Praktikum II

PD: Para- und Diamagnetismus

Betreuer: Dr. Torsten Hehl

Hanno Rein
praktikum2@hanno-rein.de

Florian Jessen
florian.jessen@student.uni-tuebingen.de

7. April 2004

Made with LaTeX and Gnuplot

1 Vorwort

2 Grundlagen

2.1 Materie im magnetischen Feld

Es lässt sich in Experimenten leicht bestätigen, dass Materie die Stärke magnetischer Felder $\vec{B}$ verändert. Dies wird durch elementare magnetische Dipole erklärt.

2.1.1 Magnetisches Dipolmoment und Magnetisierung

Das magnetische Dipolmoment $\vec{p}_m$ eines die Fläche $\vec{A}$ umlaufenden Stromes I ist definiert als

$$\vec{p}_n = I \cdot \vec{A} \tag{1}$$

Das Elektron im Atomkern erzeugt im klassischen Sinne einen Kreisstrom. Somit lässt sich auch ein magnetisches Dipolmoment für Atome berechnen.
Als Magnetisierung $\vec{M}$ bezeichnet man die Summe aller magnetischen Momente pro Volumeneinheit, also

$$\vec{M} = \frac{1}{V} \sum_{1}^{n} \vec{p}_m \tag{2}$$

2.1.2 Magnetische Suszeptibilität

Die magnetsiche Suszeptibilität χ ist definiert als der Proportionalitätsfaktor zwischen Magnetisierung M und magnetischer Erregung H:

$$M = \chi \cdot H \tag{3}$$

Dabei ist jedoch zu beachten, dass die magnetische Suszeptibilität im allgemeinen mit steigender Temperatur abnimmt.

- **Diamagnetismus**
  Diamagnetismus tritt bei allen Stoffen auf. Diamagnetische Stoffe besitzen nach außen hin kein permanentes magnetisches Dipolmoment. Die magnetischen Dipole der einzelnen Elektronen heben sich gegenseitig auf. Allerdings kann man auch bei diesen Stoffe eine Reaktion auf ein äußeres magnetisches Feld beobachten. Die Stoffe weichen dem Magnetfeld aus. Dies lässt sich dadurch erklären, dass kurzfristig magnetische Dipole induziert werden, die versuchen ihrer Wirkung entgegen zu wirken. Die Suszeptibilität ist in diesem Fall negativ und nahezu temperaturunabhängig.

- **Paramagnetismus**
  Paramagnetismus entsteht immer dann, wenn es in einem Atom/Molekül ungepaarte Elektronen oder durch Bindungen entstandene ungleichwertige Bahnen gibt. Ohne äußeres Magnetfeld ist die gesammte magnetische Dipolsumme auf Grund von thermischen Bewegungen aber 0. Legt man jedoch ein äußeres Magnetfeld an, so richten sich die Dipole zum Teil aus. Der Körper wird in das Magnetfeld hineingezogen. Paramagnetische Stoffe kann man hinsichtlich ihrer temperaturabhängigen Suszeptibilität nochmals unterteilen:

  - *Pauli-Suszeptibilität*
    Diese paramagnetische Metalle besitzen eine nahezu temperaturunabhängige Suszeptibilität.
  - *Curie*
    Die andere Form des Paramagnetismus zeichnet sich durch die starke Temperaturabhängigkeit aus. Für genügend hohe Temperaturen gilt bei diesen paramagnetischen Stoffen das Curiesche Gesetz:

$$\chi = \frac{C}{T} \tag{4}$$

$$= \frac{\mu_0 n_A (p_m)^2}{3 V_{mol} k_B T} \tag{5}$$

    Die Suszeptibilität ist also umgekehrt proportional zur Temperatur.

