

Versuch 316

## Magnetfeldmessung

### Aufgaben

1. Messung der magnetischen Induktion in Abhängigkeit vom Polschuhabstand und dem Magnetisierungsstrom
2. Messung der magnetisch Induktion in Abhängigkeit vom Abstand der Polschuhachse (und der Polschuhabstandsmittle)
3. Ermitteln der spezifischen Suzeptibilität des verwendeten paramagnetischen Salzes

### Vorbetrachtung

#### Das Magnetfeld, die Magnetisierung und magnetische Induktion

Ausführliche Erläuterungen zu den Zusammenhängen zwischen Feldstärke  $H$ , magnetischer Induktion (auch Flussdichte)  $B$  und Magnetisierung  $M$  des durchdrungenen Mediums ist in der Vorbereitung zum Versuch 310 Magnetismus am Ferrograph zu finden. Hier nur der mathematische Zusammenhang:

$$B = \mu_0 (H + M) = \mu_0 (H + \chi_m H) = \mu_0 (1 + \chi_m) H = \mu_0 \mu_r H$$

$$\mu_r = 1 + \chi_m$$

Dabei treten bei diamagnetischen Stoffen ( $\chi_m < 0$ ) Induktionen auf, die erst Magnetdipole (Doppelelektronen werden von einander in verschiedene Orbitale getrennt) entstehen lassen. Diese sind energetisch ungünstiger, weshalb der Stoff aus den Gebieten großer Feldstärken „hinausdrängt“.

Anders bei den Paramagnetika ( $\chi_m > 0$ ), dessen Teilchen auf Grund deren Elektronenkonfiguration bereits magnetische Dipole besitzen (Einzelelektronen in einem Orbital). Dadurch richten sich diese Elektronenspins in den Orbitalen gemäß des Magnetfeldes aus und der paramagnetische Körper erfährt eine in das Feld hinein gerichtete Anziehungskraft.

### Elektromagneten

Elektromagneten nutzen die Tatsache, dass sich um bewegte Ladungen ein Magnetfeld bildet, aus. Um einen ferromagnetischen ( $\chi_m \gg 1$ ) Kern liegen  $N$  Windungen, durch die ein elektrischer Strom mit einer Stromstärke  $I$  fließt. Der Eisenkern sei mit einer Unterbrechung der Dicke  $d$  versehen.

Es gilt für die Flussdichte, dass diese konstant bleibt. Also:

$$B_i = B_a = B$$

$$B = \mu_0 \mu_r H_i = \mu_0 H_a$$

$$H_i = \frac{1}{\mu_r} H_a$$

Die Stromstärke und Windungszahl sind mit dem Durchflutungsgesetz mit der Feldstärke verknüpft. In der Integralen Schreibweise lautet dies, über den eingezeichneten Weg integriert:

$$N \cdot I = \oint H ds = H_i \cdot l + H_a \cdot d$$

$$H_a = \frac{N \cdot I}{d + \frac{l}{\mu_r}}$$

Dies bedeutet also, dass die Feldstärke (und somit auch die Flussdichte) im Außenraum direkt proportional zur Stromstärke und antiproportional zur Dicke des Spaltes ist. Dies gilt natürlich nur, wenn alle Windungen den Kern umschließen (ist lt. Anweisung bei uns nicht gegeben) und die Sättigungsgrenze des Ferromagnetischen Stoffes noch nicht erreicht ist,

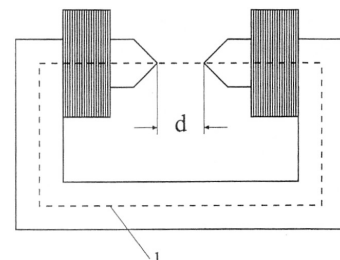


ABB. I.1: Prinzipieller Aufbau eines Elektromagneten

## Versuchsprotokolle

### Hallsonde

Die Hallsonde ist ein Leiterblättchen, welches von einem Stromfluss  $I$  und einer Flussdichte  $B$  durchsetzt ist. Auf Grund der Lorentzkraft werden die bewegten Ladungsträger zur oberen bzw. unteren Kante abgelenkt und es entsteht ein messbares elektrisches Potential  $U_H$ , was über die Gleichung

$$U_H = R_H \frac{I \cdot B}{d}$$

$$R_H = \frac{1}{n_e \cdot e}$$

mit den anliegenden Größen gekoppelt ist. Dabei ist  $n_e$  die Elektronendichte. D.h. bei niedriger Ladungsträgerdichte wird die Hallspannung umso größer. Das ist auch der Grund, warum man Hallsonden mittels Halbleitern realisiert.

