

Versuch A6

„Paramagnetische Elektronenresonanz“

Matthias Kreier
Martin Mücke

25. November 2002

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
2	Versuchsdurchführung	2
2.1	Aufbau der Messanordnung	2
2.2	Paramagnetische Resonanzabsorbtion von MnSO_4	3
2.3	Berechnung des Landé-Faktors g	6
A	Anhang	7

Literatur

- [1] A. Frieser: 'Mikrowellenmesstechnik'. Akademie-Verlag, 1965
- [2] F. Schneider, M. Plato: 'Elektronenspinresonanz'. Verlag Karl Thiemig, 1971
- [3] Haken, Wolf: 'Atom- und Quantenphysik'. Springer-Verlag, 1990
- [4] H. Stöcker: 'Taschenbuch der Physik'. Verlag Harri Deutsch, 1994
- [5] Institut für Physik: 'Skript zum physikalischen Praktikum - Einführung'

1 Einleitung

Als Elektronenspinresonanz bezeichnet man Übergänge zwischen Energieniveaus mit gleicher Hauptquantenzahl n , deren Entartung durch ein äußeres Magnetfeld aufgehoben wird und die durch verschiedene Werte der magnetischen Quantenzahl m charakterisiert sind. Die Auswahlregel für magnetische Dipolübergänge zwischen diesen Niveaus lautet $\Delta m = \pm 1$, wobei das positive Vorzeichen für die (mikrowellen-) optische Anregung und das negative für die Emission elektromagnetischer Strahlung steht. Betrachtet man das magnetische Moment des Elektrons aufgrund seines Spins in einem homogenen Magnetfeld B

$$\mu_s = \sqrt{s(s+1)} \mu_B g_s \quad (1)$$

mit der möglichen Komponente in der Vorzugsrichtung z von B

$$(\mu_s)_z = \pm \frac{1}{2} g_s \mu_B, \quad (2)$$

dann unterscheidet sich die potentielle Energie für diese beiden Orientierungen um den Betrag

$$\Delta E = g_s \mu_B B_o. \quad (3)$$

Durch Einstrahlen elektromagnetischer Wellen der Frequenz ν , die der Bedingung

$$\Delta E = h\nu = g_s \mu_B B_o \quad (4)$$

genügt, können Übergänge zwischen den beiden Zuständen induziert werden. Im semiklassischen Modell, das von diskreten Einstellungsmöglichkeiten des Spins im Feld B ausgeht, entspricht der Übergang unter der Bedingung (4) einem Umklappen des Elektronenspins von der einen Einstellungsmöglichkeit in die andere.

Wählt man technisch leicht realisierbare Magnetfelder in der Größenordnung von 0.1 bis 1 T, so benötigt man Frequenzen im GHz-Bereich (\rightarrow Mikrowellen). Die Elektronenspinresonanz wird u.a. angewandt zur präzisen Bestimmung des g -Faktors vom Elektron bzw. von Atomen allgemein und zur Untersuchung paramagnetischer Zustände [3].

2 Versuchsdurchführung

2.1 Aufbau der Messanordnung

Zwischen den beiden Polen eines Elektromagneten ist ein Hohlraumresonator angeordnet, der auf die Frequenz des Klystrons abgestimmt wird, und in dem sich die zu untersuchende Messprobe befindet. Ändert man die magnetische Flussdichte so, dass die Mikrowellenfrequenz gleich der Larmorfrequenz ist, sollte eine Änderung des Absorptionsverhaltens zu beobachten sein. Im Resonanzfall muss die Absorption des Hohlraumresonators daher maximal werden. Die Messung des Absorptionsverhaltens gelingt mit Hilfe des Verfahrens der „differentiellen Abtastung“, das Messwerte für die Ableitung der Absorptionskurve beim jeweiligen Magnetfeld B liefert. Die Bestimmung der Nullstelle B_o anhand der graphischen Darstellung $\frac{dA}{dB} = f(B)$ führt dann zum Wert der magnetischen Flussdichte im Resonanzfall.

