



Technische
Universität
Dresden

Fakultät Physik

Physikalisches Grundpraktikum

Versuch: **ESR**

Aktualisiert: am 13. April 2026

Elektronenspinresonanz

Inhaltsverzeichnis

1	Versuchsziel	2
2	Einführung	2
3	Grundlagen	3
3.1	Resonanzabsorption	3
3.2	Grundlagen der Elektronenspinresonanz	3
4	Versuchsaufbau	5
4.1	Resonanzabsorption durch einen passiven HF-Kreis	5
4.2	Messungen der Elektronenspinresonanz	6
4.2.1	Messprinzip	6
4.3	Helmholtzspulen	8
5	Versuchsdurchführung	9
5.1	Klassische Resonanzabsorption an einem passiven HF-Kreis	9
5.2	Bestimmung des Resonanzmagnetfeldes B_0	9
5.3	Bestimmung der Halbwertsbreite δB_0	11
6	Auswertung	11
7	Messunsicherheiten	12
8	Fragen zum Versuch	12
	Literatur	12

1 Versuchsziel

In diesem Experiment wird die Anregung von Spinzuständen in bestimmten Materialien mittels hochfrequenter elektromagnetischer Wellen sowie die Untersuchung von Resonanzphänomenen betrachtet, die unmittelbar mit fundamentalen Konstanten und Materialeigenschaften in Zusammenhang stehen. Allerdings liegt dieses Teilgebiet der Physik im vierten Fachsemester üblicherweise noch außerhalb des in den Vorlesungen behandelten Stoffes. Zur Heranführung an die Thematik wird im Rahmen eines Vorversuchs der Spinresonator zunächst durch einen klassischen Resonator ersetzt, um den Effekt der Resonanzabsorption zu veranschaulichen. Anschließend wird der Spinresonator, bestehend aus einem paramagnetischen Material im statischen Magnetfeld, eingesetzt.

1. Untersuchen Sie das Phänomen der Resonanzabsorption anhand eines klassischen passiven hochfrequenten (HF) Resonanzkreises.
2. Messen Sie das Resonanzmagnetfeld B_0 in Abhängigkeit von der gewählten Frequenz ν für eine DPPH-Probe.
3. Bestimmen Sie den g -Faktor von DPPH, die Linienbreite δB_0 des Resonanzsignals sowie die Lebensdauer der Spinanregung.

2 Einführung

Seit seiner Entdeckung durch E. K. Zavoisky (1945) hat sich die Elektronenspinresonanz (ESR) zu einer wichtigen Methode zur Untersuchung von Molekül- und Kristallstrukturen, chemischen Reaktionen sowie vielfältigen Fragestellungen in Physik, Chemie, Biologie und Medizin entwickelt. Sie beruht auf der Absorption hochfrequenter Strahlung durch paramagnetische Substanzen in einem äußeren Magnetfeld, in dem sich die Spinzustände der Elektronen aufspalten.

Die Elektronenspinresonanz ist auf paramagnetische Substanzen beschränkt, da in diesen Systemen die Bahndrehimpulse und Spins der Elektronen so gekoppelt sind, dass der Gesamtdrehimpuls ungleich null ist. Geeignete Substanzen sind beispielsweise Atome mit unvollständig gefüllten inneren Schalen (Übergangsmetalle, Seltenerdelemente), organische Moleküle (freie Radikale) mit ungepaarten Elektronen oder Kristalle mit Gitterfehlstellen im paramagnetischen Zustand.

Die in diesem Experiment verwendete Probe ist 1,1-diphenyl-2-picryl-hydrazyl (DPPH). Diese organische Verbindung ist ein relativ stabiles freies Radikal mit einem ungepaarten Valenzelektron, das an einer Stickstoffbrücke lokalisiert ist und den Ursprung ihres Paramagnetismus darstellt (siehe Abb. 1). In einem freien Stickstoffatom sind sechs Elektronen gepaart und tragen daher weder zum Bahndrehimpuls noch zum Spindrehimpuls bei. Folglich erzeugen diese Elektronen kein resultierendes magnetisches Moment. Das siebte Elektron befindet sich in einem $2p$ -Zustand und besitzt eine Einheit Bahndrehimpuls mit der Quantenzahl $l = 1$. Dieses Elektron besitzt ein magnetisches Moment, das sowohl aus seiner Bahnbewegung als auch aus seinem Spin resultiert.

Ist das Stickstoffatom Teil des DPPH-Moleküls, so wird der Bahndrehimpulsbeitrag nahezu unterdrückt und gilt als „gequencht“. Dieser Effekt wird durch die umgebenden molekularen Felder verursacht, welche die Entartung der Drehimpulszustände aufheben und die Präzession des magnetischen Moments unterdrücken. Infolgedessen verhält sich das Elektron näherungsweise wie ein Teilchen mit vernachlässigbarem Bahndrehimpuls. Die Energie dieses Elektrons im äußeren Magnetfeld stellt die zentrale Untersuchungsgröße dieses Experiments dar. Die Wechselwirkung mit dem Magnetfeld wird daher vom Elektronenspin dominiert.

