

# PD - Para- und Diamagnetismus

## Blockpraktikum - Herbst 2005

Tobias Müller, Alexander Seizinger  
Assistent: Dr. Thorsten Hehl

Tübingen, den 18. Oktober 2005

### 1 Vorwort

In diesem Versuch untersuchten wir das Verhalten von para- und diamagnetischen Materialien, einem makroskopischen Phänomen der Elektrodynamik.

### 2 Theoretische Grundlagen

#### 2.1 Magnetisches Feld in Materie

Analog zu der Beobachtung, dass sich die Kapazität eines Kondensators beim Einführen eines Dielektrikums erhöht, lässt sich die magnetische  $\vec{B}$  durch Materie abschwächen oder verstärken. Auf mikroskopischer Ebene lässt sich dieser Effekt so deuten, dass beim Eintauchen der Materie und das Magnetfeld senkrecht zur Richtung von  $\vec{B}$  mikroskopische *Kreisströme* zu fließen beginnen.

#### 2.2 Magnetisierung

Ein Kreisstrom der Stärke  $I$  und einer umflossenen Fläche  $\vec{A}$  hat ein magnetisches Dipolmoment  $\vec{m}$  von

$$\vec{m} = I\vec{A}$$

Klassisch betrachtet erzeugen auch die Elektronen der Atome beim Umlaufen des Kerns ein solches magnetisches Dipolmoment. Summiert man nun alle  $\vec{m}_i$  in einem gewissen Volumen  $V$ , so erhält man die sog. *Magnetisierung*  $\vec{M}$  mit

$$\vec{M} = \frac{1}{V} \sum_i \vec{m}_i$$

#### 2.3 Suszeptibilität

Man stellt fest, dass die Kreisströme und damit auch  $\vec{M}$  proportional zu  $\vec{H}$  sind. Als Proportionalitätsfaktor führen wir die *magnetische Suszeptibilität*  $\chi$  ein, es ist dann

$$\vec{M} = \chi\vec{H}$$

Da die oben diskutierten Effekte im allgemeinen von Temperatur des Mediums abhängen ist im allgemeinen auch  $\chi$  von der Temperatur abhängig.

#### 2.4 Permeabilität

Da folgender Zusammenhang zwischen  $\vec{B}$ -Feld und  $\vec{H}$ -Feld gilt

$$\vec{B} = \mu_0\vec{H}$$

wobei sich zu  $\vec{H}$  im unserem Fall die Magnetisierung  $\vec{M}$  hinzuaddiert, können wir schreiben

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0(\vec{H} + \chi\vec{H})$$

also

$$\vec{B} = \mu_0(\chi + 1)\vec{H}$$

Das  $\vec{B}$ -Feld wird durch unser Medium also um den Faktor  $\chi + 1$  verstärkt, wir bezeichnen dies analog zur Dielektrizität als *Permeabilität*  $\mu_r$  mit

$$\mu_r = \chi + 1$$

#### 2.5 Diamagnetismus

Bringt man manche Stoffe wie zum Beispiel Bismut in die Nähe eines Polschuhs eines Elektromagneten, so beobachtet man eine abstossende Kraft. Dies lässt sich dadurch erklären, dass beim Eintauchen in das Magnetfeld Wirbelströme induziert werden, die dem Eintauchen entgegenwirken. *Diamagnetische* Stoffe wie Bismut haben eine kleinere Permeabilität als Luft bzw. das Vakuum ( $\mu_r = 1$ ), also gilt

$$\chi_{\text{Bi}} < 0$$

Bei den meisten Stoffen wird dieser Effekt jedoch durch den viel stärkeren *Para-* oder *Ferromagnetismus* überlagert.

### 2.6 Paramagnetismus

Viele Stoffe werden jedoch entgegen dem vorigen Beispiel von Bismut von dem Polschuh angezogen. Sie werden als in Feldrichtung magnetisiert, für sie gilt

$$\chi > 0$$

Die Teilchen paramagnetischer Stoffe haben permanente magnetische Dipolmomente, die beim Eintauchen in das Feld ausgerichtet werden. Dem wirkt jedoch die thermische Bewegung entgegen, daher hängt, wie bereits weiter oben erwähnt,  $\chi$  von der Temperatur  $T$  ab, es gilt nach dem Curie-Gesetz

$$\chi(T) = \frac{C}{T} = \mu_0 \frac{n_A \mu_r^2}{3k_B T}$$

wobei  $k_B$  die Boltzmannkonstante bezeichnet.