Dieses Verfahren soll nachfolgend etwas detaillierter beschrieben werden. Überlagert man dem statischen Magnetfeld ein niederfrequentes Magnetfeld kleiner Amplitude, so führt dies zu einer Modulation der Amplitude der vom Hohlraumresonator reflektierten Mikrowelle und dementsprechend zu

einem Wechselstromsignal am Detektor 3. Durch Vergleich der entsprechenden Wechselspannung mit einer Referenzwechselspannung (\rightarrow vom Frequenzgenerator für das niederfrequente Magnetfeld) an einem phasenempfindlichen Gleichrichter erhält man die Ausgangsgleichspannung U_- . Diese ist abhängig von der Amplitude der Eingangswchselspannung und dem Phasenwinkel zwischen den beiden verglichenen Spannungen. Man kann zeigen, dass U_- identisch ist mit der Ableitung $\frac{dA}{dB}$.

Für eine genauere Darstellung der Messapparatur soll an dieser Stelle auf das Blockschaltbild auf Seite 7 verwiesen werden.

Abstimmvorgang

Bevor eine Messung mit unserer Anordnung möglich wird, muss das Klystron zunächst auf die Eigenfrequenz des Hohlraumresonator abgestimmt werden. Dazu sucht man zuerst durch Regeln der Reflektorspannung eine geeignete Schwingungsmode des Klystrons (vgl. Versuch Mikrowellen) und stellt das Signal durch Bedienen der Abstimm- und Dämpfungselemente des Hohlleitersystems solange ein, bis man einen möglichst stabilen sinusähnlichen Verlauf erhält. Anschließend variiert man die Länge des Hohlraumresonators mit einer Mikrometerschraube, bis das Signal, abgesehen von einem Rauschsignal, verschwindet. Damit ist der Hohlraumresonator auf die Klystronfrequenz abgestimmt, d.h. dessen Absorption ist, unabhängig von der Messprobe, maximal. Abschließend ist dann die Frequenzstabilisierung am Klystron einzuschalten.

2.2 Paramagnetische Resonanzabsorption von $MnSO_4$

Durch die Änderung des Spulenstromes I lässt sich die Größe des Magnetfeldes variieren und über eine vorgegebene Interpolationsformel berechnen. Diese lautet

$$B_i = a_i + b_i I + c_i I^2 \quad (5)$$

mit den Koeffizienten

$$\begin{array}{ll} \text{fallend} & \begin{array}{l} a_f = -0.0014 T \\ b_f = +0.1291 \frac{T}{A} \\ c_f = -0.005 \frac{T}{A^2} \end{array} & \text{steigend} & \begin{array}{l} a_s = -1.196 \cdot 10^{-4} T \\ b_s = +0.112 \frac{T}{A} \\ c_s = -8.983 \cdot 10^{-4} \frac{T}{A^2} \end{array} \end{array} .$$

Dabei ist zwischen steigendem und fallendem Spulenstrom zu unterscheiden, weil der Effekt der Hysterese berücksichtigt werden muss. Die Hysterese beschreibt die nichtlineare Abhängigkeit der Magnetisierung des Weißschen Magneten von den vorangegangenen Zuständen [4, S.782]. Dies lässt sich anhand der Hystereseurve veranschaulichen, welche die Magnetisierung der Probe als Funktion des äußeren Magnetfeldes darstellt.

Trägt man nun die Ableitung $\frac{dA}{dB}$ gegen das Magnetfeld B auf, so ergeben sich die in den Abbildungen 1-4 dargestellten Messkurven. Die Nullstellen B_o lassen sich berechnen, indem man den graphischen Verlauf in der Umgebung von B_o durch eine lineare Funktion

$$g(B) = a B + b \quad (6)$$

approximiert. Dabei können die Parameter a und b mit Hilfe der linearen Regression [5, S.33/34] bestimmt werden, so dass für B_o schließlich folgt:

$$B_o = -\frac{b}{a} \pm \left(\frac{\partial B}{\partial I} u_I \right), \quad (7)$$

wobei für den Spulenstrom ein relativer Größtfehler von 2% anzunehmen ist, der sich aus den an der digitalen Anzeige erkennbaren zufälligen Schwankungen und dem Messgerätefehler ergibt. Die Auflistung der einzelnen Werte erfolgt in Tabelle 1 auf Seite 6.