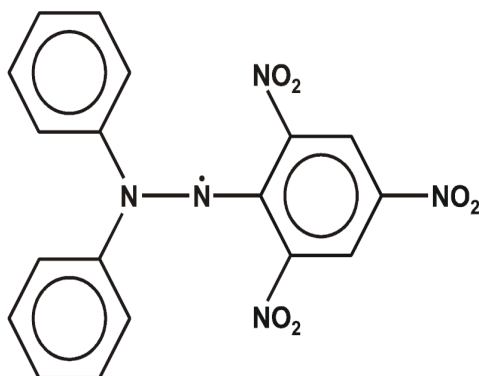


Abb. 1: Chemische Struktur von 1,1-diphenyl-2-picryl-hydrazyl (DPPH)

3 Grundlagen

3.1 Resonanzabsorption

Die Resonanzabsorption elektromagnetischer Felder ist ein Phänomen, das Effekten wie der Absorption von Infrarotstrahlung durch atmosphärische Moleküle oder der Aufnahme von Radiowellen durch metallische Antennen zugrunde liegt. Charakteristisch ist, dass unter Resonanzbedingungen die vom Sender auf den Empfänger übertragene Energie ein Maximum erreicht. In diesem Experiment wird die DPPH-Probe – die als quantenmechanischer Resonator wirkt – hochfrequenten (HF) Magnetfeldern ausgesetzt. Zur Veranschaulichung ist es jedoch sinnvoll, diese Probe zunächst durch ein klassisches Analogon zu ersetzen: einen passiven HF-Resonanzkreis, der durch einen aktiven Kreis im Frequenzbereich zwischen 15 und 130 MHz angeregt wird. Die Resonanzfrequenz kann über die Kapazität des passiven Kreises eingestellt werden. Im Resonanzfall wird der aktive Kreis belastet, was zu einem Spannungsabfall an der Sendespule führt, während Energie auf den passiven Kreis übertragen wird. Dieses Verhalten kann durch geeignete Messungen nachgewiesen werden.

3.2 Grundlagen der Elektronenspinresonanz

Die Elektronenspinresonanz (ESR), auch als Elektronenparamagnetische Resonanz (EPR) bezeichnet, ist ein rein quantenmechanisches Phänomen. Das Grundprinzip der ESR ist eng mit dem der Kernspinresonanz (NMR) verwandt. Ein wesentlicher Unterschied besteht jedoch darin, dass bei der NMR Kernspins angeregt werden, während sich die ESR auf Elektronenspins bezieht. Da die vorliegende Probe die Untersuchung nahezu freier Elektronen ermöglicht, wird im Folgenden der Bahndrehimpuls vernachlässigt. Das mit dem Spindrehimpuls \vec{S} verknüpfte magnetische Moment ist

$$\vec{\mu}_S = -g_S \frac{\mu_B}{\hbar} \vec{S} \quad (1)$$

mit $\mu_B = \frac{h e}{2 m_e}$, $\hbar = \frac{h}{2\pi}$, wobei μ_B das Bohrsche Magneton (wie im ZE-Experiment gemessen) bezeichnet, h die Planck-Konstante, g_S den Landé-Aufspaltungsfaktor, m_e die Elektronenruhemasse und e die Elementarladung ist. Für ein freies Elektron ist die Situation in Abb. 1 dargestellt. Der Landé-Faktor für ein freies Elektron beträgt $g_S \approx 2,0023$. Es ist bemerkenswert, dass die Dirac-Gleichung exakt den Wert 2 vorhersagt. Die beobachtete Abweichung ($g - 2$) ergibt sich aus quantenelektrodynamischen Effekten wie der Erzeugung und Vernichtung von Photonen sowie Elektron-Positron-Paaren.

In einem statischen äußeren Magnetfeld \vec{B}_0 besitzt das magnetische Moment $\vec{\mu}_S$ die potenzielle Energie

$$E = -\vec{\mu}_S \cdot \vec{B}_0. \quad (2)$$

Dabei ist E quantisiert, da das magnetische Spinmoment nur diskrete Orientierungen relativ zum äußeren Magnetfeld einnehmen kann, wie im Stern-Gerlach-Experiment (1921) gezeigt wurde. Jede Orientierung des Spins entspricht einem Zustand mit einer bestimmten potenziellen Energie im Magnetfeld. Die Komponente S_z des Spindrehimpulses parallel zum äußeren Magnetfeld ist gegeben durch

$$S_z = \hbar m_S. \quad (3)$$

mit $m_S = -\frac{1}{2}, +\frac{1}{2}$. Daraus folgt eine Aufspaltung der potenziellen Energie in diskrete Zeeman-Niveaus (Abb. 2):

$$E_{\pm} = \begin{cases} +\frac{1}{2}g_S\mu_B B_0 \\ -\frac{1}{2}g_S\mu_B B_0 \end{cases}. \quad (4)$$

Diese Zustände entsprechen antiparallelen bzw. parallelen Orientierungen des Elektronenspins relativ zum Magnetfeld. Die Energiedifferenz $\Delta E = g_S\mu_B B_0$ ist proportional zum angelegten statischen Magnetfeld und kann mittels Elektronenspinresonanz (ESR) direkt gemessen werden, wodurch die Bestimmung des *Landé*-Faktors ermöglicht wird.

Zu diesem Zweck wird ein hochfrequentes wechselndes Magnetfeld

$$\vec{B}_1 = \vec{B} \sin(2\pi\nu t), \quad (5)$$

das senkrecht zum statischen Magnetfeld \vec{B}_0 orientiert ist, auf die Probe angelegt. Entspricht die Energie $h\nu$ des Wechselfeldes der Energiedifferenz ΔE zwischen zwei benachbarten Energieniveaus, d. h. sind die Bedingungen

$$\Delta m_S = \pm 1 \quad (\text{Auswahlregel}) \quad (6)$$

und

$$h\nu = \Delta E = g_S\mu_B B_0 \quad (7)$$

erfüllt, so induziert das Wechselfeld Übergänge („Spin-Flips“) der magnetischen Momente von einer parallelen in eine antiparallele Ausrichtung bezüglich \vec{B}_0 . Mit anderen Worten werden Übergänge zwischen benachbarten Energieniveaus angeregt, was zu einem Resonanzeffekt führt, der sich als Absorption von Energie aus dem angelegten wechselnden Magnetfeld beobachten lässt.

