

PD Para- und Diamagnetismus

1. Motivation

In diesem Versuch soll das Verhalten von Materie im äußeren Magnetfeld untersucht werden. Kräfte, die auf paramagnetische (FeCl_3 und Pd) und diamagnetische Stoffe (Bi) in homogenen und inhomogenen Magnetfeldern wirken, werden mit verschiedenen Methoden gemessen. *Bei diesem Versuch empfiehlt es sich, einen eigenen Laptop mitzubringen, damit die Kräfte auf die verschiedenen Probekörper mit dem System CASSY gemessen werden können. Die Software können Sie unter www.la-systeme.de herunterladen und vor dem Versuch auf Ihrem Laptop installieren.*

2. Literatur

- Materie im Magnetfeld (Demtröder Kap. 3.5, Otten Kap. 23)
- Magnetische Materialien (Gerthsen Kap. 7.4)

Fragen zur Vorbereitung:

- Was sind magnetisches Moment, Magnetisierung, magnetische Feldstärke und magnetische Induktion wie hängen sie zusammen?
- Was versteht man unter magnetischer Permeabilität, magnetischer Suszeptibilität und Massensuszeptibilität?
- Welche Kräfte wirken auf magnetische Dipole im magnetischen Feld?
- Geben Sie eine mikroskopische Erklärung für das para- bzw. diamagnetische Verhalten von Materie im Magnetfeld.
- Was versteht man unter Ferromagnetismus, was unterscheidet ihn vom gewöhnlichen Paramagnetismus? Was sind Antiferromagnetismus und Ferrimagnetismus?
- Wie können homogene bzw. inhomogene Magnetfelder erzeugt werden?
- Erklären Sie das physikalische Prinzip einer Hall-Sonde!

3. Versuchsprinzip

Grundlage des Versuchs ist die Kraftwirkung magnetischer Felder auf Materie. Im ersten Teil des Versuches wird die Suszeptibilität von FeCl_3 und Pd bzw. Al bestimmt. Dazu wird die Kraft gemessen, die ein homogenes Magnetfeld variabler Stärke auf einen Quader bzw. Zylinder ausübt, der teilweise in das Feld hineinragt (Methode nach Gouy). Die Stärke des magnetischen Felds wird gleichzeitig mit einer Hall-Sonde ermittelt.

Im zweiten Teil des Versuches wird die Kraftwirkung auf eine Bismutprobe in einem inhomogenen Magnetfeld untersucht (Faraday-Methode). Dazu muss zunächst das Magnetfeld mit Hilfe einer Hallsonde ortsabhängig gemessen werden.

4. Messungen

ACHTUNG! Ziehen Sie niemals Kabel ab, während Strom durch die Spulen fließt! Hin-gegen können Sie gefahrlos das Magnetstromversorgungsgerät auch bei maximalem Strom aus- bzw. wieder einschalten.

Vorbereitung

- Spannen Sie die Polschuhe mit einem Abstand von 9.5 mm so ein, dass ein homogenes Magnetfeld erzeugt wird. Ein passender PVC-Abstandshalter liegt am Platz.
- Drehen Sie die Wasserkühlung für die Spulen auf (ca. 1-2 l/min).
- Schalten Sie das Magnetstromversorgungsgerät ein (strombegrenzender Betrieb).
- Entmagnetisieren Sie die Polschuhe vor Beginn jeder Messreihe *mit homogenem Feld!* Dazu legen Sie (durch Umpolen der Kabel) ein Gegenfeld von ca. 50-100 mT so an, dass die Remanenz kleiner 0.5 mT ist.

