Mágneses szuszceptibilitás mérése

(Mérési jegyzőkönyv)

Hagymási Imre

2006. március 12.
(hétfő délelőtti csoport)

1. A mérés elmélete

Az anyagok külső mágneses tér hatására polarizálódnak. Általában az anyagok mágnesezhetőségét az $\mathbf{M}$ mágnesezettség és a $\mathbf{H}$ mágneses térerősség közötti kapcsolat megadásával írhatjuk le. Homogén, izotrop anyag és kis mágneses terek esetén esetén ez a függvénykapcsolat lineáris:

$$\mathbf{M} = \mu_0 \kappa \mathbf{H}, \ \mathbf{B} = \mu \mu_0 \mathbf{H}, \tag{1}$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{M} \tag{2}$$

ahol κ a *mágneses szuszceptibilitás*, μ a *relatív permeabilitás*, amelyek az anyag mágneses viselkedését jellemzik. E két mennyiség között fennáll a $\mu = 1 + \kappa$ összefüggés.
Az anyagok mágneses tulajdonságaik alapján három csoportba sorolhatók:

- *paramágneses anyagok*: A szuszceptibilitás értéke kis pozitív szám, az anyag mágnesezettsége azonos irányú a külső térrel.
- *diamágneses anyagok*: A szuszceptibilitás értéke kis negatív szám, az anyag a külső mágneses térrel ellentétes irányba mágneseződik.
- *ferromágneses anyagok*: Az anyag nagy pozitív μ és κ értékekkel jellemezhető. Ekkor már ezek az értékek a $\mathbf{H}$ tér függvényei, tehát mágneses szempontból nem egy számmal jellemezhető.

A mérés során a különböző minták szuszceptibilitását az ún. *Gouy-módszerrel* határozzuk meg. A módszer lényege az, hogy a minta egyik vége erős H_y térbe lóg, míg a másik vége gyakorlatilag nulla térben helyezkedik el. Ekkor a mintára erő hat, melynek nagysága [1]:

$$F = \frac{(\kappa - \kappa_0) A \mu_0 H_y^2}{2} = \frac{(\kappa - \kappa_0) A B_y^2}{2\mu_0}, \tag{3}$$

ahol A a minta keresztmetszete, $\kappa_0 = 3.77 \cdot 10^{-7}$ a levegő szuszceptibilitása, H_y, B_y rendre a mágneses térerősségvektor, illetve a mágneses indukcióvektor y-irányú komponense. Az erőt B_y^2 függvényében ábrázolva egyenest kapunk, melynek meredekségéből meghatározhatjuk az anyag szuszceptibilitását. A mágneses teret egy vasmagos elektromágnes hozza létre, melyet Hall-szondával mérünk. A tényleges szuszceptibilitásmérés előtt hitelesíteni kell a Hall-szondát, melyet egy mérőtekerccsel és a hozzátartozó fluxusmérő

berendezéssel végzünk el. A Hall-szondán mérhető feszültséget a következő összefüggés adja meg:

$$U_H = \frac{R_H}{d} I_H B, \tag{4}$$

ahol I_H a szondán átfolyó áram, B a mérendő mágneses indukció, R_H a Hall-állandó, d a félvezető lapka vastagsága. A hengeres mintát belógatjuk a két vasmag közötti légrésbe, ahol a minta felfüggesztési pontja egy Mettler-típusú analitikai mérleghez csatlakozott. A mérleg tárázása után különböző mágneses terek esetén közvetlenül mérhetjük a mintára ható erőt.

2. A mérés

A mérést az első, azaz az ablaktól távolabbi mérőhelyen végeztem.

2.1. A Hall-szonda hitelesítése

A Hall-szonda áramát egy stabil áramgenerátorral lehet szabályozni, a mérés során $I_H = 5.01$ mA áramot állítottunk be. Majd a tekercsre különböző gerjesztőáramokat adtunk és mértük a szondán megjelenő feszültséget. A mérési adatokat az 1. táblázat tartalmazza, az egyenes illesztés eredménye az 1. ábrán látható. Az első mérőhelyen levő tekercs adatai:

$$\begin{aligned} n &= 194, \\ r_k &= (4.8 \pm 0.05)\text{mm}, \\ r_b &= (3.15 \pm 0.05)\text{mm}, \\ \overline{F} &= (49.2 \pm 1.1)\text{mm}^2. \end{aligned}$$

Az illesztett egyenes meredeksége: $(0.00808 \pm 0.00004)\frac{\text{T}}{\text{mV}}$, tengelymetszete: (0.017 ± 0.004)T.