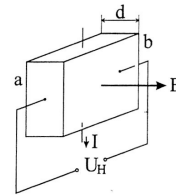


ABB. I.2: Prinzipieller Aufbau einer Hallsonde

### Steighöhenmethode

In einem Steigrohr befindet sich eine Lösung, die eine gute zu beobachtende paramagnetische oder diamagnetische Eigenschaft hat. Mittels eines angelegten mag. Feldes kann man über die Steig- oder Sinkhöhe das Feld bzw. die spezifische Suszeptibilität bestimmen.

Um die Beziehung zwischen der mechanischen und der elektromagnetischen Welt der Physik zu erhalten, wählt man den Weg über die Energie, bzw. über die Energiedichte. Die Energiedichte für enthaltener Flüssigkeitssäule bzw. ohne ist:

$$\frac{E}{V_{mit}} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0 \mu_r}; \frac{E}{V_{ohne}} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0}$$

Dabei ist die Abnahme der Energiedichte zwischen beiden Zuständen:

$$\Delta \frac{E}{V_{mag}} = \frac{E}{V_{mit}} - \frac{E}{V_{ohne}} = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} \frac{1}{\mu_r} - 1 \stackrel{\mu_r \approx 1}{\cong} \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} (1 - \mu_r) = -\frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} \chi_m$$

Und dies wiederum entspricht der Zunahme um mechanischer Energie pro Volumen:

$$-\Delta \frac{E}{V_{mag}} = \Delta \frac{E}{V_{mech}}$$

$$\frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} \chi_m = \frac{m \cdot g \cdot h}{V} = \frac{\rho \cdot V \cdot g \cdot h}{V}$$

$$\frac{\chi_m}{\rho} = \frac{2\mu_0 g h}{B^2}$$

Und- schwupps haben wir uns mal versehen- hat man die Formel für die spezifische Suszeptibilität gewonnen... Beachtet man noch, dass die spezifischen Suszeptibilitäten von Salz und Lösungsmittel sich gemäß der Massenprozente additiv verhalten, kann man die folgende Gleichung aufstellen:

$$\frac{\chi_m}{\rho} = \sum_i \left( p_i \% \cdot \frac{\chi_m}{\rho_i} \right)$$

### Durchführung

#### Versuchsobjekt:

Magnetspulen mit verstellbarem Polschuhabstand, Hallsonde, Quinck'sches Steigrohr mit  $\text{CoCl}_2$ - Lösung

#### erwartetes Ergebnis:

Neukurven bei der Aufnahme der Stromstärkeabhängigen Messung, Abnahme der Flussdichte mit zunehmenden Polschuhabstand, gegebene Werte

#### mögliche systematische Fehler

- nicht vollständiger Kontakt zwischen Spule und Kern
- Falsche Justierung der Hallsonde

**Versuchsprotokolle**

- Ummantelung (Aluminium)

**Versuchsablauf:**

- Aufnahme der erforderlichen Messreihen der magnetischen Induktion
- Messen des Höhenunterschiedes der Lösung im Steigrohr zwischen an- und abgeschalteten Magnetfeld

**Fehlerquellen:**

$$\Delta a, \Delta b, \Delta d, \Delta I, \Delta B, \Delta h$$

**Messwerte**

**Gegebene Werte**

CoCl<sub>2</sub>- Lösung: 15±0,2% (Massenbruch)

$$\text{Spezifische Suszeptibilitäten: } \frac{\chi_m}{\rho_{H_2O}} = -9,00 \cdot 10^{-9} \frac{m^3}{kg}; \frac{\chi}{\rho_{CoCl_2}} = 1280 \cdot 10^{-9} \frac{m^3}{kg}$$