- **Ferromagnetismus**
  Bei einem ferromagnetischen Stoff, erfolgt die Ausrichtung der elementaren magnetischen Dipole unterhalb einer bestimmten Temperatur T_C (die sogenannte Curie-Temperatur) spontan, das heißt äußere ohne magnetische Erregung H. Für Temperaturen, die größer sind als die so genannte Curie-Temperatur T_C verhält sich die Suszeptibilität wie bei paramagnetischen Stoffen. Der Ferromagnetismus verschwindet.

$$\chi = \frac{C}{T - T_C} \tag{6}$$

2.1.3 Kraft und Drehmoment im inhomogenen Feld

Ein magnetisches Dipolmoment $\vec{p}_m$ erfährt im Magnetfeld $\vec{B}$ die Kraft

$$\vec{F} = \vec{p}_m \cdot \vec{\nabla}\vec{B} \tag{7}$$

Die Kraft F, die auf Materie des Volumens V mit der Magnetisierung M wirkt, ist somit

$$\begin{aligned} \vec{F} &= V \cdot \vec{M} \cdot \vec{\nabla}\vec{B} && (8) \\ &= \chi \cdot \vec{H} \cdot \vec{\nabla}\vec{B} && (9) \\ &= \frac{\chi}{\mu_0} \cdot \vec{B} \cdot \vec{\nabla}\vec{B} && (10) \end{aligned}$$

Ist die magnetische Suszeptibilität χ negativ, so wird drückt die Kraft den Körper aus dem Feld herraus, ist χ positiv, so wird der Körper hineingezogen. Der Drehmoment $\vec{D}$, der auf das magnetischen Dipolmoment $\vec{p}_m$ einwirkt ist

$$\vec{D} = \vec{p}_m \times \vec{B} \tag{11}$$

2.2 Hall-Effekt

Die Lorentzkraft F_L ist gegeben durch

$$\vec{F}_L = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) \tag{12}$$

Sie bewirkt also eine Ablenkung der Ladungsträger in einem Leiter, die senkrecht zur Stromrichtung und zum magnetischen Feld ist. Durch diese Ablenkung baut sich eine Spannung auf. Dies geschiet solange, bis sich mit dem entsehenden elektrischen Feld E ein Gleichgewicht eingestellt hat. Es ist gilt also im Gleichgewichtszustand für die gemessene Hallspannung U_H:

$$\begin{aligned} \vec{F}_E &= -\vec{F}_L && (13) \\ e \cdot \vec{E} &= -e \cdot (\vec{v} \times \vec{B}) && (14) \\ E &= -v \cdot B && (15) \\ \frac{U_H}{d} &= \frac{I}{b \cdot d \cdot n \cdot e} \cdot B && (16) \\ U_H &= \frac{I \cdot B}{b \cdot n \cdot e} && (17) \end{aligned}$$

Hierbei ist n die Ladungsträgerdichte und b der Leiterdurchmesser. Da Halbleiter eine sehr geringe Ladungsträgerdichte haben werden Hallsonden mit Halbleitern hergestellt.