Wird die aus dem Wechselfeld absorbierte Energie bei fester Frequenz ν als Funktion des Magnetfeldes B_0 gemessen, so erhält man eine Absorptionslinie mit einer Halbwertsbreite (FWHM) δB_0 . Im einfachsten Fall spiegelt diese Linienbreite in einem homogenen Magnetfeld die Unschärfe δE des Übergangs wider. Es gilt die Unschärferelation in der Form

$$\delta E \cdot \delta T \geq \frac{\hbar}{2}, \quad (8)$$

wobei δT die Lebensdauer des Zustands bezeichnet. Gemäß Gl. (7) steht die Unschärfe der Übergangsenergie mit der Unschärfe des Resonanzfeldes δB_0 in Beziehung durch

$$\delta E = g_S\mu_B \delta B_0. \quad (9)$$

Daraus folgt die Beziehung

$$\delta B_0 = \frac{\hbar}{2g_S\mu_B\delta T} \quad (10)$$

die unabhängig von der Frequenz ν ist. In diesem Experiment werden sowohl die Lage (B_0) als auch die Breite (δB_0) der Absorptionslinien im ESR-Spektrum der Probe ausgewertet.

Aus der Resonanzlage wird gemäß Gl. (7) der *Landé*-Faktor g_S der Probe bestimmt. Für ein freies Atom oder Ion liegt der *Landé*-Faktor im Bereich von $g_S = 1$, wenn der Magnetismus ausschließlich durch den Bahndrehimpuls verursacht wird, bis $g_S \approx 2,0023$, wenn ausschließlich der Spin beiträgt. In der Praxis sind die mittels ESR untersuchten paramagnetischen Zentren jedoch nicht frei. Eingebettet in Kristallgitter oder von Solvathüllen in Lösungen umgeben, unterliegen sie starken elektrischen und magnetischen Feldern der umgebenden Atome. Diese Felder führen zu Energieverschiebungen und verändern die Zeeman-Aufspaltung der Elektronen, wodurch sich der Wert des g -Faktors ändert. Häufig wird er anisotrop, und es treten Feinstrukturen in den ESR-Spektren auf. Der g -Faktor liefert daher Informationen über die Elektronenbindung und die chemische Struktur der untersuchten Probe.

Aus der Linienbreite können dynamische Eigenschaften erschlossen werden. Unter Vernachlässigung nicht aufgelöster Feinstrukturen wird die Linienbreite durch mehrere Prozesse bestimmt, die der Ausrichtung der magnetischen Momente entgegenwirken. Die Wechselwirkung zwischen magnetischen Momenten wird als Spin–Spin-Relaxation bezeichnet, während die Wechselwirkung zwischen magnetischen Momenten und fluktuierenden elektrischen und magnetischen Feldern—hervorgerufen durch Gitterschwingungen in Festkörpern oder thermische Bewegung in Flüssigkeiten—als Spin–Gitter-Relaxation bezeichnet wird. In einigen Fällen wird die Linienbreite auch durch Austauschwechselwirkungen quantenmechanischen Ursprungs beeinflusst und kann dann deutlich kleiner sein als aufgrund reiner Dipol–Dipol-Wechselwirkungen zu erwarten wäre. Zusammenfassend ergeben sich Beiträge zur Linienbreite aus:

- Dipol–Dipol-Wechselwirkungen zwischen magnetischen Momenten der Elektronen (Spin–Spin-Relaxation),
- Wechselwirkungen zwischen magnetischen Momenten und fluktuierenden Gitterfeldern (Spin–Gitter-Relaxation),
- Austauschwechselwirkungen der Elektronen, die die Linienbreite deutlich verringern können, und
- Spin–Bahn-Kopplung, die einen Mechanismus für die Spin–Gitter-Relaxation bereitstellt.

In DPPH ist die Austauschwechselwirkung der dominante Mechanismus. Die Halbwertsbreite der Resonanz, ausgedrückt in Einheiten des Magnetfeldes, wird mit δB bezeichnet und im Experiment gemessen.

4 Versuchsaufbau

4.1 Resonanzabsorption durch einen passiven HF-Kreis

Zur Untersuchung des Prinzips der Resonanzabsorption wird ein HF-Kreis induktiv an die aktive Spule des HF-Generators gekoppelt, wie in Abb. 4 dargestellt. Die Frequenz kann über einen Drehregler am Frequenzgenerator eingestellt werden, während die Resonanzfrequenz des passiven HF-Kreises über einen variablen Kondensator abgestimmt wird. Der gleichgerichtete Strom in der aktiven Spule kann mittels eines Voltmeters und eines Widerstands gemessen werden, während

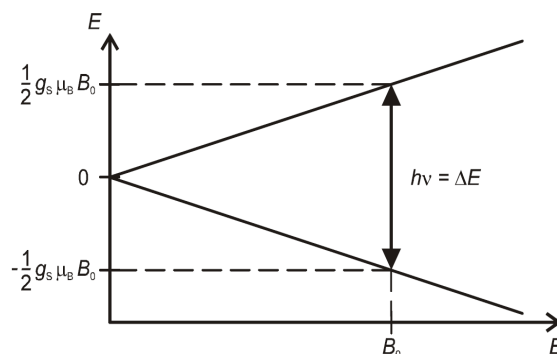


Abb. 2: Energieaufspaltung eines freien Elektrons im Magnetfeld und die Resonanzbedingung für die Elektronenspinresonanz.

die induzierte Spannung im passiven Kreis mit einem Oszilloskop beobachtet wird. Auf diese Weise kann der Zusammenhang zwischen beiden Spannungen als Funktion der Frequenz untersucht werden.