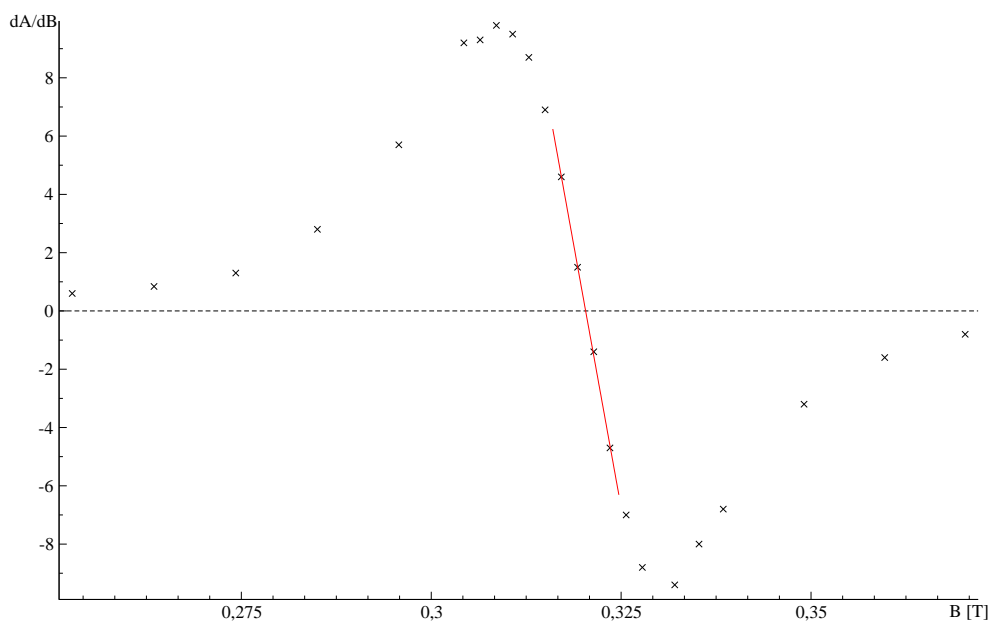


Abbildung 1: Die Ableitung der Resonanzabsorption als Funktion der magnetischen Feldstärke bei steigendem Spulenstrom (Messreihe 1) einschließlich Regressionsgerade nahe dem Nulldurchgang

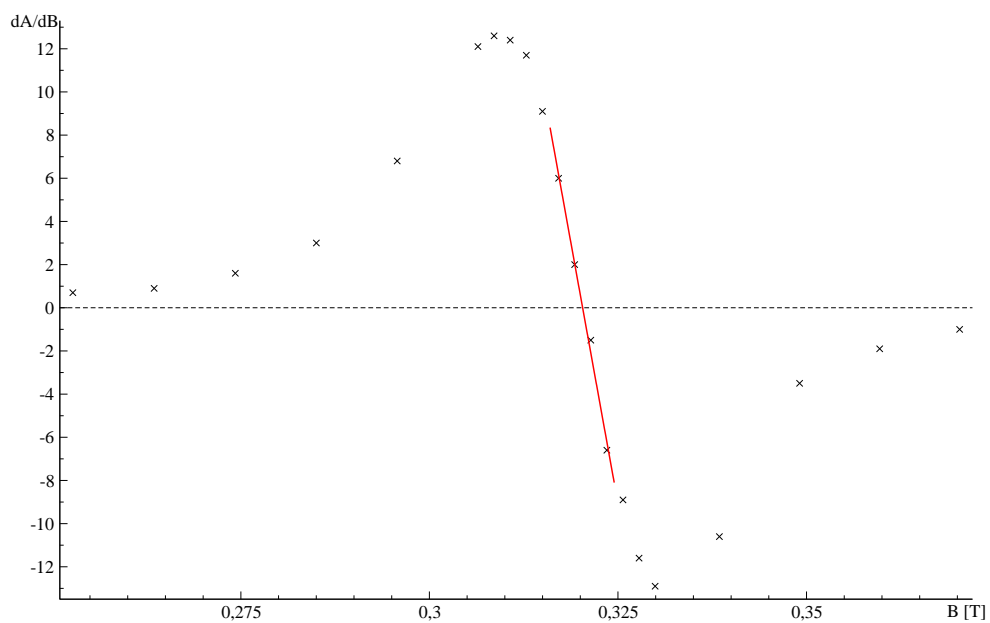


Abbildung 2: Die Ableitung der Resonanzabsorption als Funktion der magnetischen Feldstärke bei steigendem Spulenstrom (Messreihe 2) einschließlich Regressionsgerade nahe dem Nulldurchgang

