PD - Para- und Diamagnetismus
Praktikum Wintersemester 2005/06

Philipp Buchegger, Johannes Märkle
Assistent Dr. Torsten Hehl

Tübingen, den 22. November 2005

Theorie

Magnetfeld in Materie

Bringt man Materie in ein Magnetfeld, so wirkt auf die sich in der Materie befindenen Elektronen eine Kraft. Stark vereinfacht gesprochen zwingt diese Kraft die Elektronen auf eine Kreisbahn um den Vektor $\vec{B}$. Diese sich auf Kreisbahnen bewegenden Elektronen erzeugen ein magnetisches Moment. Für das magnetische Dipolmoment $\vec{m}$ eines Kreisstromes I um eine Fläche A mit Flächenvektor $\vec{A}$ gilt:

$$\vec{m} = I \cdot \vec{A} \tag{1}$$

Summiert man nun alle magnetischen Momente $\vec{m}$ eines Volumens V auf und teilt durch V, so erhält man die Magnetisierung M:

$$\vec{M} = \frac{1}{V} \sum_i \vec{m}_i \tag{2}$$

Diese Magnetisierung wird größer mit ansteigender Feldstärke $\vec{H}$. Es gilt:

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

Wobei der Proportionalitätsfaktor χ eine materialspezifische Größe darstellt, die im allgemeinen zusätslich von der Temperatur des Materials abhängt. Man bezeichnet diese Größe als Suszeptibilität.
Betrachtet man nun den magnetischen Fluß so ergibt sich unter Berücksichtigung des magnetischen Moments der Materie:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) \tag{4}$$

$$\Leftrightarrow \vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \chi\vec{H}) \tag{5}$$

$$\Leftrightarrow \vec{B} = \mu_0(1 + \chi)\vec{H} \tag{6}$$

Der Faktor $(1 + \chi)$ wird hierbei auch als Permeabilität μ_r bezeichnet.

Die Größenordnung bzw. das Vorzeichen von χ hängen wie schon erwähnt von den Eigenschaften des Stoffes und der Temperatur ab. Da sich χ von Stoff zu Stoff um mehrere Zehnerpotenzen unterscheiden kann teilt man Materialien grob in drei Gruppen in Abhängigkeit ihrer Suszeptibilität ein:

Diamagnete

Bringt man bestimmte Stoffe (beispielsweise Bismut) in ein magnetisches Feld, so erfahren diese eine Kraft in Richtung abnehmender Feldstärke, sie werden also von einem Polschuh eines Elektromagneten abgestoßen. Dieses Phänomen lässt sich durchaus noch mit der klassischen Physik erklären:
Das magnetische Feld erzeugt in einem Material Kreisströme, die ihrerseits wieder ein magnetisches Feld induzieren, dass nach der Lenzschen Regel der Ursache entgegenwirkt. Für ihre Suszeptibilität gilt:

$$\chi < 0 \tag{7}$$

Dieses Phänomen tritt im Grunde bei allen Stoffen auf, jedoch wird dieser Effekt bei Para- und Ferromagneten von wesentlich stärkeren Effekten überdeckt.

Paramagnete

Teilchen Paramagnetischer Stoffe besitzen permanente magnetische Momente, die durch ein externes Feld ausgerichtet werden können. Permagnetische Stoffe werden in folge dessen in das Magnetfeld hineingezogen. Klassisch nach Ampère stellt man sich diese Momente als Ringströme vor, in der Quantenmechanik argumentiert man über die Spinmomente der Elektronen. Der Einstellung dieser Momente arbeitet die Brownsche Bewegung der Teilchen entgegen. Nach dem Curie Gesetz gilt für die Suszeptibilität in Abhängigkeit der Temperatur:

$$\chi(T) = \frac{C}{T} = \mu_0 \frac{n_A {\mu_r}^2}{3k_B T} \tag{8}$$

mit

$$\chi(T) > 0 \tag{9}$$

Ferromagnete

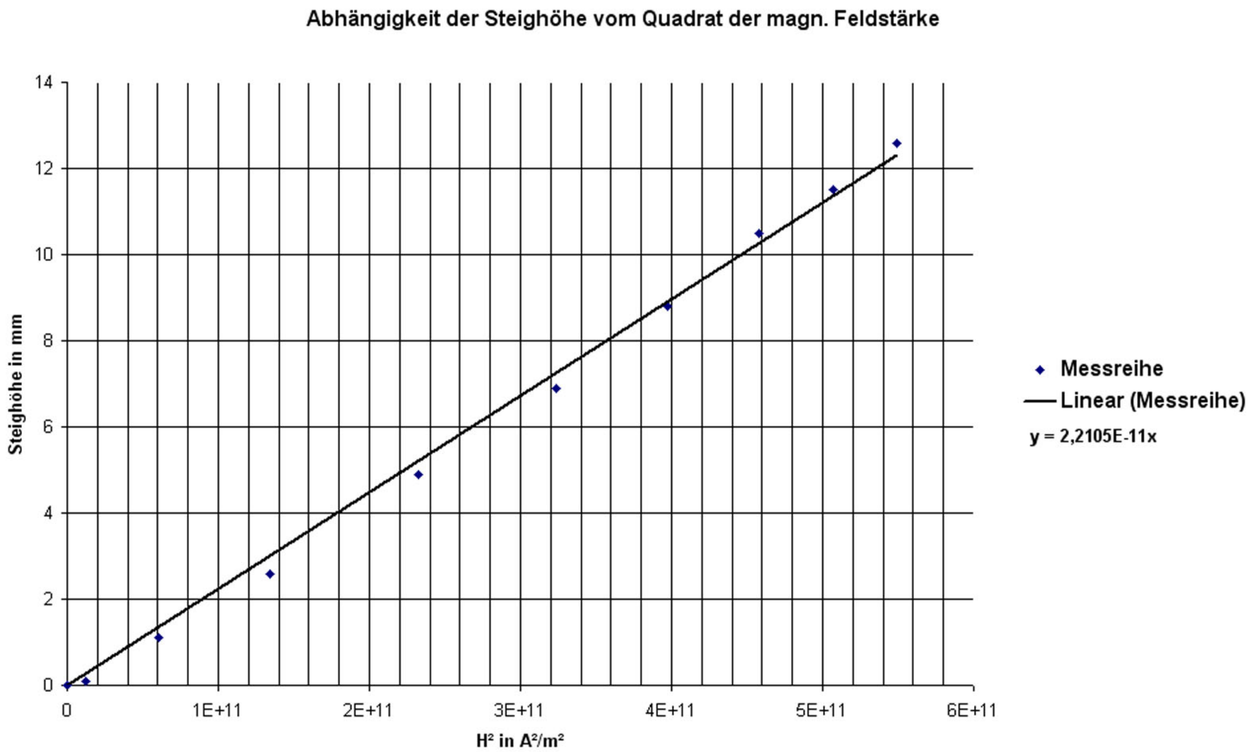
Zu der Gruppe der Ferromagnete gehören Stoffe mit sehr hoher Magnetisierung. Wie die Paramagneten besitzen sie permanente magnetische Momente, allerdings beeinflussen diese sich innerhalb des Stoffes noch zusätslich gegenseitig, was zur Folge hat dass auch beim Ausschalten des Feldes die eingestellte Magnetisierung vorhanden bleibt. Ausserdem lassen sich dadurch auch ohne Feldeinwirkungen bestimmte Gebiete (Weisschen Bezirke) ausmachen, in denen alle magnetischen Momente die gleiche Richtung aufweisen. Durch anlegen eines Feldes werden diese Bezirke nach und nach gleichgerichtet und verstärken dadurch das Feld. Dieses Verhalten wird allerdings aprupt unterbrochen sobald man eine gewisse Temperatur überschreitet (Curie-Temperatur). Es gilt:

$$\chi(T) = \frac{C}{T - T_C} \tag{10}$$

Auswertung

Paramagnetische Stoffe im homogenen Magnetfeld

In ein zuvor in Abhängigkeit der Stromstärke vermessenes homogenes Magnetfeld, wurde eine $FeCl_3$-Lösung (Paramagnet) gebracht und die beobachtete Steighöhe der Flüssigkeit über der Feldstärke zum quadrat aufgetragen:



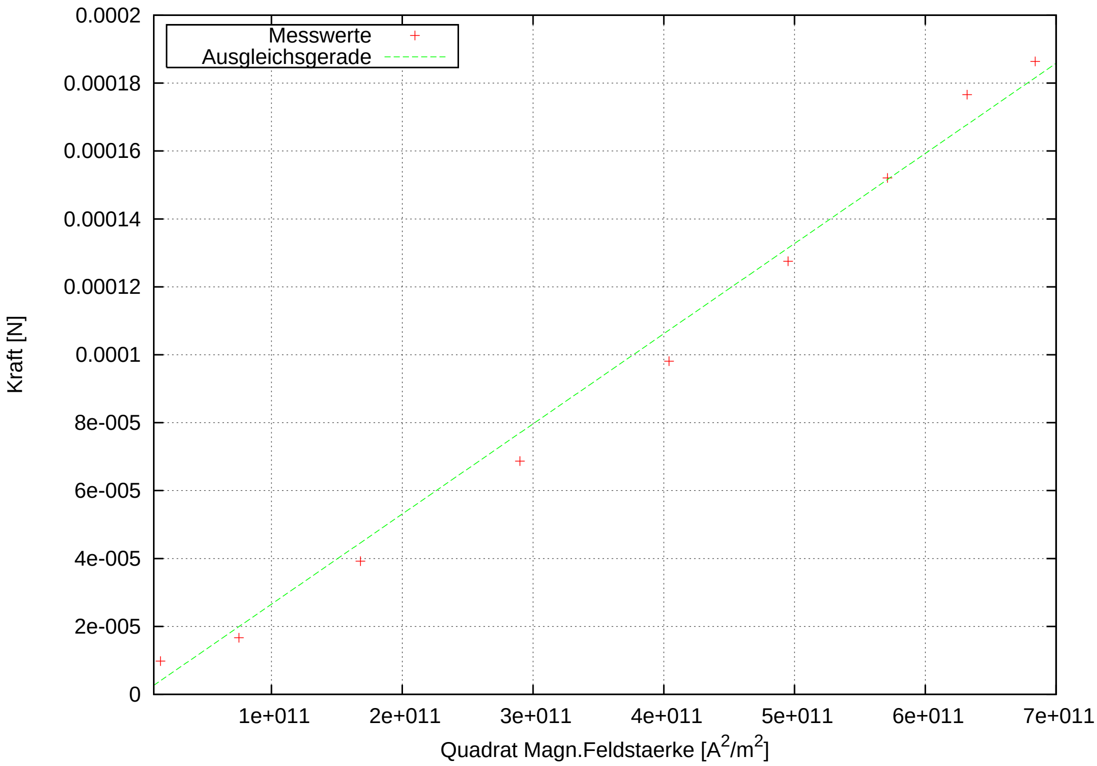
Betrachtet man die Steigung der gezeichneten Ausgleichsgerade $(2,2105 \cdot 10^{-11})$ und den Fakt, dass für die Massensuszeptibilität gilt:

$$\kappa = \frac{\chi}{\rho} = \frac{2gh}{\mu_0 H^2} \tag{11}$$

So ergibt sich für κ:

$$\kappa \approx 3,45 \cdot 10^{-07} \frac{m^3}{kg} \tag{12}$$

Suszeptibilität χ von Palladium



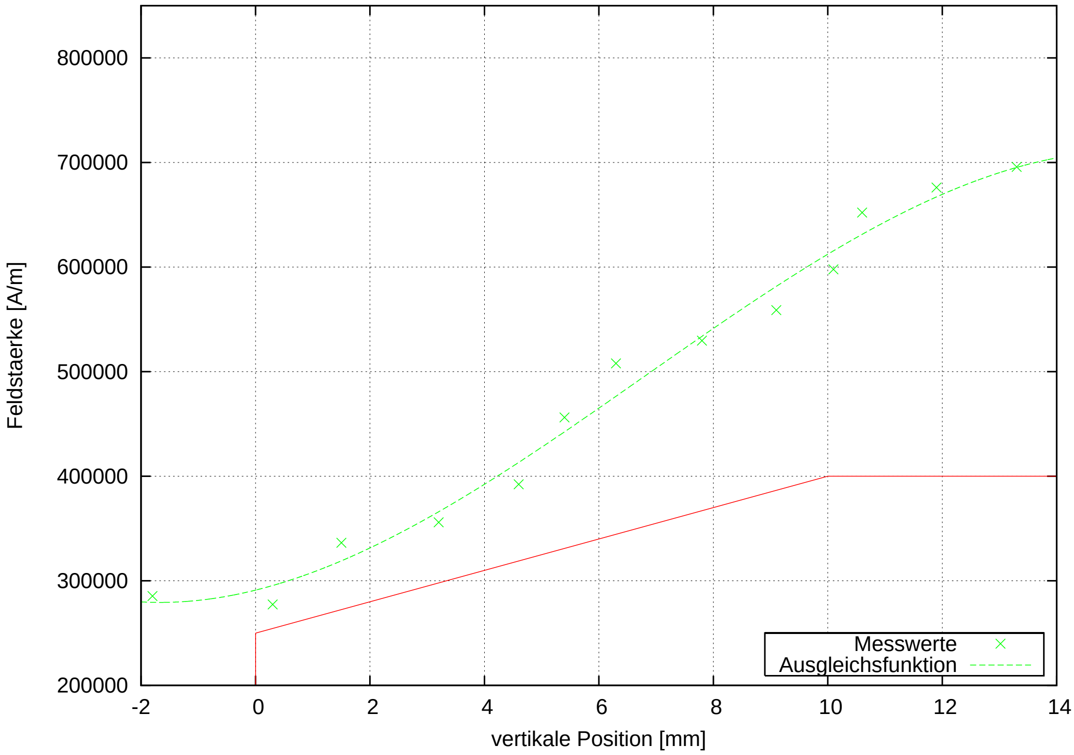
Die Steigung der Ausgleichsgeraden beträgt