4.2 Messungen der Elektronenspinresonanz

Im nächsten Schritt wird der klassische HF-Resonator durch einen Spinresonator ersetzt, der durch die im Magnetfeld platzierte DPPH-Probe realisiert wird. Der Versuchsaufbau ist in den Abb. 5 und 7 dargestellt. Die Helmholtzspulen sind parallel zueinander in einem Abstand von etwa 6,8 cm (entsprechend ihrem mittleren Radius r) angeordnet und in Reihe geschaltet; Details sind Abb. 5 zu entnehmen.

Das ESR-Grundgerät (HF-Generator) ist über ein 6-poliges Kabel mit dem ESR-Steuergerät verbunden. Der Ausgang „ESR Signal“ wird über BNC-Kabel mit Kanal II (Y-Achse) eines Zweikanal-Oszilloskops verbunden, während der Ausgang „B-Signal“ mit Kanal I (X-Achse) verbunden wird. Die Probe wird vorsichtig in die aktive Spule eingesetzt, die direkt mit dem HF-Generator verbunden ist. Zur Abdeckung des gesamten Frequenzbereichs stehen drei austauschbare Spulen zur Verfügung: die größte für niedrige Frequenzen und die kleinste für hohe Frequenzen.

Wichtig: DPPH ist toxisch und in einem Glaskolben eingeschlossen, der nicht beschädigt werden darf. Vor dem Entfernen der Probe ist die Spule vom HF-Generator zu trennen und die Probe vorsichtig zu entnehmen. Es sind Schutzhandschuhe zu tragen.

4.2.1 Messprinzip

Für praktische Anwendungen entwickelte ESR-Spektrometer arbeiten typischerweise bei Frequenzen von etwa 10 GHz (Mikrowellen, X-Band). Entsprechend liegen die Magnetfelder in der Größenordnung von 0,1 bis 1 T. In diesem Experiment ist das Magnetfeld B_0 jedoch deutlich schwächer. Es wird durch Helmholtzspulen erzeugt und kann durch geeignete Wahl des Spulenstroms auf Werte zwischen 0 und 4 mT eingestellt werden. Die Probe befindet sich innerhalb einer HF-Spule, die Teil eines Resonanzkreises mit hoher Güte ist. Dieser Kreis wird von einem frequenzvariablen HF-Oszillator im Bereich von 15 bis 130 MHz angeregt.

Ist die Resonanzbedingung (Gl. 7) erfüllt, absorbiert die Probe Energie und belastet dadurch den Resonanzkreis. Infolgedessen ändert sich die Impedanz des Kreises und die Spannung an der Spule nimmt ab. Im Vorversuch kann dieser Spannungsabfall an der aktiven Spule aufgrund der vergleichsweise starken Resonanzabsorption bei induktiver Kopplung an einen passiven HF-Kreis di-

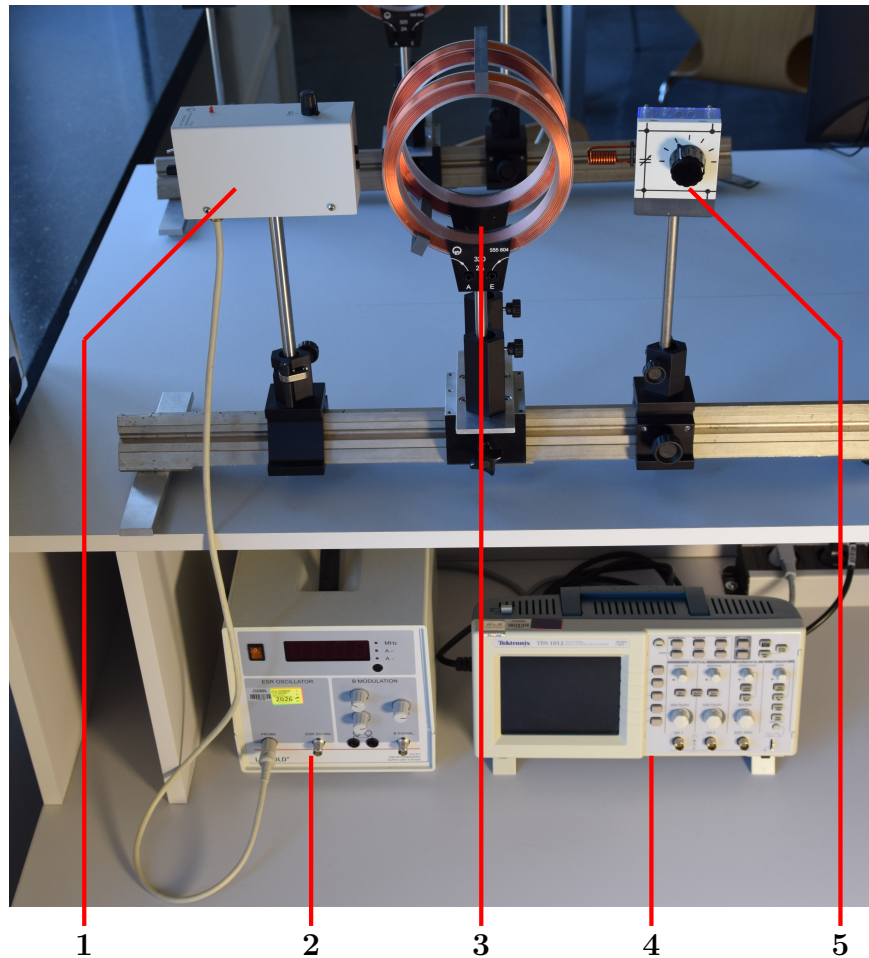


Abb. 3: Versuchsaufbau: ESR-Grundgerät (HF-Generator) / aktive Spule, 2) ESR-Steuergerät, 3) Helmholtzspulen, 4) Oszilloskop, 5) passiver HF-Kreis

