

Mágneses szuszceptibilitás mérése

Asztalos Bogdán

Hétfői csoport

mérés időpontja: 2017. 10. 16.

jegyzőkönyv leadásának időpontja: 2017. 11. 06.

A mérés célja

A nem ferromágneses anyagoknak is lehetnek mágneses tulajdonságaik, de ezek sok nagyságrenddel gyengébbek. Az anyagok mágneses permeabilitása felírható $\mu = \mu_0(1 + \kappa)$ alakban, ahol μ_0 a vákuum permeabilitása, κ pedig az anyag mágneses szuszceptibilitása. Nem ferromágneses anyagok esetén $|\kappa| \ll 1$, így mágneses kölcsönhatásokban nincs túl nagy szerepük. A mérés során ezt a κ értéket mérjük meg a kiadott mintákra.

A mérés eszközei

- Négy rúd alakú minta különböző anyagokból
- A mintákhoz hasonló, rúd alakú plexiedény, amibe vizet tölthetünk
- Elektromágnes
- Hall-szonda
- Digitális voltmérő
- Digitális mérleg
- Fluxusmérő
- Csavarmikrométer

A mérés menete

A Hall-szondán a körülötte lévő mágneses tér hatására feszültség jelenik meg, amit a digitális voltmérővel mérni tudunk. Ezáltal, ha ismerjük a Hall szondán megjelenő feszültségnek a függését a mágneses tértől, akkor a Hall-szonda feszültségéből következtetni tudunk a kialakult mágneses térre. Ehhez viszont először hitelesíteni kell a Hall-szondát.

A Hall-szonda hitelesítését úgy végezzük, hogy az elektromágnes által keltett térbe helyezzük és különböző áramokat átfolyatva az elektromágnesen, különböző mágneses teret keltünk, miközben figyeljük a Hall-szondán mért feszültséget. Adott áramhoz tartozó teret a fluxusmérővel mérjük: minden egyes gerjesztő áramhoz feljegyezzük, mekkora fluxust mértünk a fluxusmérővel. A fluxusmérő keresztmetszetének ismeretében kiszámolható a B mágneses indukció, amiből pedig meghatározható a Hall-szonda U_H feszültsége és B közötti kapcsolat.

Az $U_H - B$ függvénykapcsolat ismeretében már támaszkodhatunk a Hall-szondán megjelenő feszültségre, mint ami a mágneses teret méri, és így már vizsgálhatjuk, hogy hogyan viselkednek a minták a kialakult – ismert – mágneses térben. A mintákat ráakasztjuk a digitális mérleg alján lévő kampóhoz, ezzel mérni tudjuk a mintára ható erőket. Ha nincs tér, akkor csak a nehézségi erő hat rá. Amikor azonban a minta körül mágneses teret keltünk, a mintára a mágneses tér hatására függőleges erő kezd hatni, ami megváltoztatja a mérleg által mutatott értéket. A mérleg ugyan tömeget jelez ki, de ezt a g nehézségi gyorsulással megszorozva megkapjuk az erőt, amit érez. Ha kezdetben, amikor a minta úgy lógott, hogy nem volt mágneses tér, lenullázzuk a mérleget, akkor kijelzett érték pont az az erő, ami a mintára pluszban hat a mágneses tér miatt. Ezt feljegyezve, megkapjuk az összefüggést a mágneses tér és a mintára ható erő között, amiből már ki tudjuk számolni a minta anyagának szuszceptibilitását.