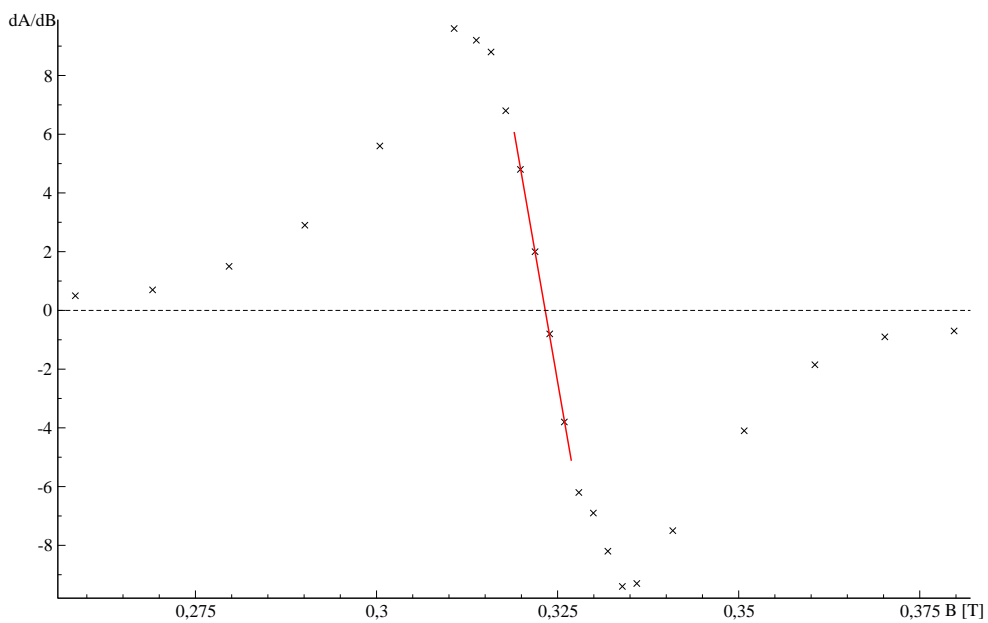


Abbildung 3: Die Ableitung der Resonanzabsorption als Funktion der magnetischen Feldstärke bei fallendem Spulenstrom (Messreihe 1) einschließlich Regressionsgerade nahe dem Nulldurchgang

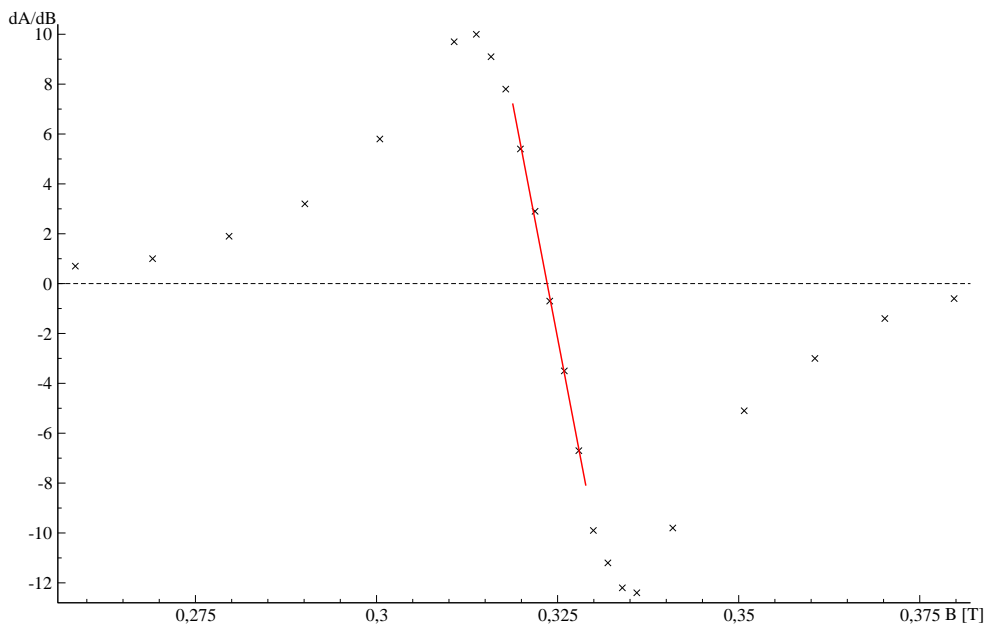


Abbildung 4: Die Ableitung der Resonanzabsorption als Funktion der magnetischen Feldstärke bei fallendem Spulenstrom (Messreihe 2) einschließlich Regressionsgerade nahe dem Nulldurchgang