rekt gemessen werden (Abb. 4). Um die vergleichsweise schwache Absorption der DPPH-Probe nachzuweisen, wird die Spannung an der aktiven Spule elektronisch weiterverarbeitet und durch Gleichrichtung sowie Verstärkung in ein empfindlicheres Signal überführt.

Der Zusammenhang zwischen Frequenz und statischem Magnetfeld (Gl. 7) ermöglicht prinzipiell die Aufnahme eines ESR-Spektrums auf zwei verschiedene Arten:

1. Die HF-Frequenz wird variiert, während das statische Feld konstant bleibt. Dies wird im Vorversuch realisiert, bei dem der Kondensator des passiven HF-Kreises effektiv die Rolle des statischen Feldes übernimmt.
2. Die HF-Frequenz wird konstant gehalten, während das äußere Magnetfeld durchfahren wird. Analog zum Vorversuch entspräche dies einer periodischen Verstellung des Drehkondensators des HF-Kreises.

Es gibt jedoch einen wichtigen elektronischen Grund, weshalb die zweite Methode bevorzugt wird. Der Nachweis schwacher Signale erfordert einen optimierten elektronischen Aufbau, der in der Regel nur in einem engen HF-Frequenzbereich realisierbar ist. Für die Feldsweep-Methode ist das zeitabhängige äußere Magnetfeld gegeben durch:

$$B(t) = B_0 + B_{\text{mod}} \sin(\omega_{\text{mod}} t) \quad (11)$$

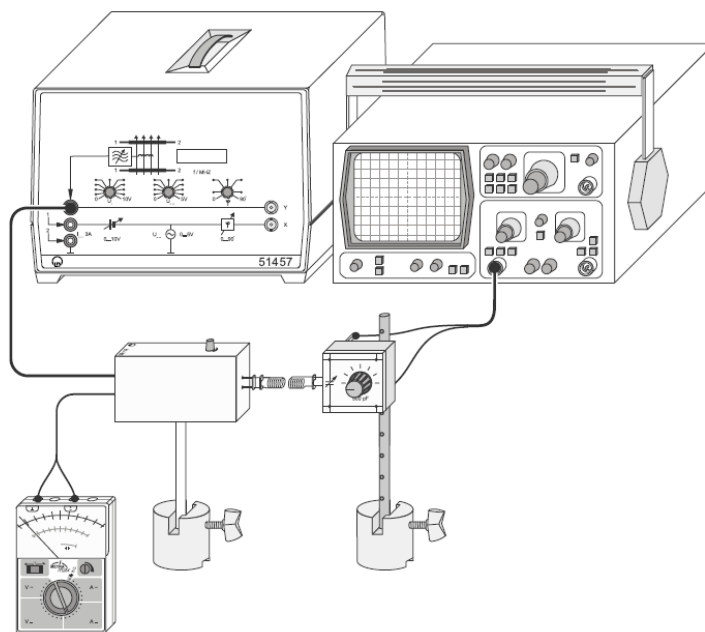


Abb. 4: Prinzipieller Aufbau zur Messung der Resonanzabsorption in einem passiven HF-Kreis (rechte Seite). Alle Komponenten sind auf einer optischen Bank montiert.

Dies wird durch Überlagerung eines Wechselstroms I_{mod} mit der Frequenz $f_{\text{mod}} = 50 \text{ Hz}$ auf den konstanten Spulenstrom realisiert. Das resultierende Magnetfeld B setzt sich somit aus dem statischen Feld B_0 und einer 50 Hz-Modulationskomponente B_{mod} zusammen.

Das aufbereitete Messsignal wird bezüglich der HF-Komponente gleichgerichtet, bleibt jedoch mit der Frequenz ω_{mod} moduliert. Es erreicht den Ausgang des Steuergerätes mit einer zeitlichen Verzögerung relativ zum modulierten Magnetfeld. Diese Verzögerung kann im Steuergerät als Phasenverschiebung kompensiert werden. Ein Zweikanal-Oszilloskop im XY-Betrieb stellt das Resonanzsignal (Y -Kanal \sim Spannung an der aktiven Spule) als Funktion der Magnetfeldmodulation (X -Kanal $\sim I_{\text{mod}}$) dar. Die Resonanzsignale für verschiedene Bedingungen sind in Abb. 6 gezeigt. Wenn das statische Feld B_0 die Resonanzbedingung (Gl. 7) erfüllt und die Phasenverschiebung φ zwischen Resonanzsignal und moduliertem Magnetfeld korrekt kompensiert ist, ergibt sich ein symmetrisches Resonanzsignal (siehe Abb. 6d).

4.3 Helmholtzspulen

Zwei koaxiale Kreisspulen mit Radius r , die im Abstand r zueinander angeordnet sind, werden als Helmholtz-Spulenpaar bezeichnet. Eine solche Anordnung wird häufig zur Erzeugung eines besonders homogenen Magnetfeldes verwendet. Im Zentrum der Spulen verschwinden sowohl die erste als auch die zweite Ableitung des Magnetfeldes in axialer Richtung, was eine direkte Folge des gewählten Spulenabstands ist.