Aufgaben

1. Messung der Kraft auf Pd oder Al im homogenen Feld

- Bauen Sie den Kraftsensor (Mod. 520060) und den Magnetfeldsensor (Mod. 5240381) von Leybold Didactic auf und schließen Sie beide an das CASSY-System an.
- Hängen Sie entweder den Aluminiumklotz oder mehrere Pd-Drähte (Abmessungen mit Plastik-Schieblehre bestimmen!) entsprechend Abb. PD.1(a) so auf, dass das untere Ende der Probe im homogenen Teil des Magnetfelds endet. (Warum ist das wichtig?)
- Justieren Sie den Kraftsensor so, dass die Probe frei zwischen den Polschuhen hängt.
- Montieren Sie die Hallsonde so, dass sich die vordere (tangential) Sonde im homogenen Magnetfeld befindet.
- Messen Sie die Kraft in Abhängigkeit von der Magnetfeldstärke. Gehen Sie dabei folgendermaßen vor:
 - Wählen Sie für alle Kraftmessungen den empfindlichsten Messbereich und stellen Sie ein Mittelungsintervall von 1 s ein, da ansonsten der Messwert zu stark schwankt. Belasten Sie den Sensor keinesfalls stärker als mit 3 N!

- Wählen Sie für die B-Feldmessung die tangentielle Sonde mit einem Messbereich bis (zunächst) 100 mT. Achten Sie darauf, dass die Feldlinien senkrecht durch die flache Sonde treten, die sich in der Spitze des Halters als kleiner schwarzer Chip befindet. Entmagnetisieren Sie die Polschuhe.
 - Stellen Sie nach der Entmagnetisierung die Kraftanzeige auf Null sowie den B-Feldmessbereich auf 1 T.
 - Messen Sie die Kurve punktweise in Abständen von ca. 0.5 A. Stellen Sie in CASSY unter „Messparameter“ (zweimal F5 oder Werkzeugsymbol doppelklicken) manuelle Aufnahme ein.
 - Warten Sie nach einer Stromänderung, bis sich ein stabiler Wert der Kraftanzeige einstellt. Nehmen Sie einen Messwert mit F9 (oder Klick auf das Uhren-Icon) auf.
 - Es empfiehlt sich, die Kraft über dem Quadrat der Magnetfeldstärke darzustellen (warum?).
- Falls die Probe während der Messung von einem der Polschuhe angezogen wird, ist meist eine Verunreinigung mit Fe-Staub die Ursache. Reiben Sie in solchem Fall den Draht kräftig mit Papier ab. Lagern Sie auf keinen Fall den Draht zusammen mit Büroklammern o. ä. ferromagnetischem Material!
2. Messung der Steighöhe einer FeCl_3 -Lösung als Funktion der Magnetfeldstärke im homogenen Feld
- **Vorsicht** beim Umgang mit der FeCl_3 -Lösung! Benetzen Sie durch Schwenken das Röhrchen, um Kapillarkräfte zu minimieren.
 - Positionieren Sie das U-Rohr so zwischen den Polschuhen, dass das Ende der Flüssigkeitssäule immer im homogenen Bereich endet (s. Abb. PD.1(b))
 - Messen Sie simultan die magnetische Induktion B mit Hilfe der Hall-Sonde.
 - Messen Sie mit dem Justierfernrohr die Steighöhe bei Stromstärken 0.6 – 5.4 A in Schritten von ca. 0.5 A. Das Fernrohr ist mit einem elektronischen Wegaufnehmer verbunden (Anzeige in mm). Justieren Sie das Fernrohr zuvor (horizontale Ausrichtung, richtige Position des Wegaufnehmers). Das Steuergerät liefert eine Spannung die dem angezeigten Weg proportional ist. Dabei entspricht 1 mm der Anzeige einer Spannung von 10 mV. Damit lässt sich die Steighöhe ebenfalls mit CASSY protokollieren.
3. Bestimmung der Ortsabhängigkeit des inhomogenen Feldes
- Spannen Sie die konische Seite der Polschuhe ein, wiederum mit einem Abstand von 9.5 mm.
 - Eine Entmagnetisierung ist bei den folgenden Messungen nicht mehr nötig. Wieso?
 - Messen Sie bei einem Spulenstrom von 4.2 A das B-Feld in Abhängigkeit von der vertikalen Position x . Variieren Sie dazu die Höhe der Hallsonde in Schritten von 1 mm, beginnend ca. 2 mm über der oberen Polschuhkante bis ca. 20 mm nach innen (s. Abb. PD.1(c)).