**Induktion in Abhängigkeit von Polschuhabstand und Strom in Tesla [T]**

d [mm]	I <sub>M</sub> [A]	1	2	3	4	5	6	7	8
		± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,01
5 ±0,1		0,65	1,29	1,81	2,1	2,29	2,43	2,54	2,62
10 ±0,1		0,3	0,65	0,93	1,21	1,48	1,67	1,82	1,92
15 ±0,1		0,2	0,38	0,59	0,77	0,97	1,12	1,29	1,41
20 ±0,1		0,1	0,2	0,31	0,42	0,53	0,63	0,75	0,83

Messungenauigkeit: ± 0,02T

**Induktion in Abhängigkeit vom Abstand zur Feldmitte (a) und zum Polschuhabstandsmitte (b) bei I<sub>M</sub>=8A in Tesla [T]**

b [cm]	a [cm]	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	1,2	1,7	2,2	2,7	3,2
		±0,1	±0,1	±0,1	±0,1	±0,1	±0,1	±0,1	±0,1	±0,1	±0,1	±0,1	±0,1	±0,1
0 ±0,1		1,35	1,34	1,32	1,3	1,26	1,23	1,18	1,14	0,93	0,75	0,63	0,54	0,47
0,25 ±0,1		1,39	1,37	1,35	1,31	1,27	1,23	1,18	1,15	0,91	0,74	0,62	0,53	0,46
0,5 ±0,1		1,54	1,53	1,51	1,47	1,4	1,3	1,23	1,16	0,89	0,72	0,61	0,52	0,45
0,75 ±0,1		1,65	1,67	1,68	1,67	1,57	1,41	1,28	1,19	0,86	0,7	0,59	0,51	0,45

Messungenauigkeit: ± 0,02T

Vom Behältnis (Aluminium) durchflutete Fläche in hellen Grau,  
von der Flüssigkeitssäule durchflutete Fläche in dunkleren Grau (Schätzung)

**Messung der paramagnetischen Eigenschaft d. Lösung**

$$h_{\text{Magnetfeld}} = 61,86 \pm 0,08\text{cm}, h_{\text{Magnetfrei}} = 60,62 \pm 0,08\text{cm}$$

**Auswertung**

**Berechnung der paramagnetischen Eigenschaft d. Lösung**

Aus den Gleichungen oben erhält man die spezifische Suszeptibilität der Lösung direkt:

$$\frac{\chi_m}{\rho} = \frac{2\mu_0 g(h_1 - h_2)}{B^2} \pm 2 \frac{\chi_m}{\rho} \cdot \left( \frac{\Delta h}{h_1 - h_2} + \frac{\Delta B}{B} \right) = \frac{0,0124m}{(1,35T)^2} \pm 2 \frac{\chi_m}{\rho} \cdot \left( \frac{0,08cm}{1,24cm} + \frac{0,2T}{B} \right)$$

$$= (168 \pm 71) \cdot 10^{-9} \frac{m^3}{kg}$$

**Versuchsprotokolle**

Mittels der Prozentgleichung kann man auf die spez. Suszeptibilität des Salzes schließen:

$$\frac{\chi_m}{\rho_{CoCl_2}} = \frac{\chi_m}{p\% \cdot \rho} + \left(1 - \frac{1}{p\%}\right) \cdot \frac{\chi_m}{\rho_{H_2O}} \pm \left[ \frac{1}{p\%} \Delta \frac{\chi_m}{\rho} + \frac{\Delta p\%}{p\%^2} \left( \frac{\chi_m}{\rho} - \frac{\chi_m}{\rho_{H_2O}} \right) \right]$$

$$= (1169 \pm 475) \cdot 10^{-9} \frac{m^3}{kg}$$

Das Ergebnis bestätigt innerhalb der erwarteten Messungenauigkeit (immerhin 40%!) mit den erwarteten Wert.