Bezeichnet n die Windungszahl jeder Spule und I den durch die Spulen fließenden Strom, so ergibt sich das Magnetfeld B im Zentrum zu

$$B = \mu_0 \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{n}{r} \cdot I \tag{12}$$

mit $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$. Für die in diesem Experiment verwendeten Spulen gilt $n = 320$ und $r = 6,8 \pm 0,1 \text{ cm}$.

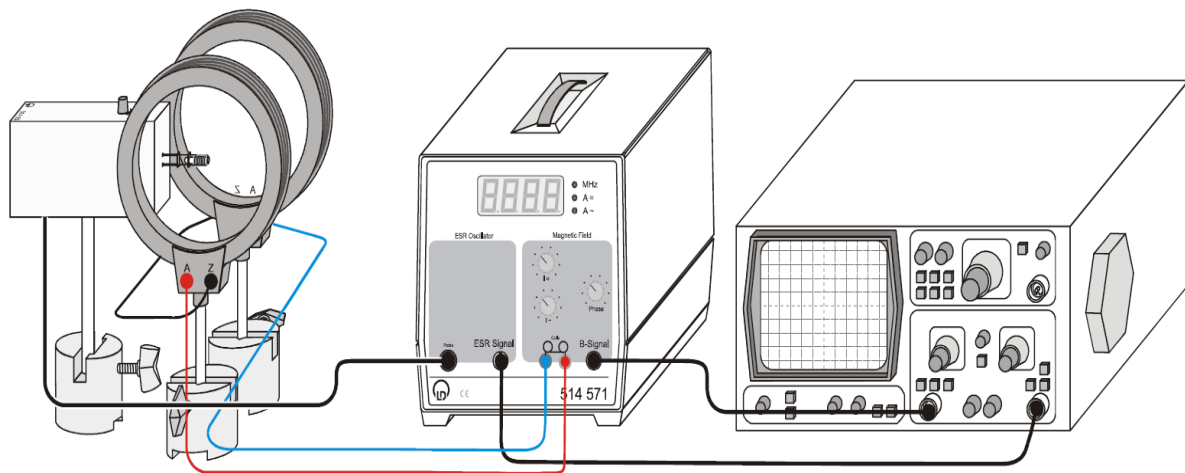


Abb. 5: Versuchsaufbau zur Elektronenspinresonanz an DPPH.

5 Versuchsdurchführung

5.1 Klassische Resonanzabsorption an einem passiven HF-Kreis

- Schließen Sie das ESR-Grundgerät an die Stromversorgung an und stellen Sie es auf maximale Empfindlichkeit ein.
- Verbinden Sie den Stromausgang (neben der Empfindlichkeitsregelung) über einen Widerstand von $56\text{ k}\Omega$ (blaues Modul) mit einem Gleichspannungsvoltmeter.
- Ordnen Sie die aktive und passive Spule auf der optischen Bank einander gegenüber mit einem Abstand von etwa 2 mm an (siehe Abb. 4).
- Stellen Sie den Drehkondensator des passiven HF-Kreises auf $3/6$ seines maximalen Wertes ein und setzen Sie die große Spule in das Grundgerät ein.
- Messen Sie die Spannung U_2 an der passiven Spule mit dem Oszilloskop sowie die gleichgerichtete Spannung U_1 an der aktiven Spule mit dem Voltmeter jeweils als Funktion der Frequenz.
- Wiederholen Sie die Messung von U_1 ohne die passive Spule.
- Wiederholen Sie die oben genannten Messungen bei einer Einstellung des Drehkondensators auf $2/6$ seines maximalen Wertes.
- Tragen Sie alle vier $U(f)$ -Kurven in ein gemeinsames Diagramm ein und diskutieren Sie die Ergebnisse.

5.2 Bestimmung des Resonanzmagnetfeldes B_0

- Installieren Sie die Steckspule für den Bereich $15\text{--}30\text{ MHz}$ (die größte der drei) und setzen Sie die DPPH-Probe **sorgfältig** so ein, dass sie sich im Zentrum befindet.
- Schalten Sie das ESR-Grundgerät ein und positionieren Sie die Steckspule mit der Probe im Zentrum der Helmholtzspulen (siehe Abb. 7).