### 2.7 Ferromagnetismus

Einige wenige Stoffe wie zum Beispiel Eisen, Cobalt, Nickel und einige Legierungen besitzen bei nicht zu großen Temperaturen eine sehr große Magnetisierung und damit eine große Permeabilität. In ihnen richten sich ganze Teilchenverbände (sog. Weissche Bezirke) gleich aus, auch neigen sie dazu, einmal ausgerichtet ihre Ausrichtung beizubehalten (vgl. Hysterese).

Jedoch verlieren sie dieses Verhalten schlagartig, wenn ihre Temperatur einen gewissen Wert überschreitet, man bezeichnet diesen auch als Curie-Temperatur  $T_C$  und es gilt

$$\chi(T) = \frac{C}{T - T_C}$$

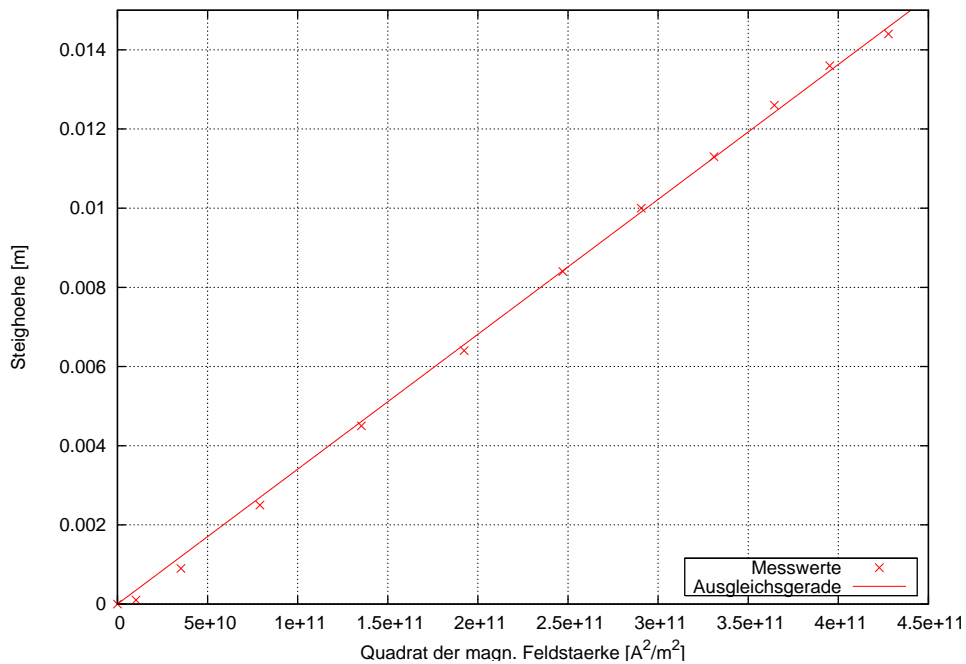
Diese hängt vom Material ab und nach Überschreiten verhält sich das Material paramagnetisch, die Permeabilität sinkt beträchtlich.

## 3 Auswertung

### 3.1 Massenszeptibilität von Eisen-3-Chlorid

Zur Bestimmung der Massenszeptibilität von Eisen-3-Chlorid wurde die sogenannte Steighöhenmethode angewandt. Bei steigendem B-Feld wurde die Steighöhe von Eisen-3-Chlorid im homogenen Magnetfeld gemessen.