3 Auswertung

3.1 Massensuszeptibilität von $FeCl_3$

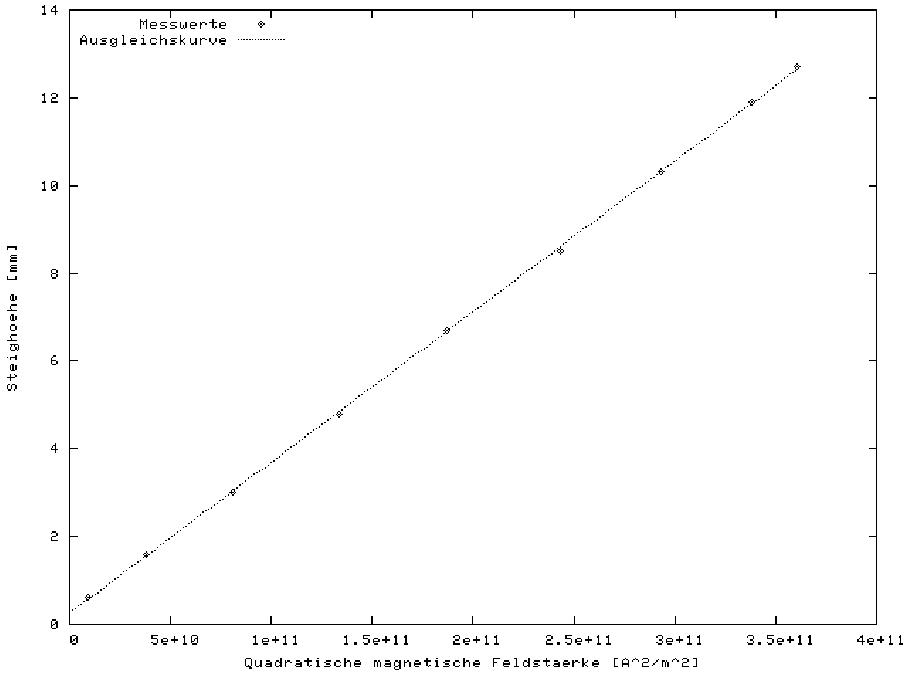

Abbildung 1: Steighöhe in Abhängigkeit von H^2

Aus der Steigung der Ausgleichsgerade ergibt sich folgende Massensuszeptibilität κ von $FeCl_3$:

$$\kappa_{\mathrm{FeCl_3}} = \frac{\chi}{\rho} \quad (18)$$

$$= \frac{2gh}{\mu_0 H^2} \quad (19)$$

$$= (5.36 \pm 0.03) \cdot 10^{-4} \frac{\mathrm{cm}^3}{\mathrm{g}} \quad (20)$$

3.2 Feldvermessung

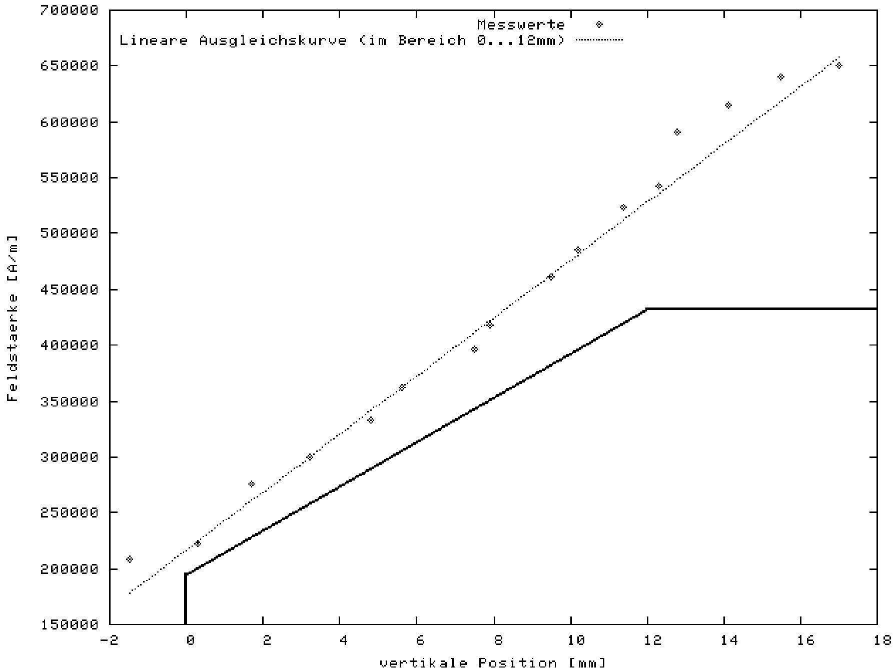

Abbildung 2: Feldverlauf mit Polschuhen

Die Ausgleichskurve wurde in dem für die spätere Berechnung relevanten Bereich von 0 bis 12 mm linear angenähert.