- Als Bezugspunkt für das Koordinatensystem empfiehlt sich die obere Polschuhkante, die sich leicht mit dem Fernrohr anvisieren lässt. Die Lage der Hallsonde (im Teleskop an den Lötunkten gut erkennbar) definiert die jeweilige x -Koordinate.
4. Messung der Kraft auf eine Bi-Probe im inhomogenen Feld
- Messen Sie wiederum bei einem Spulenstrom von 4,2 A.
 - Berechnen Sie das Volumen der Bi-Probe ($m = 1,1$ g). Die Dichte von Bismut beträgt $9.78 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.
 - Befestigen Sie die Bi-Probe am Kraftsensor und bringen Sie sie möglichst nahe an die Stelle maximaler Kraft (d.h. maximales $\mathbf{B} \cdot \text{grad B}$) entsprechend Abb. PD.1(d).
 - Bestimmen Sie die Lage des Mittelpunktes der Probe mit Hilfe des Fernrohrs.
 - Messen Sie die Kraft an dieser Stelle mit Hilfe des Kraftsensors: Schalten Sie den Strom aus, stellen Sie Kraftanzeige auf Null und schalten Sie den Strom wieder ein. Notieren Sie die Kraft und wiederholen Sie die Messung mehrmals.

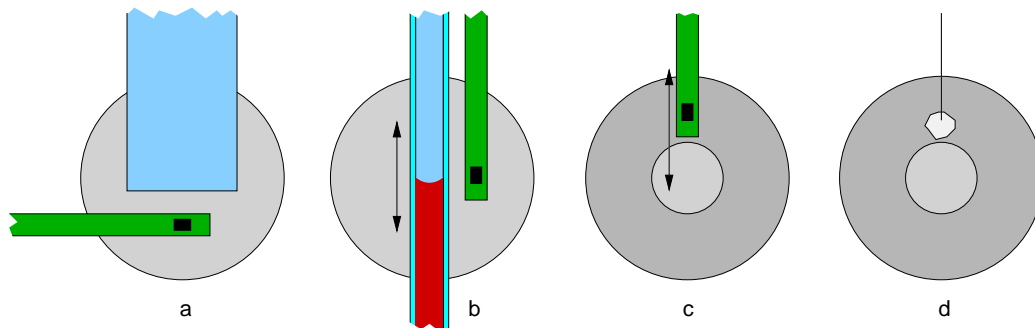


Abbildung PD.1: Anordnung der Proben und der Hallsonde im Magnetfeld: Aluminiumblock (oder Pd-Draht) im homogenen Feld (a), FeCl₃-Lösung im Steigrohr (b), Messung der Ortsabhängigkeit des inhomogenen Felds (c), Kraft auf Bismutprobe (d)

5. Auswertung

1. Zeichnen Sie ein Diagramm der Abhängigkeit der Steighöhe $h(B^2)$ vom Quadrat der magnetischen Induktion für die FeCl₃-Lösung. Bestimmen Sie daraus die Massenssuszeptibilität κ von FeCl₃.
2. Zeichnen Sie ein Diagramm der Abhängigkeit der Kraft $F(B^2)$ des Pd-Drahtes bzw. des Al-Blocks. Bestimmen Sie daraus die Suszeptibilität χ von Palladium bzw. Aluminium. Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit dem Literaturwert. Die Dichte von Pd beträgt $\rho_{\text{Pd}} = 12.1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$, die von Aluminium $\rho_{\text{Al}} = 2.7 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$.

3. Zeichnen Sie in ein gemeinsames Diagramm aus den Messungen der Steighöhe im inhomogenen Feld in Abhängigkeit der vertikalen Position x :
- Die magnetische Induktion $B(x)$.
 - Zeichnen Sie zur Kontrolle auch die Lage der Polschuhe ein.
 - Bestimmen Sie den Feldgradienten $\frac{dB}{dx}$ durch grafische Differentiation! Beachten Sie dabei, dass Ihre Messwerte fehlerbehaftet sind. Streuungen der Messwerte würden sich bei einer Punkt-zu-Punkt-Differentiation aufschaukeln. Aus diesem Grund ist zunächst eine realistische Ausgleichskurve $B(x)$ durch die Messwerte zu zeichnen, von der die Ableitung gebildet wird. Bewährt haben sich hierbei Polynome nicht zu hoher Ordnung als Ausgleichsfunktion, die symmetrisch bezüglich der Polschuhmitte sind.