Steighöhe des  $FeCl_3$  in Abhängigkeit des Magnetfeldes



Für die Steigung  $m$  der Ausgleichsgerade gilt:

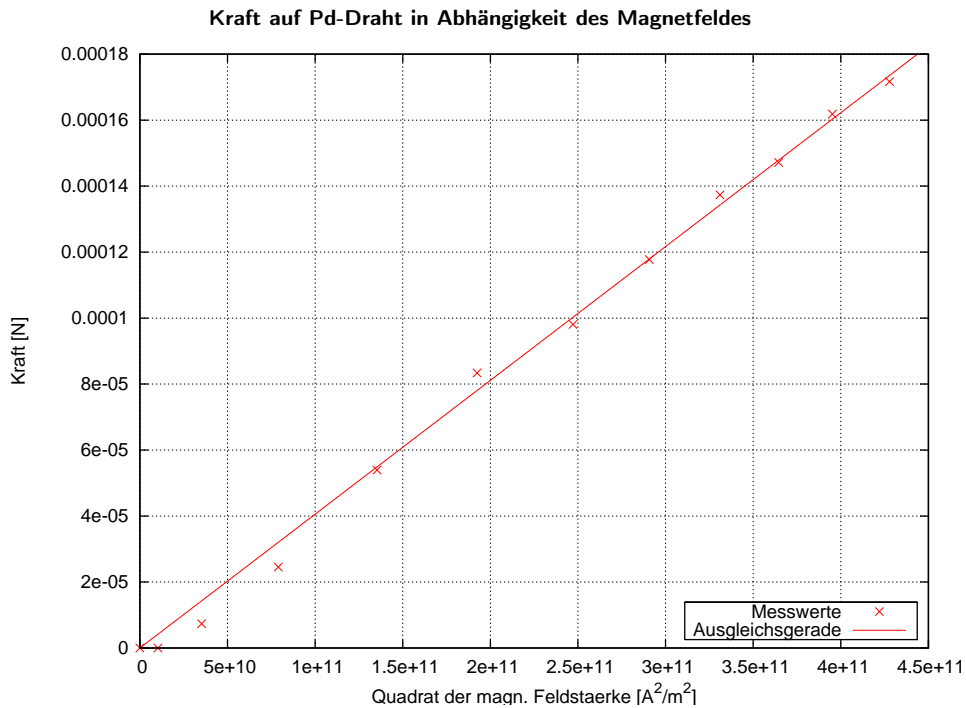
$$m = (3.40725 \cdot 10^{-14} \pm 1.913 \cdot 10^{-16}) \text{m}^3/\text{A}^2$$

Damit gilt für die Massenszeptibilität  $\kappa_{FeCl_3}$  von Eisen-3-Chlorid:

$$\kappa_{FeCl_3} = \frac{\chi_{FeCl_3}}{\rho_{FeCl_3}} = \frac{2g}{\mu_0} \frac{h}{H^2} = \frac{2g}{\mu_0} m = (5.32 \pm 0.03) \cdot 10^{-3} \text{cm}^3/\text{g}$$

### 3.2 Suszeptibilität von Palladium

Zur Bestimmung der Suszeptibilität von Palladium wurde die Kraft auf einen Palladiumstab bei steigendem B-Feld mit Hilfe eines Federkraftmessers gemessen.



Für die Steigung  $m$  der Ausgleichsgerade gilt:

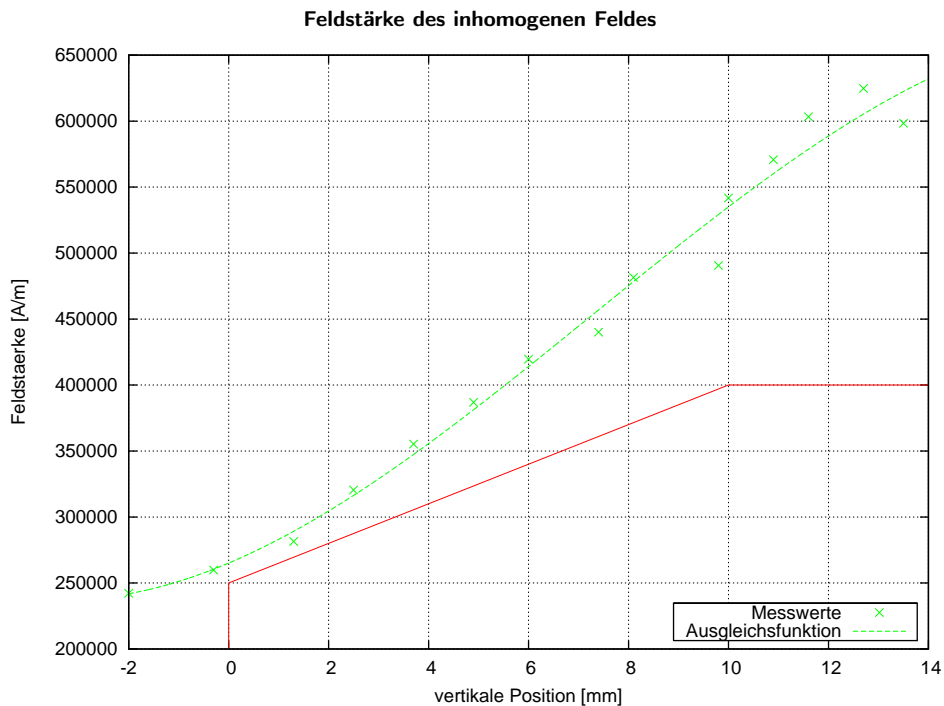
$$m = (4.0565 \cdot 10^{-16} \pm 4.45 \cdot 10^{-18}) \text{m}^2 \text{N}/\text{A}^2$$