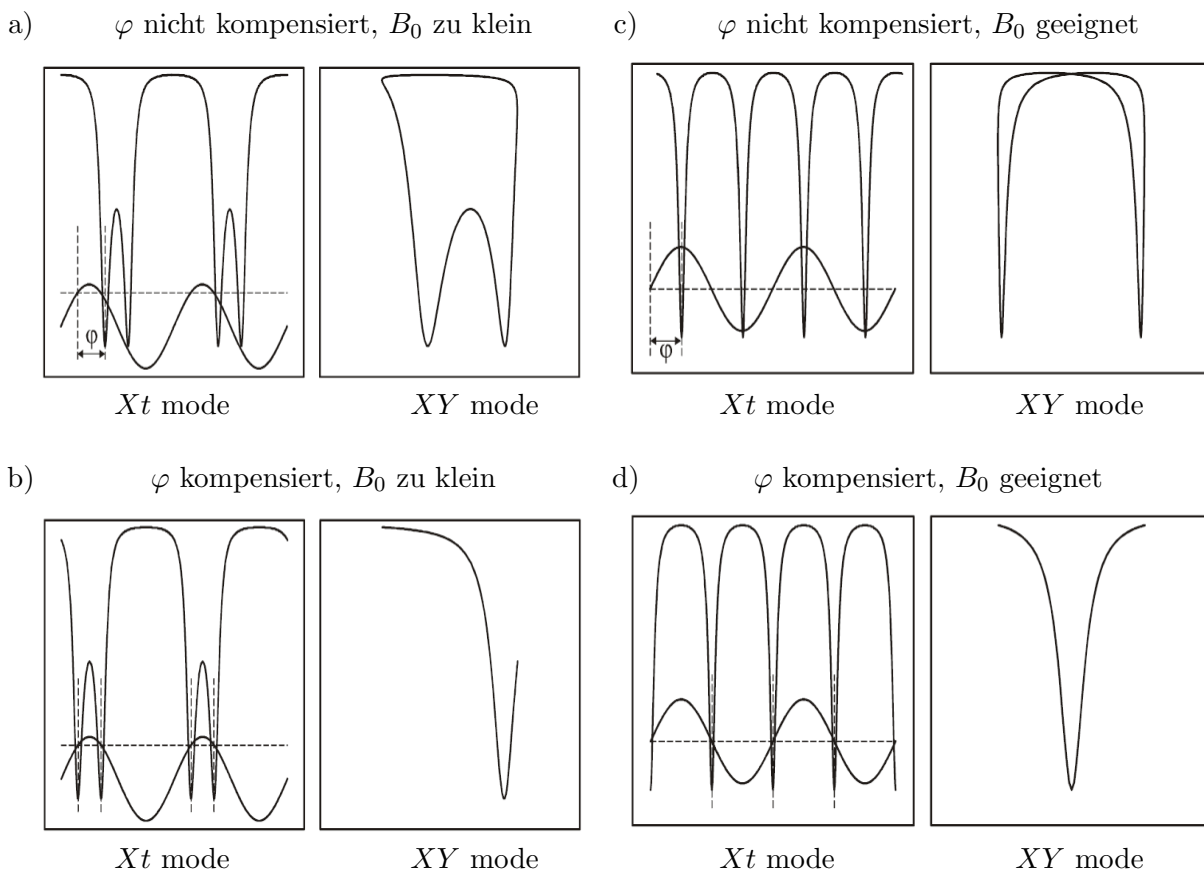


Abb. 6: Oszilloskopdarstellung des ESR-Signals (Y bzw. Kanal II) und des modulierten Magnetfeldes (X bzw. Kanal I). Links: Zweikanaldarstellung mit DC-gekoppeltem Kanal I. Rechts: XY-Darstellung mit AC-gekoppeltem Kanal I. (a) Phasenverschiebung ϕ nicht kompensiert, statisches Feld B_0 zu klein; (b) Phasenverschiebung ϕ kompensiert, statisches Feld B_0 zu klein; (c) Phasenverschiebung ϕ nicht kompensiert, statisches Feld B_0 geeignet; (d) Phasenverschiebung ϕ kompensiert, statisches Feld B_0 geeignet

- Stellen Sie die Resonanzfrequenz mittels Frequenzregler auf $\nu = 15$ MHz ein.
- Stellen Sie die Modulationsamplitude I_{mod} auf einen mittleren Wert ein.
- Stellen Sie den Phasenregler auf die rechte Endposition ein.
- Wählen Sie am Oszilloskop den Zweikanalbetrieb (Dual-Modus, Zeitbasis 2 ms/cm, Amplituden I und II: 0,5 V/cm, AC-Kopplung).
- Stellen Sie am Steuergerät $A_{=}$ ein, was dem Strom I_0 entspricht. Erhöhen Sie I_0 langsam, bis die Resonanzsignale gleichmäßig beabstandet sind (siehe Abb. 6). Bei 15 MHz tritt dies typischerweise bei etwa 0,13 A auf.
- Schalten Sie das Oszilloskop in den XY-Modus und justieren Sie die Phase so, dass die beiden Resonanzsignale zur Deckung kommen (siehe Abb. 6 a \rightarrow b).
- Erhöhen Sie den Strom I_0 weiter, bis das Resonanzsignal symmetrisch wird (siehe Abb. 6 b \rightarrow d). Verwenden Sie dabei den kleinstmöglichen Modulationsstrom I_{mod} .
- Tragen Sie den Strom I_0 zusammen mit der Resonanzfrequenz ν in eine Tabelle ein.