Reproduzierbarkeit der Messungen

Unsere Ergebnisse zeigen zwar keinerlei auffällige Schwankungen, jedoch hängt die Genauigkeit der Messung sehr stark von der Qualität der Abstimmung ab. Da nicht anzunehmen ist, dass jeder Abstimmvorgang die gleiche Frequenzstabilität liefert, gehen wir bei dieser Messanordnung nur von einer hinreichend guten Reproduzierbarkeit der Messergebnisse aus. Der Vergleich mit anderen Paktikumsgruppen bestätigt diese These, da Landé-Faktoren von $1.9 < g < 2.1$ gemessen werden.

2.3 Berechnung des Landé-Faktors g

Der Landé-Faktor g kann nun durch Umstellen von Gleichung (4) berechnet werden. Der Fehler setzt sich zusammen aus den Messfehlern von ν und B_o und lässt sich durch Anwendung des Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetzes bestimmen.

$$\begin{aligned}
 g &= \frac{h\nu}{\mu_B B_o} \pm \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial B_o} u_{B_o}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial \nu} u_\nu\right)^2} \\
 &= \frac{h}{\mu_B B_o} \left(\nu \pm \sqrt{\frac{\nu^2}{B_o^2} u_{B_o}^2 + u_\nu^2} \right)
 \end{aligned} \tag{8}$$

Der Messfehler der Frequenz ν resultiert aus dem systematischen Fehler der Bügelmessschraube vom Wellenmesser, der mit $5 \mu m$ abgeschätzt werden kann [5, S.14] und in der Eichkurve einer Frequenzunsicherheit von $u_\nu \simeq 0.01 \text{ GHz}$ entspricht.

Messreihe	$a [T^{-2}]$	$b [T^{-1}]$	$B_o [T]$	$\nu [GHz]$	Landé-Faktor g
1 (fallend)	-1417.2	458.2	0.3233 ± 0.0057	9.055 ± 0.01	2.001 ± 0.035
2 (fallend)	-1517.8	491.1	0.3236 ± 0.0057	9.065 ± 0.01	2.002 ± 0.035
1 (steigend)	-1442.8	462.2	0.3203 ± 0.0064	9.055 ± 0.01	2.020 ± 0.040
2 (steigend)	-1934.6	619.7	0.3203 ± 0.0064	9.065 ± 0.01	2.022 ± 0.040

Tabelle 1: Ergebnisse der lin. Regression nahe B_o und die Berechnung von g nach (8)

Es ist festzustellen, dass die aus den Messungen mit fallendem Magnetfeld berechneten Landé-Faktoren sich von denen mit steigendem Magnetfeld unterscheiden. Dieses Ergebnis überrascht zunächst, da man am ehesten zwischen den Messreihen 1 bzw. 2 zu unterscheiden gedacht hätte, es hat aber eine erklärbare Ursache. Bedingung für die Interpolationsformel (Gl. (5)) für fallendes Magnetfeld ist eine Verkleinerung des Spulenstromes von $4.07A$ auf $0A$. Unser Fehler bei der Durchführung der Messung bestand darin, dass wir den Strom für steigendes Magnetfeld nur bis $3.5A$ haben ansteigen lassen und an diesem Punkt mit der Untersuchung der Absorption für fallendes Magnetfeld begonnen haben. Da der Magnetisierungszustand des Weißschen Magneten bei $I = 3.5A$ ein anderer ist als bei $I = 4.07A$, sollte im Allg. die Hysteresekurve beim Zurückfahren des Spulenstromes eine andere Form besitzen. Dementsprechend gelten die Parameter der vorgegebenen Interpolationsformel nicht für die beiden von uns durchgeführten Messungen bei fallendem Spulenstrom.

Abschließend kann der Mittelwert der beiden Landé-Faktoren $g_{i=1,2}^{(s)}$ aus den Messungen mit steigender Stromstärke gebildet werden. Als Endergebnis erhält man

$$g = 2.02 \pm 0.04 .$$

Dieser Wert entspricht mit hinreichender Genauigkeit dem von der Theorie vorhergesagten g -Faktor des Elektrons $g = 2.0023$.

A Anhang

Abbildung 5: Blockschaltbild der verwendeten Apparatur