$$m = 2,65 \cdot 10^{-13} \pm 4.984 \cdot 10^{-15} \frac{Nm^2}{A^2} \tag{13}$$

Und somit ergibt sich für die Suszeptibilität:

$$\chi_{Pd} = \frac{2F}{\mu_0 A H^2} = \frac{2}{\mu_0 A} m = 16.6 \cdot 10^{-5} \tag{14}$$

Feldstärke des inhomogenen Feldes



Man sieht, dass die Feldstärke, sobald die $FeCl_3$-Lösung in den „homogenen“ Teil kommt, zunimmt Zur Bestimmung des Feldgradienten $\frac{dH}{dx}$ wurde ein Ausgleichspolynom P(x) dritten Grades bestimmt: Also ist

$$P(x) = -1.885 \cdot 10^{11} \cdot x^3 + 3.83908 \cdot 10^9 \cdot x^2 + 1.43484 \cdot 10^7 \cdot x + 307059 \frac{A}{m} \tag{15}$$

und somit

$$\frac{dH}{dx} = -0.53607 * 10^{12} * x^2 + 7278720000 * x + 13600000 \frac{A}{m^2} \tag{16}$$

Bestimmung der Suszeptibilität von Bismut

Die Masse der gemessenen Kugel beträgt 1,122g was bei der Bestimmung des Volumens über die Dichte $\rho_{Bi} = 9,78 \frac{g}{cm^3}$ zu $V = \frac{m}{\rho} = \frac{1,122g}{9,78 \frac{g}{cm^3}} = 0,1137 cm^3$ führt.
Für die Kraft F, die auf die Kugel wirkt haben wir F = (33mg - 68mg) · 9,81Nkg = -0,3434mN gemessen. Da die Kugel etwa bei der Position 6,4mm war, hatte des H-Feld dort eine Stärke von:

$$H = 4.80 \cdot \ 10^5 \frac{A}{m} \tag{17}$$

Und der Gradient $\frac{dH}{dx}$ hat den Wert

$$\frac{dH}{dx} = 3.823 \cdot 10^7 \frac{A}{m^2}. \tag{18}$$

Es gilt:

$$F = \mu_0 \chi A \int H \frac{dH}{dx} \tag{19}$$

Damit gilt für Suszeptibilität χ_{Bi}:

$$\chi_{Bi} = \frac{F}{\mu_0 V H \frac{dH}{dx}} = -1,31 \cdot\ 10^{-5} \tag{20}$$

Für die gemessene Kraft nehmen wir einen Fehler von $\sigma_F = 2mg \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} = 19.62 \mu N$ an. Für den Gradienten nehmen wir einen Fehler von $1 \cdot\ 10^6 \frac{A}{m^2}$ an. Also folgt als Gesamtfehler:

$$\sigma_{\chi Bi} = \sqrt{(\frac{\sigma_F}{\mu_0 V H \frac{dH}{dx}})^2 + (\frac{F \cdot \sigma_{\frac{dH}{dx}}}{\mu_0 V H \frac{dH^2}{dx}})^2} = 7,23 \cdot\ 10^{-7} \tag{21}$$

$$\chi_{Bi} = -11,76 \cdot\ 10^{-6} \pm\ 8,23 \cdot\ 10^{-7} \tag{22}$$