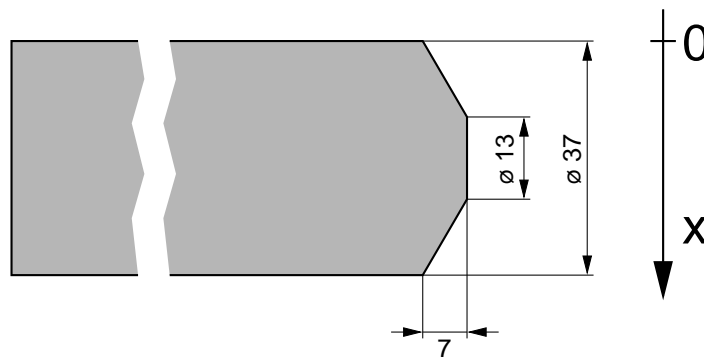


Abbildung PD.2: Gestalt eines Polschuhs, Maßangaben in mm. Linke Seite für homogenes Magnetfeld, rechte Seite für inhomogenes Magnetfeld

4. Man bestimme die Suszeptibilität χ von Bi (Vorzeichen!). Schätzen Sie den Fehler des Messwertes ab!

6. Fragen zur Auswertung

Beantworten Sie die folgenden Fragen schriftlich!

- Wie hängt die Suszeptibilität für para-, ferro- bzw. diamagnetische Stoffe von der Temperatur ab?
- Welche Kraft und welches Drehmoment erfährt ein magnetisches Moment $\vec{\mu}$ in einem inhomogenen Feld \mathbf{B} ?

7. Theoretische Grundlagen

Die Kraft F auf ein Probekörper V endlicher Suszeptibilität χ in einem Magnetfeld ergibt sich aus dem Gradienten der magnetostatischen Feldenergie W in V (unter Annahme der Konstanz von H innerhalb V):

$$W = -\frac{1}{2} \int_V \mathbf{H} \cdot d\mathbf{B} = \frac{\mu_0 V H^2}{2} (1 + \chi)$$

Nimmt man die Vakuumenergiedichte als homogen an, so ergibt sich für die Kraft

$$\mathbf{F} = \text{grad } W = \chi \mu_0 V \mathbf{H} \cdot \text{grad } \mathbf{H}$$

In x -Richtung bedeutet das z.B.

$$F_x = \chi \mu_0 V H \frac{dH}{dx}$$

Damit lässt sich die Suszeptibilität χ von Bismut bestimmen.

Die Kraft auf einen langgestreckten zylindrischen Körper mit dem Querschnitt A im inhomogenen Feld lässt sich durch Integration längs der Zylinderachse berechnen:

$$F = \mu_0 \chi A \int_{x_1}^{x_2} H \frac{dH}{dx} dx = \mu_0 \chi A \int_{H(x_1)}^{H(x_2)} H dH = \frac{\mu_0 \chi A}{2} (H^2(x_2) - H^2(x_1))$$

Liegt das eine Ende des Zylinders außerhalb H , d.h. $H(x_1) = 0$, so erhält man

$$F = \frac{\mu_0 \chi A}{2} H^2(x_2)$$

Man kann auf diese Weise das Feld H an der Stelle x_2 bestimmen, sofern man die Kraft kennt. Beim Pd-Draht bestimmt man sie direkt, während bei der Steighöhenmethode die Kraft auf eine Flüssigkeitssäule aus folgender Beziehung gewonnen wird: Bei eingeschaltetem Feld halten sich die Gewichtskraft F_g auf die Säule, die um die Höhe h über die Referenzfläche gestiegen ist und die magnetostatische Kraft F_m auf die gesamte Flüssigkeit das Gleichgewicht:

$$\begin{aligned} F_g = \rho A h g &= F_m = \frac{\mu_0 \chi A}{2} H^2(x_2) \\ \longrightarrow h &= \frac{\mu_0 H^2 \chi}{2g \rho} \end{aligned}$$

Die Massensuszeptibilität κ ergibt sich dann als

$$\kappa := \frac{\chi}{\rho} = \frac{2gh}{\mu_0 H^2}$$