**Darstellung**

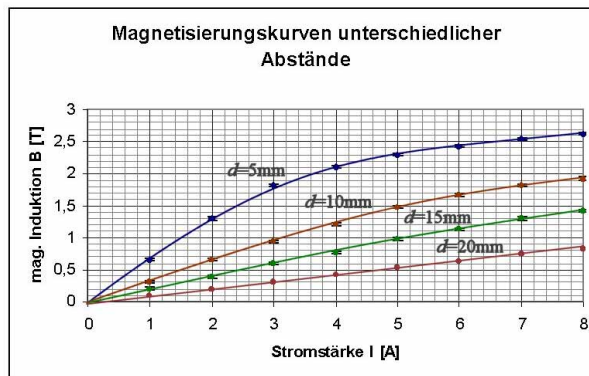


ABB. II.1: Magnetisierungskurven bei unterschiedlichen Polschuhabständen und erzeugenden Stromstärken.

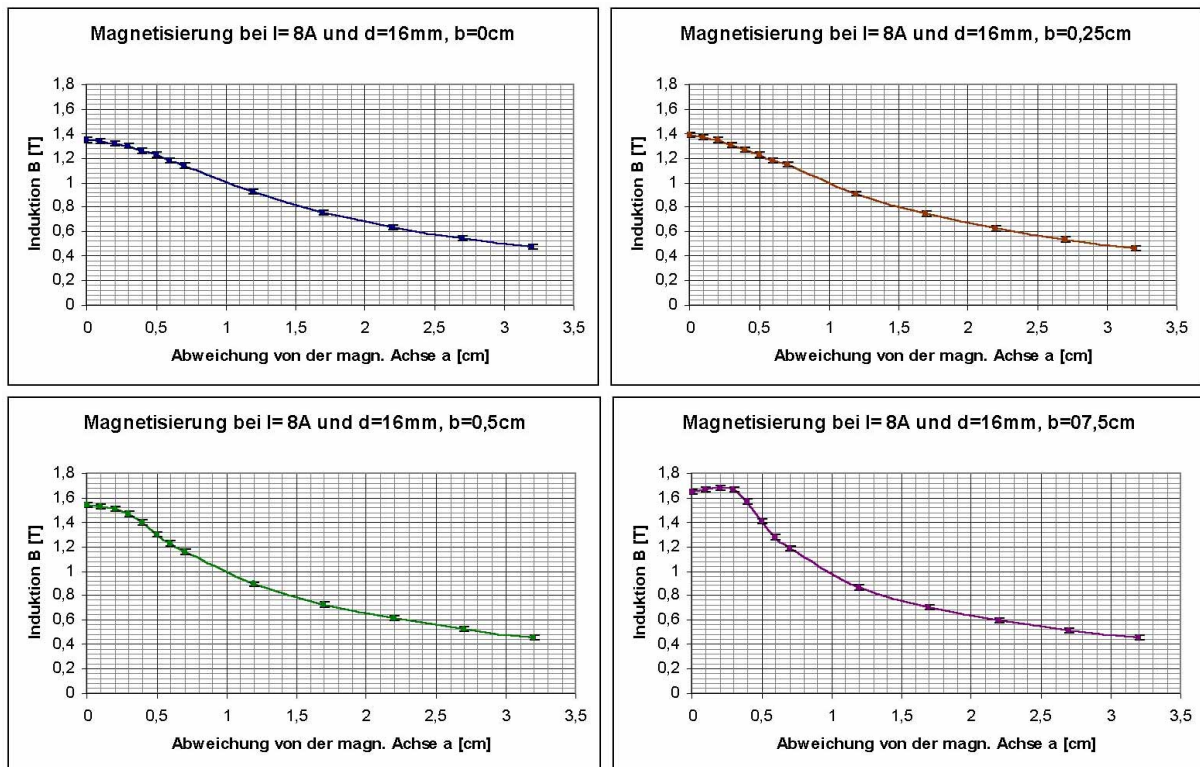


ABB. II.2 A-D: Die Verläufe der magnetischen Flussdichten in Abhängigkeit von den Abständen a und b.