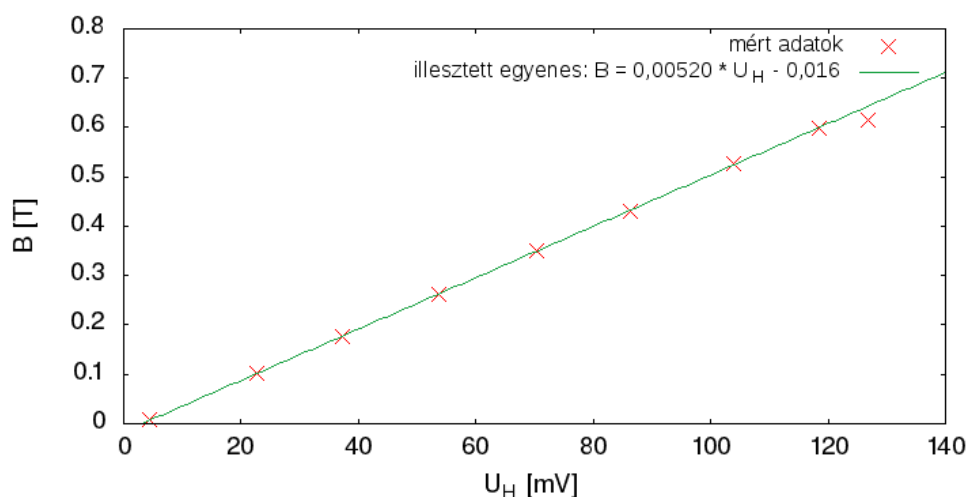
Kiértékelés

Hitelesítés

Az elektromágnesen 3 A-ig növeltük az áramot, 0,4 A-enként, és minden lépésben megmértük a Hall-szondán kialakuló feszültséget, valamint a fluxusmérővel a mágnespólok között lévő fluxust. A fluxusmérőben lévő tekercs menetszáma $n = 194$, a tekercs belső és külső sugara pedig $r_b = 3,15 \text{ mm}$ és $r_k = 4,8 \text{ mm}$. Ebből, a tekercs átlagos menetfelülete $\bar{F} = \frac{\pi}{3} (r_k^2 + r_k r_b + r_b^2) = 50,35 \text{ mm}^2$. Ezek ismeretében, a mért fluxusból megállapítható a mágneses indukció nagysága: $B = \frac{\Delta\Phi}{nF}$. A mért adatokat, és a hozzájuk tartozó számított B értéket az 1. táblázat tartalmazza, az összetartozó $B - U_H$ pontpárokat pedig az 1. ábrán ábrázoltuk.

$I \text{ (A)}$	$U_H \text{ (mV)}$	$\Delta\Phi \text{ (mVs)}$	$B \text{ (T)}$
0,0	4,4	0,08	0,008
0,4	22,7	0,99	0,101
0,8	37,2	1,72	0,176
1,2	53,8	2,57	0,263
1,6	70,4	3,42	0,350
2,0	86,4	4,21	0,431
2,4	103,9	5,14	0,526
2,8	118,5	5,86	0,600
3,0	126,7	6,00	0,614

1. táblázat. A Hall-szonda hitelesítésekor mért adatok



1. ábra. A Hall-szonda hitelesítése során kimért $B - U_H$ párok kapcsolata

Az 1. ábrán jól látszik, hogy a B és U_H között fennálló kapcsolat valóban lineáris ahogy vártuk. Az adatokra egy $aX + b$ egyenletű egyenest illesztettünk (az illesztésbe nem szá-

mítottuk bele az utolsó adatot, ami szemmel láthatóan kilóg a sorból), és az illesztés paramétereire a következőket kaptuk: $a = (5,20 \pm 0,01) \frac{mT}{mV}$ valamint $b = (-16,3 \pm 1,0) T$. Ez alapján tehát a továbbiakban a Hall-szonda feszültsége és a mágneses indukció között lévő összefüggést a következőnek fogjuk tekinteni:

$$B = 5,20 \frac{mT}{mV} \cdot U_H - 16,3 mT$$

Szuszeptibilitás mérés

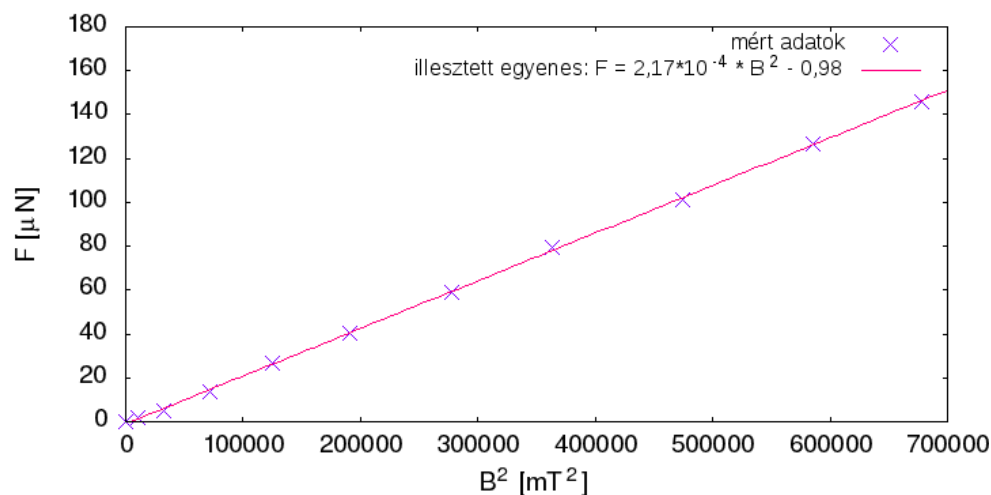
Minden minta vizsgálata során megmértük az adott árammal való gerjesztés során a Hall-szondán lévő feszültséget és a mérleg által mutatott értéket. A Hall-szonda feszültségéből a hitelesítés során kapott összefüggés segítségével kiszámoltuk a B mágneses indukciót illetve annak négyzetét, valamint a mérleg által mutatott értékből kiszámoltuk a mintára ható erőt. Ezeket az adatokat – minden mintára külön-külön – a 2-7. táblázatok tartalmazzák.

Minden mintára ábrázoltuk az összetartozó $F - B^2$ adatpárokat, és illesztettünk rá egy egyenest. Az egyenes m meredekségéből kaphatjuk meg a minták anyagának κ szuszeptibilitását az alábbi képlet szerint:

$$\kappa = \kappa_0 + \frac{2\mu_0 m}{A} \quad \text{valamint} \quad \Delta\kappa = (\delta m + \delta A) \frac{2\mu_0 m}{A}$$

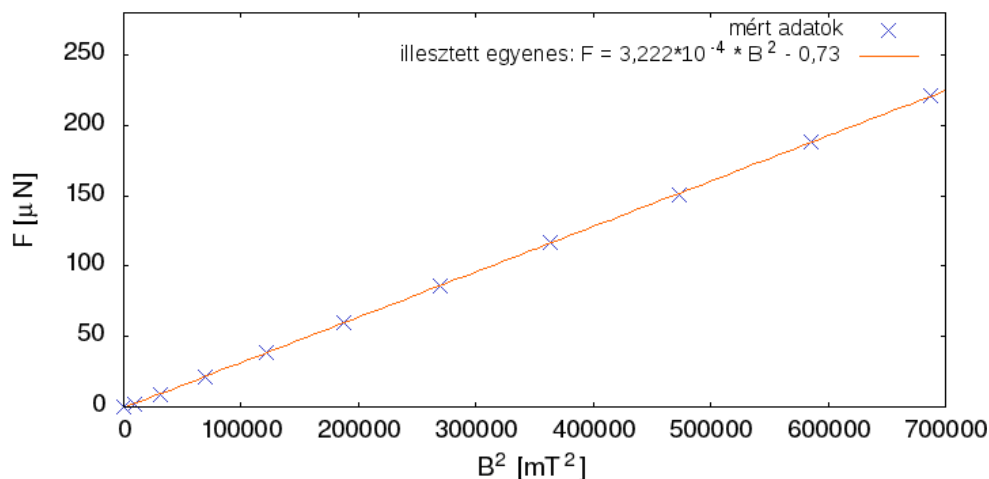
ahol $\kappa_0 = 3,77 \cdot 10^{-7}$ a levegő szuszeptibilitása, A pedig a minta keresztmetszete. Ez utóbbit úgy kaptuk meg, hogy minden mintán több helyen megmértük az átmérőt és ezek átlagát (mint átlagos átmérőből) kiszámoltuk a keresztmetszetet.