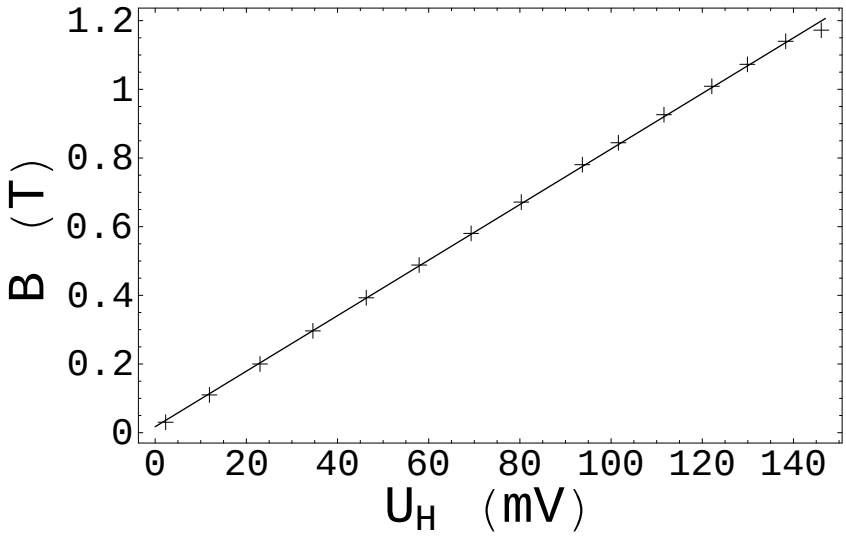
2.2. A Hall-állandó meghatározása

A hitelesítési egyenes segítségével meghatározhatjuk a szondára jellemző $\frac{R_H}{d}$ állandót:

$$\frac{R_H}{d} = 24.7 \pm 0.6 \frac{\Omega}{\text{T}}. \tag{5}$$

I(A)	$U_H(mV)$	Φ(mVs)	B(T)
0	2.3	0.29	0.030
0.5	11.9	1.05	0.110
1.0	23.0	1.91	0.200
1.5	34.6	2.83	0.296
2.0	46.3	3.75	0.392
2.5	57.9	4.66	0.488
3.0	69.3	5.54	0.580
3.5	80.3	6.41	0.671
4.0	93.7	7.45	0.780
4.5	101.6	8.06	0.844
5.0	111.6	8.84	0.926
5.55	122.1	9.63	1.008
6.0	129.9	10.24	1.072
6.5	138.3	10.88	1.139
7.0	146.1	11.19	1.172

1. táblázat. A Hall-szonda hitelesítése során mért és számított adatok.



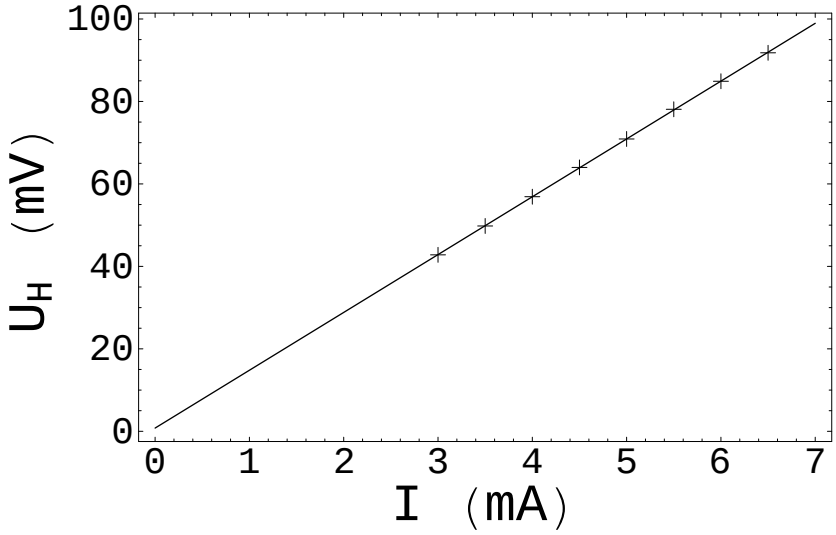
1. ábra. A Hall-szonda hitelesítési egyenese.