3.3 Suszeptibilität von Palladium

Aus den Messwerten ergibt sich folgender Kurve

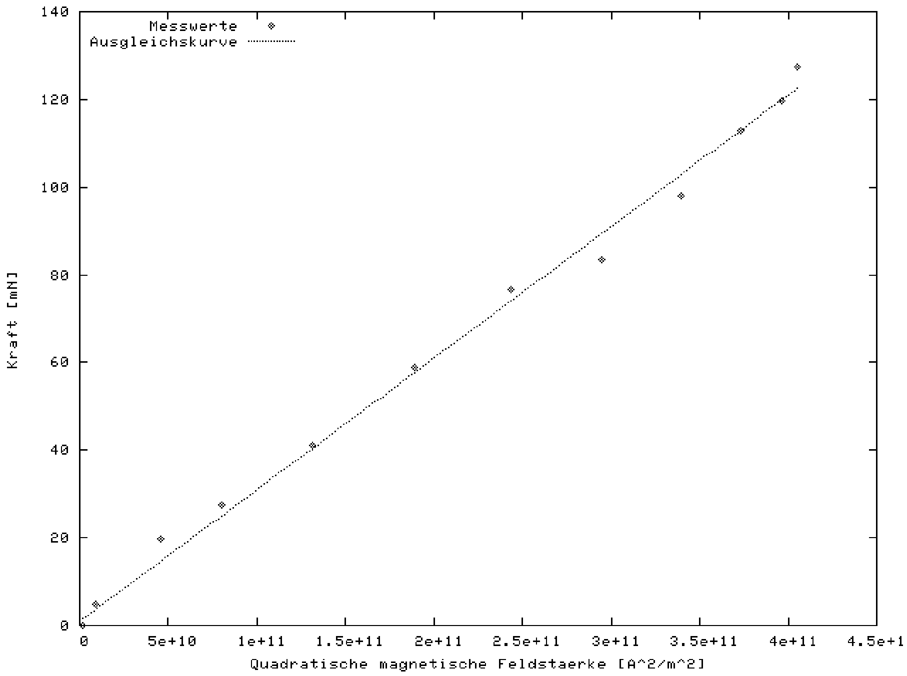

Abbildung 3: Kraft auf Pd-Draht ($\emptyset = 0.8$ mm) in Abhänigkeit von der Stärke des H Feldes

Aus der Steigung der Ausgleichsgeraden kann man die Suszeptibilität des Pd-Drahtes berechnen. Es ist

$$\chi = \frac{2F}{\mu A H(x)^2} = \frac{2}{\mu A} \cdot m \tag{21}$$

$$= 9.50 \cdot 10^{-4} \tag{22}$$

3.4 Suszeptibilität von Bismut

Aus den Messwerten

$$F = -8.91 \cdot 10^{-5} \text{ N} \qquad V = 3.03 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 \qquad H = 5.3 \cdot 10^5 \frac{\text{A}}{\text{m}} \qquad \frac{\text{d}H}{\text{d}x} = 2.59 \cdot 10^7 \frac{\text{A}}{\text{m}^2} \tag{23}$$

ergibt sich die Suszeptibilität χ der Bi-Kugel zu:

$$\chi = \frac{F}{\mu V H \frac{dH}{dx}} = -1.70 \cdot 10^{-4} \tag{24}$$

Der Fehler dieses Wertes setzt sich aus mehrerem Komponenten zusammen. Zum einen sind dies die Messtolleranzen der Geräte, zum anderen aber vor allem die Bestimmung des Kugelvolumens mit der Schieblehre. Dazu wurde die Kugel an mehreren Stellen vermessen und so der Durchmesser auf $3.9 textmm$ abgeschätzt. Das Loch hat vermutlich einen Durchmesser von 1mm und wurde als Zylinder angenähert. Wir bestimmen den Fehler unter der Annahme einer Genauigkeit in der Volumenmessung von $\Delta V = 1 \cdot 10^{-8}$. Aus den Messwerten ergibt sich für die Kraft ein Fehler von $\Delta F = 4.06 \cdot 10^{-6}$

$$\Delta\chi = \sqrt{\left(\frac{F}{\mu V^2 H \frac{dH}{dx}} \cdot \Delta V\right)^2 + \left(\frac{1}{\mu V H \frac{dH}{dx}} \Delta F\right)^2} \tag{25}$$

$$= 5.52 \cdot 10^{-4} \tag{26}$$