit der Frequenz Ein weiteres Problem der Messung könnte darin liegen, dass alle ν -Werte bei der Regression gleich gewichtet wurden. Es hätte bei der Durchführung eine bessere Abschätzung der Genauigkeit vorgenommen werden müssen, um Effekte z.B. beim Spulenwechsel zu berücksichtigen. Betrachtet man das Messprotokoll, ist es auffällig, dass bei den höheren Spulen mehr Ausreißer auftreten, die das Regressionsergebnis beeinflussen könnten. Durch eine Gewichtung der Werte hätte dieser Einfluss reduziert werden können.

A. Literatur

- [1] Hermann Haken, Hans Christoph Wolf, *Atom- und Quantenphysik*, Springer Berlin Heidelberg New York, 8. Auflage, 2004
- [2] Dieter Meschede (Hrsg.), *Gerthsen Physik*, Springer Berlin Heidelberg, 25. Auflage, 2015.
- [3] 1,1-Diphenyl-2-Picryl-Hydrazyl (DPPH), <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/53/D492045.png>, Goldschmidt, Uni Würzburg, 1922
- [4] Charles P. Poole, *Electron Spin Resonance: A Comprehensive Treatise on Experimental Techniques*, Courier Corporation, 1996