Az $\frac{R_H}{d}$ állandót meghatározhatjuk úgy is, hogy a tekercs áramát állandó értéken hagyjuk, majd a szonda áramát változtatva mérjük a Hall-feszültséget.

A mérést 0.580 T mágneses indukciójú tér esetén végeztem el. A mérési adatokat a 2. táblázat tartalmazza, a mért pontok illetve az illesztett egyenes a 2. ábrán látható.

I(mA)	U(mV)
3	42.7
3.5	49.8
4	56.9
4.5	64.0
5	70.9
5.5	78.1
6	84.9
6.5	91.8

2. táblázat. A Hall-szonda hitelesítése más módszerrel.



2. ábra. A Hall-szonda hitelesítési egyenese más módszerrel.

Az illesztett egyenes meredeksége $14.02 \pm 0.03\Omega$, tengelymetszete: 0.7 ± 0.1V. Ezen adatok segítségével $\frac{R_H}{d} = (24.17 \pm 0.04)\frac{\Omega}{\mathrm{T}}$.

2.3. Az alumínium (2-es számú minta) szuszceptibilitásának mérése

A 2-es számú minta átmérője, illetve sugara (négy helyen mértem az átmérőt):

$$d = 8.011\text{mm}, \Rightarrow r = (4.005 \pm 0.001)\text{mm}. \tag{6}$$

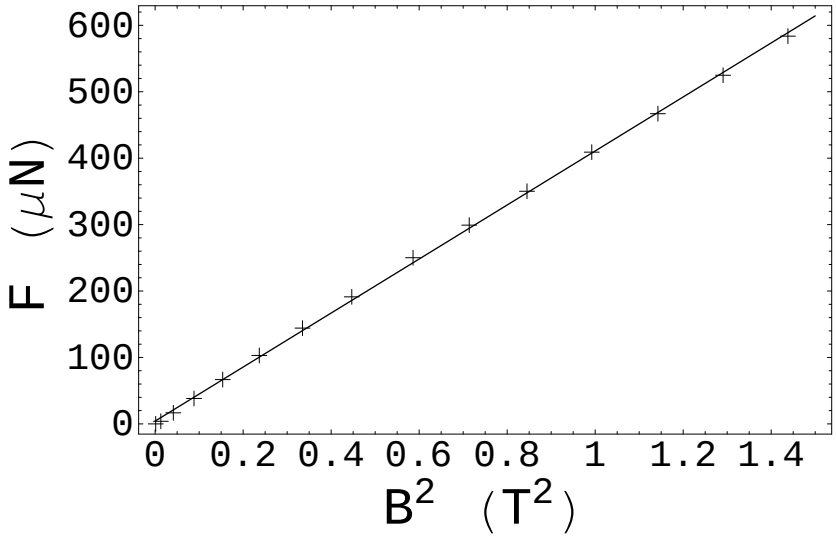
I_{tekercs}(A)	$U_H(mV)$	F/g(mg)	B(T)	$B^2(T^2)$	F(μN)
0	2.3	0	0.035	0.0012	0
0.5	11.9	0.4	0.113	0.0128	3.9
1.0	23.0	1.7	0.203	0.0413	16.6
1.5	34.6	3.9	0.297	0.0883	38.2
2.0	46.3	6.8	0.391	0.1535	66.7
2.5	58.0	10.5	0.486	0.2366	103.0
3.0	69.4	14.7	0.578	0.3349	144.2
3.5	80.5	19.5	0.668	0.4468	191.2
4.05	92.5	25.5	0.765	0.5861	250.1
4.5	102.3	30.5	0.844	0.7137	299.2
5.0	111.5	35.7	0.919	0.8450	350.2
5.55	121.0	41.7	0.996	0.9922	409.0
6.0	130.0	47.6	1.068	1.1426	466.9
6.5	138.3	53.5	1.136	1.2906	524.8
7.0	146.1	59.5	1.199	1.438	583.6

3. táblázat. A 2-es számú minta mérésének adatai.