Damit gilt für die Suszeptibilität  $\chi_{Pd}$  von Palladium:

$$\chi_{Pd} = \frac{2}{\mu_0 A} \frac{F}{H^2} = \frac{2}{\mu_0 A} m = (1.0149 \pm 0.0113) \cdot 10^{-5}$$

### 3.3 Feldstärke des inhomogenen Feldes

Zur Ausmessung des inhomogenen Magnetfeldes wurde die schon oben genutzte Steighöhenmethode verwendet. Diesmal war allerdings das B-Feld konstant und es wurde verschiedene Messpunkte ausgemessen.



Um den Gradienten des Feldes zu bestimmen wurde ein Ausgleichspolynom 3. Grades  $H(x)$  gelegt, welche nach unserer Meinung die Messwerte relativ gut widerspiegelt:

$$H(x) = (-9.22112 \cdot 10^{10} \cdot x^3 + 2.01767 \cdot 10^9 \cdot x^2 + 1.60362 \cdot 10^7 \cdot x + 265114) \text{ A/m}$$

$$\frac{d}{dx}H(x) = (-0.2766336 \cdot 10^{12} \cdot x^2 + 0.403534 \cdot 10^{10} \cdot x + 0.160362 \cdot 10^8) \text{ A/m}^2$$

### 3.4 Suszeptibilität von Bismut

Bei der Messung wurde die blaue Bismutkugel mit einer Masse  $m = 1136\text{mg}$  verwendet. Das entspricht einem Volumen  $V = \frac{m}{\rho} = \frac{1.136}{9.80\text{g/cm}^3} = 0.116\text{cm}^3$ . Die Kraft  $F$  die auf das Kügelchen wirkt haben wir  $F = (1\text{mg} - 12\text{mg}) \cdot 9.81\text{N/kg} = 0.1079\text{mN}$  gemessen. Da die Kugel etwa bei der Position  $12\text{mm}$  war, hatte des H-Feld dort eine Stärke von  $H = 5.825 \cdot 10^5\text{A/m}$ . Und der Gradient  $\frac{dH}{dx}$  hat den Wert  $\frac{dH}{dx} = 2.4625 \cdot 10^7\text{A/m}^2$ .

Damit gilt für Suszeptibilität  $\chi_{Bi}$ :

$$\chi_{Bi} = \frac{F}{\mu_0 V H \frac{dH}{dx}} = -5.160 \cdot 10^{-5}$$

Nimmt man an, das die Kraft mit einer Genauigkeit von  $\sigma_F = 1\text{mg} \cdot 9.81\text{N/kg} = 9.81\text{nN}$  gemessen wurde und der Gradient einen Fehler von ungefähr  $1 \cdot 10^6\text{A/m}^2$  hat, folgt für den Fehler:

$$\sigma_{\chi_{Bi}} = \sqrt{\left(\frac{1}{\mu_0 V H \frac{dH}{dx}} \sigma_F\right)^2 + \left(\frac{F}{\mu_0 V H \frac{dH}{dx}^2} \sigma \frac{dH}{dx}\right)^2} = 5.138 \cdot 10^{-6}$$