12-es minta A 12-es minta keresztmetszete $d = (7,74 \pm 0,02) mm$, amiből $A = (47,1 \pm 0,2) mm^2$. A mérés adatait a 2. táblázat tartalmazza, a $F - B^2$ kapcsolatot pedig a 2. ábra. Az illesztett egyenes meredeksége $m = (217 \pm 1) \cdot 10^{-6} \frac{N}{T^2}$, amiből $\kappa_{12} = (1,20 \pm 0,01) \cdot 10^{-5}$.



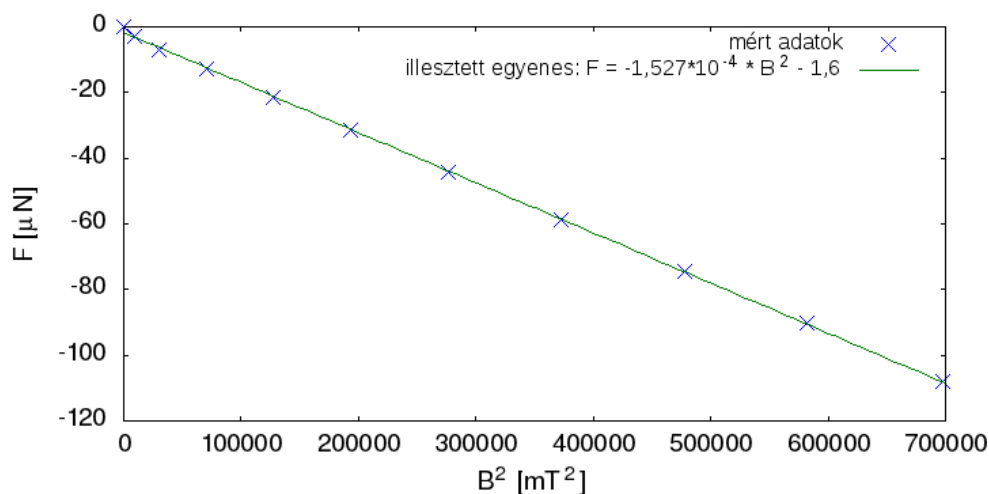
2. ábra. A 12-es minta vizsgálata során mért F és B^2 adatok kapcsolata

14-es minta A 14-es minta keresztmetszete $d = (7,76 \pm 0,02) \text{ mm}$, amiből $A = (47,2 \pm 0,2) \text{ mm}^2$. A mérés adatait a 3. táblázat tartalmazza, a $F - B^2$ kapcsolatot pedig a 3. ábra. Az illesztett egyenes meredeksége $m = (322,2 \pm 0,6) \cdot 10^{-6} \frac{\text{N}}{\text{T}^2}$, amiből $\kappa_{12} = (1,75 \pm 0,01) \cdot 10^{-5}$.



3. ábra. A 14-es minta vizsgálata során mért F és B^2 adatok kapcsolata

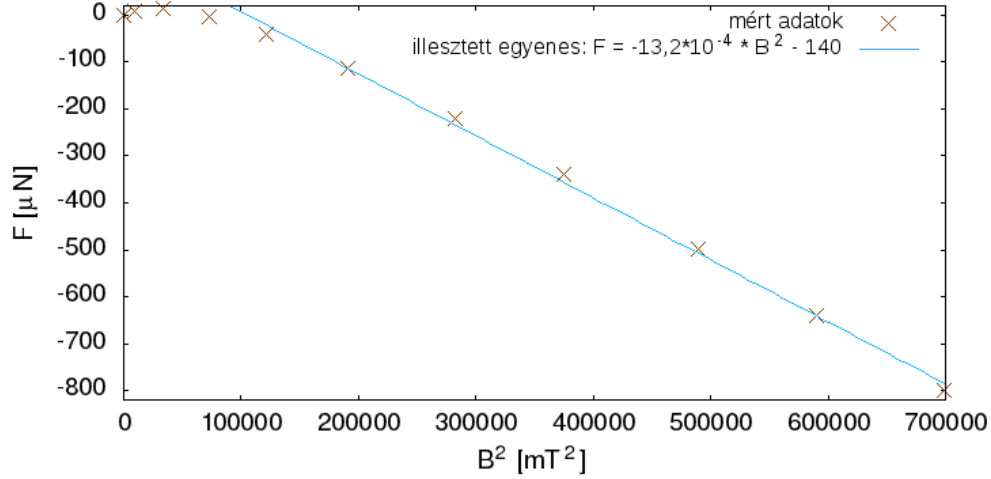
19-es minta A 19-es minta keresztmetszete $d = (7,99 \pm 0,07) \text{ mm}$, amiből $A = (50,1 \pm 0,9) \text{ mm}^2$. A mérés adatait a 4. táblázat tartalmazza, a $F - B^2$ kapcsolatot pedig a 4. ábra. Az illesztett egyenes meredeksége $m = (-152,7 \pm 0,9) \cdot 10^{-6} \frac{\text{N}}{\text{T}^2}$, amiből $\kappa_{12} = (-7,3 \pm 0,02) \cdot 10^{-6}$.