## Versuchsprotokolle

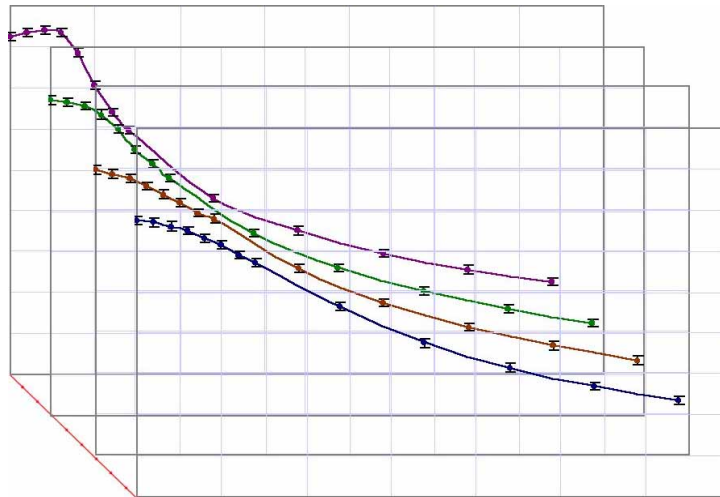


ABB. II.3: Nochmalige 3-Dimensionale Darstellung des Verlaufes des Magnetfeldes. Links unten befindet sich die magnetische Achse, die vorderste Ebene stellt die Polschuhabstandsmitte dar. Da das Feld rotationssymmetrisch um die Feldachse und spiegelsymmetrisch mit der Polschuhabstandsmitte ist, ist es ausreichend, nur eine Flanke einer Feldhälfte zu vermessen.

### Diskussion

Auffallend ist bei diesem Versuch, neben dem großen Messfehler, die Tatsache, dass das Feld am Rand (in der Nähe der Polplatten) scheinbar „eingedellt“ ist. Dies kann zum einen damit erklärt werden, dass die Form der Polschuhe sich sprunghaft ändert und damit eine Art mag. Ladungsspitze entsteht (die die Sonde auf Grund ihrer Ausdehnung als relativ flaches Gebilde aufnimmt). Diese Vermutung liegt deshalb nahe, da das Maximum sich örtlich mit der Kante des Polschuhs überdeckt (ABB. II.2.D).

Dann konnte gezeigt werden, dass das Feld mit zunehmender Stromstärke zunimmt, in einem kleinen Bereich sogar proportional (siehe ABB. II.1, die Kurve von 20mm). Erklärung für das „Entarten“ der Kurve in höheren Bereichen ist die Tatsache, dass die Weiß'schen Bezirke an Einfluss verlieren und die Kurve wieder in eine lineare „Sättigungskurve“ übergeht (siehe Versuch 310, Ferrograph). Was man hier beobachtet ist also nichts weiter als eine Neukurve.

Nicht gezeigt werden konnte hingegen, dass mit Zunahme des Abstandes die Feldstärke reziprok proportional abnimmt. So sind in ABB. II.1. die Wert für gleiche Verhältnisse von Stromstärke zu Abstand nicht gleich, sonder nehmen systematisch ab. Das deutet auf einen systematischen Fehler hin, möglicher Weise ist der Einfluss des variablen, geteilten Kerns hier zu spüren (Weniger Kern unter den Magneten bedeutet auf Grund des Verstärkungseffektes des Kerns ein kleineres Feld.) Allen Anscheines ist dieser Effekt sogar systematisch und linear.

Das (in der Anleitung) homogene Magnetfeld erwies sich als Utopie, innerhalb des Kapillares ergibt sich eine Magnetfeldschwankung von 15%, was natürlich bei weitem nicht mehr als homogen angesehen werden kann.

Auf Grund des großen Messfehlers ist bei diesem Versuch dingend geraten, deutlich die Messanordnung zu verändern. Idee eins dazu wäre, ein echtes, homogenes Magnetfeld bereit zu stellen, z.B. mit einem starken, keramischen Hufeisenmagnet. Dadurch wären die Schwankungen im Magnetfeld nicht mehr ein Problem (hier immerhin 30%- Messungenaugigkeit). Dann ist es wünschenswert, dass die Lösung in dem Vorratsgefäß ausreichend ist, so dass im abgeschalteten Feld die Oberkante der Lösung zu sehen ist. Dadurch würden sich die Randeffekte zwischen Wand und der Flüssigkeit weniger sichtbar zuschlagen.

Ferner wäre ein schwenkbarer Kopf der Hallsonde zu wünschen, da so die Messungen an den Randgebieten genauer ausfallen könnten.

Ansonsten bestätigen die Ergebnisse die Vorüberlegungen. Abgezeichnete Messwerte sind im Anhang zu finden.

Jena, 10.02.2003