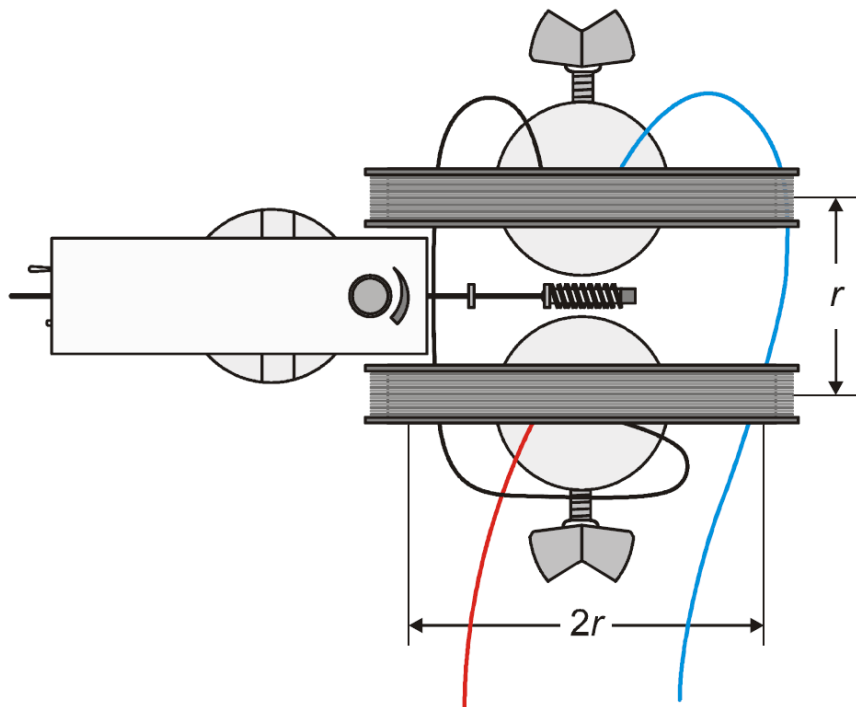


Abb. 7: Anordnung der Helmholtzspulen in Draufsicht.

- Erhöhen Sie die Frequenz ν in Schritten von 5 MHz und stellen Sie jedes Mal durch Erhöhung von I_0 die Resonanzbedingung ein. Notieren Sie alle Werte.
- Fahren Sie bis zu höheren Frequenzen fort, verwenden Sie dabei die entsprechenden Steckspulen (35–75 MHz und 75–130 MHz) und wiederholen Sie die Messungen.

5.3 Bestimmung der Halbwertsbreite δB_0

- Wählen Sie am Oszilloskop den XY-Modus (Kanal II: 0,5 V/cm, AC-Kopplung).
- Stellen Sie die Resonanzbedingung bei $\nu = 50$ MHz erneut ein (mittlere Steckspule).
- Erhöhen Sie den Modulationsstrom I_{mod} , um das Resonanzsignal in X-Richtung zu strecken, und messen Sie die horizontale Spitze-zu-Spitze-Spannung.
- Schalten Sie die Anzeige des Steuergerätes auf A_{\sim} und lesen Sie den Modulationsstrom I_{mod} ab, um die X-Achse zu kalibrieren. Beachten Sie, dass dieser Wert dem Effektivstrom eines sinusförmigen Signals entspricht.
- Erhöhen Sie die horizontale Empfindlichkeit (z. B. auf 0,2 V/cm) und bestimmen Sie die Halbwertsbreite (FWHM) des Resonanzsignals. Da der Cursor im XY-Modus nicht verfügbar ist, bestimmen Sie die Breite durch horizontales Verschieben des Signals und Ablesen der entsprechenden Werte.

6 Auswertung

- Tragen Sie die Spannungen an der aktiven und passiven Spule als Funktion der HF-Frequenz (einschließlich der Referenzmessungen) auf und bestimmen Sie die Resonanzfrequenzen. Stimmen diese mit der Änderung der Kapazität überein? Schätzen Sie die Induktivität der passiven Spule ab.

- Tragen Sie die Resonanzfrequenz als Funktion des Resonanzmagnetfeldes auf und bestimmen Sie den *Landé-g*-Faktor.
- Berechnen Sie die Linienbreite (in Einheiten von Tesla und Hertz) sowie die Lebensdauer der angeregten Spinzustände.

7 Messunsicherheiten

Für die Bestimmung des *Landé*-Faktors und der Linienbreite sind sowohl systematische als auch statistische Unsicherheiten zu berücksichtigen. Tragen Sie in das Diagramm zur Bestimmung des *Landé*-Faktors zusätzlich Kurven ein, die die maximalen und minimalen systematischen Abweichungen repräsentieren.

Zur Abschätzung der systematischen Unsicherheiten verwenden Sie die folgenden Herstellerangaben:

ESR-Grundgerät LD 514 571	$\Delta\nu$	\leq	0,1MHz (bestätigt mit HM8021-3)
	ΔI_{DC}	$=$	$0,01 \cdot I + 1$ digit
	ΔI_{AC}	$=$	$0,02 \cdot I + 1$ digit
Oszilloskop Tektronix TDS 2012B	ΔU	$=$	$0,03 \cdot U + 0,1 \cdot \text{div} + 1$ mV (vertikale Position = 0)
	ΔU	$=$	$0,03 \cdot U + 0,2 \cdot \text{div} + 7$ mV (vertikale Position \neq 0)

Zur Abschätzung der statistischen Unsicherheiten von Oszilloskopmessungen ist die 8-Bit-Digitalisierung des gesamten Bildschirmbereichs als minimale Unsicherheit zu berücksichtigen.

8 Fragen zum Versuch

- Warum ist die Resonanzfrequenz vom Magnetfeld abhängig?
- Welchen Zweck hat die Überlagerung des statischen *B*-Feldes mit einem Wechsellmagnetfeld?
- Was bedeutet Resonanzabsorption, und wie kann sie in diesem Experiment nachgewiesen werden?
- Wie äußert sich der Effekt der Resonanzabsorption in Abb. 5d?
- Schlagen Sie ein Experiment zur Bestimmung des Erdmagnetfeldes mittels ESR vor.
- Warum werden Pulverproben verwendet?

Autorschaft

Diese Anleitung wurde in ihrer ursprünglichen Form von R. Sarkar erstellt. Nachfolgende Überarbeitungen werden durch die Praktikumsleitung durchgeführt.

Literatur

- [1] URL: <http://physics.nyu.edu/~physlab/Classical%20and%20Quantum%20Wave%20Lab/Electron%20Spin%20Resonance%202001-26-2010.pdf>.
- [2] URL: <https://www.ld-didactic.de/documents/en-US/EXP/P/P6/P6262v1e.pdf>.