A mérési adatok a 3. táblázatban láthatók, az illesztés eredményét pedig a 3. ábra mutatja. A 3. ábrán látható egyenes meredeksége: $m_{\text{Al}} = (406 \pm 2)\frac{\mu\text{N}}{\text{T}}$. A (3) egyenlet szerint a szuszceptibilitás:

$$\kappa = \kappa_0 + \frac{2\mu_0 m_{\text{Al}}}{A} = (\mathbf{2.04 \pm 0.02}) \cdot \mathbf{10^{-5}}, \tag{7}$$

ahol figyelembe vettük a statisztikus hiba mellett a szisztematikus hibát is. Az eredmény alátámasztja, hogy az alumínium valóban paramágneses.



3. ábra. A 2-es minta adatsorának grafikonja.

2.4. Az réz (5-ös minta) vizsgálata

A rézről tudjuk, hogy diamágneses anyag. A minta vizsgálata során igen hamar kiderült, hogy a minta nem lehet egykomponensű, hanem ferromágneses anyaggal szennyezett volt, s ez magyarázza a 4. ábrán látható nemlineáris viselkedést. A mért adatokat a 4. táblázat tartalmazza. A minta átmérőjét négy ponton mértem:

$$d = 7.98\text{mm} \Rightarrow r = (3.99 \pm 0.01)\text{mm}. \tag{8}$$

I_{tekercs}(A)	$U_H(mV)$	F/g(mg)	B(T)	$B^2(T^2)$	F(μN)
0	2.3	0	0.037	0.0014	0
0.5	12.3	0.7	0.116	0.0136	6.8
1.0	23.2	1.7	0.204	0.0420	16.6
1.5	34.7	2.7	0.298	0.0888	26.4
2.0	46.5	3.4	0.393	0.1548	33.3
2.5	58.2	3.8	0.488	0.2382	37.2
3.0	69.6	4.0	0.580	0.3367	39.2
3.5	80.7	3.8	0.670	0.4490	37.2
4.0	91.4	3.4	0.756	0.5725	33.3
4.5	101.6	2.4	0.839	0.7042	23.5
5.0	111.6	1.5	0.920	0.8465	14.7
5.5	121.1	0.3	0.996	0.9938	2.9
6.0	130.0	-1.0	1.068	1.1426	-9.8
6.5	138.4	-2.3	1.136	1.2924	-22.5
7.0	146.1	-3.6	1.199	1.438	-35.3

4. táblázat. Az 5-ös számú minta mérésének adatai.

2.5. A plexi szuszceptibilitásának mérése

A plexiről tudjuk, hogy diamágnes. A mérés menete megegyezik az előzőekkel. A minta átmérőjét négy ponton mértem:

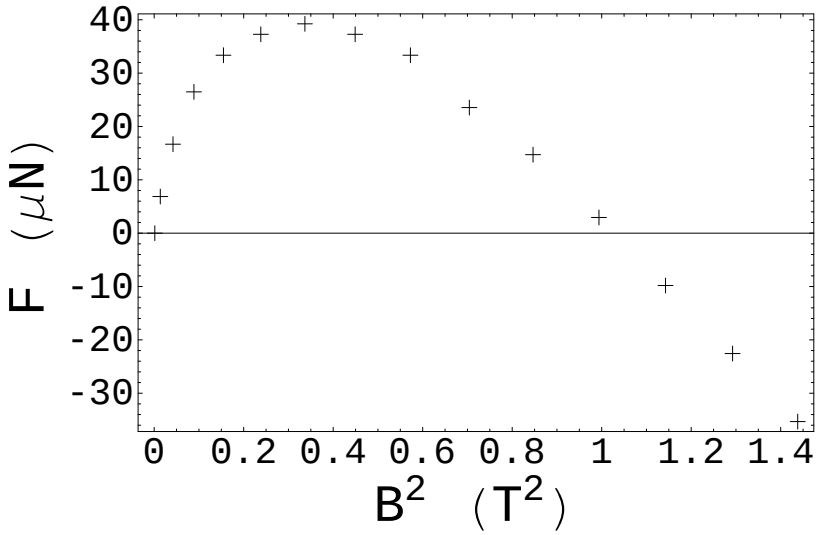
$$d = 7.99\text{mm} \Rightarrow r = (3.99 \pm 0.01)\text{mm}. \tag{9}$$