4. ábra. A 19-es minta vizsgálata során mért F és B^2 adatok kapcsolata

grafit minta A grafit minta keresztmetszete $d = (7,66 \pm 0,01) \text{ mm}$, amiből $A = (46,1 \pm 0,1) \text{ mm}^2$. A mérés adatait az 5. táblázat tartalmazza, a $F - B^2$ kapcsolatot

pedig az 5. ábra. Ezúttal az első néhány pont nem illeszkedik az egyenesre (valószínűleg a grafitban lévő paramágneses szennyeződés miatt), így az egyenest az utolsó pontokra illesztettük. A meredeksége $m = (-1320 \pm 30) \cdot 10^{-6} \frac{N}{T^2}$, amiből $\kappa_{12} = (-7,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-5}$.



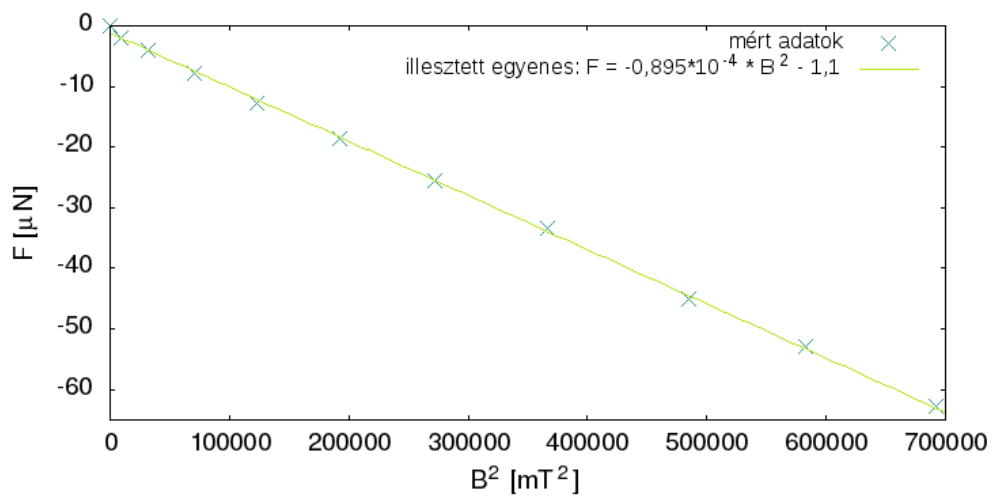
5. ábra. A grafit minta vizsgálata során mért F és B^2 adatok kapcsolata

A víz szuszceptibilitása A plexiedényt a többi mintához képest ugyanúgy megvizsgáltuk, először üresen, majd vízzel teli. Az üres állapotban történő mérés adatait a 6. táblázat, a teli állapotban mért mérés adatait a 7. táblázat tartalmazza. A $F - B^2$ kapcsolatot a 6. és 7. ábrák.