A mérési adatokat az 5. táblázat tartalmazza, az egyenes illesztésének eredménye az 5. ábrán látható. Az 5. ábrán látható egyenes meredeksége: $m_{\text{plexi}} = (-176 \pm 1)\frac{\mu\text{N}}{\text{T}}$. A (3) egyenlettel a szuszeptibilitás:

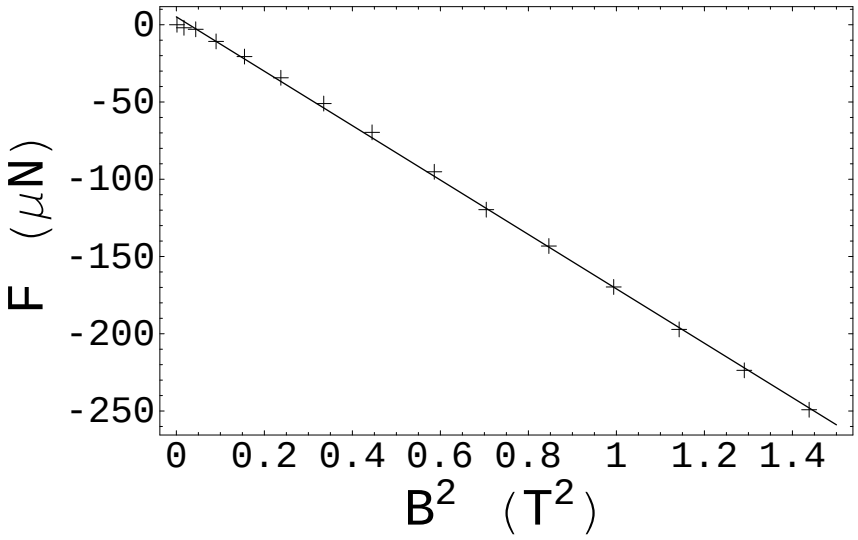
$$\kappa = \kappa_0 + \frac{2\mu_0 m_{\text{plexi}}}{A} = (\mathbf{-8.46 \pm 0.1}) \cdot \mathbf{10^{-6}}. \tag{10}$$

Hivatkozások

[1] Havancsák Károly: *Mérések a klasszikus fizika laboratóriumban*, ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 2003.



4. ábra. Az 5-ös minta adatsorának grafikonja. Jól látható, hogy a ferromágnes felmágnesezési szakaszának szűzgörbéjének és a diamágnes negatív meredekségű egyenesének az összege jelenik meg.



5. ábra. A plexi minta adatsorának grafikonja.

I_{tekercs}(A)	$U_H(mV)$	F/g(mg)	B(T)	$B^2(T^2)$	F(μN)
0	2.5	0	0.037	0.0014	0
0.5	14.1	-0.2	0.131	0.0172	-1.9
1.0	23.8	-0.3	0.209	0.0440	-2.9
1.5	35.0	-1.1	0.300	0.0902	-10.7
2.0	46.5	-2.1	0.393	0.1548	-20.6
2.5	58.1	-3.5	0.487	0.2374	-34.3
3.0	69.4	-5.2	0.578	0.3349	-51.0
3.5	80.7	-7.1	0.666	0.4447	-69.6
4.0	92.5	-9.7	0.765	0.5861	-95.1
4.5	101.6	-12.2	0.839	0.7042	-119.6
5.0	111.6	-14.6	0.920	0.8465	-143.2
5.5	121.1	-17.3	0.996	0.9938	-169.7
6.0	130.0	-20.1	1.068	1.1426	-197.1
6.5	138.4	-22.8	1.136	1.2924	-223.6
7.0	146.1	-25.4	1.199	1.438	-249.1

5. táblázat. A plexi minta mérésének adatai.