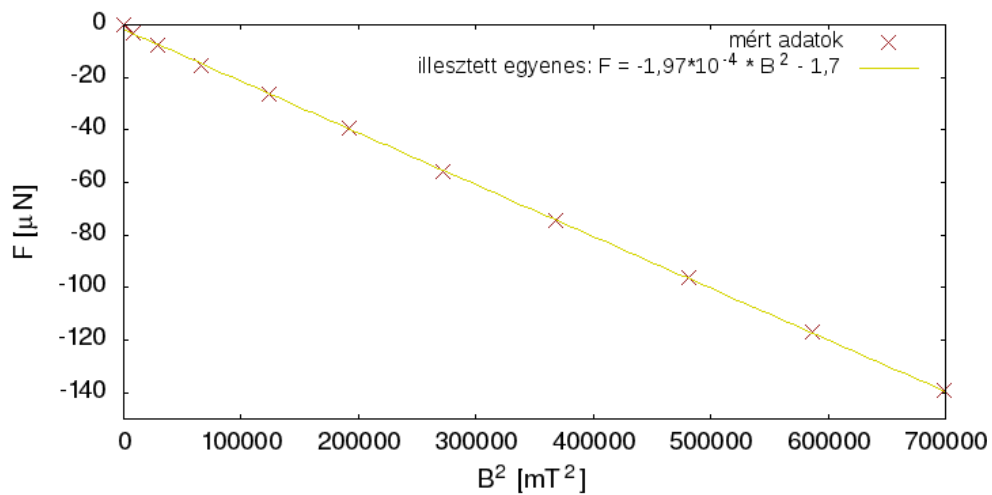
A plexihenger belső átmérője $d_b = (6,10 \pm 0,01) \text{ mm}$, amiből a belső keresztmetszet $A_b = (29,2 \pm 0,01) \text{ mm}^2$. A két ábrán az illesztett egyenes meredeksége $m_1 = (-89,5 \pm 0,7) \cdot 10^{-6} \frac{N}{T^2}$ és $m_2 = (-197 \pm 1) \cdot 10^{-6} \frac{N}{T^2}$. Ezekből kiszámítható a víz szuszceptibilitása az alábbi összefüggés alapján:

$$\kappa_v = \kappa_0 + \frac{2\mu_0(m_2 - m_1)}{A_b} \quad \text{valamint} \quad \Delta\kappa_v = \frac{2\mu_0(m_2 - m_1)}{A_b} \left(\frac{\Delta A_b}{A_b} + \frac{\Delta m_1 + \Delta m_2}{m_2 - m_1} \right)$$

Ezekből: $\kappa_v = (-8,9 \pm 0,2) \cdot 10^{-6}$.



6. ábra. Az üres plexi minta vizsgálata során mért F és B^2 adatok kapcsolata



7. ábra. A vízzel telt plexi minta vizsgálata során mért F és B^2 adatok kapcsolata

I (A)	U_H (mV)	F/g (mg)	B (mT)	B^2 (mT ²)	F (μ N)
0,0	4,5	0,0	7,15	51,1	0,0
0,4	22,7	0,2	102	10400	1,96
0,8	38,0	0,5	181	32900	4,91
1,2	54,5	1,4	267	71369	13,7
1,6	71,1	2,7	353	125000	26,5
2,0	87,3	4,1	437	191000	40,2
2,4	104,4	6,0	527	277000	58,9
2,8	119,7	8,1	606	367000	79,5
3,2	135,5	10,3	688	474000	101
3,6	150,2	12,9	765	585000	127
4,0	161,5	14,9	824	678000	146

2. táblázat. A 12. minta vizsgálata közben mért adatok

I (A)	U_H (mV)	F/g (mg)	B (mT)	B^2 (mT ²)	F (μ N)
0,0	4,5	0,0	7,15	51,1	0,0
0,4	21,9	0,2	97,6	9530	1,96
0,8	37,0	0,9	176	31000	8,83
1,2	53,8	2,2	264	69400	21,6
1,6	70,2	3,9	349	122000	38,3
2,0	86,3	6,1	433	187000	59,8
2,4	103,0	8,8	519	270000	86,3
2,8	119,1	11,9	603	364000	117
3,2	135,0	15,4	688	473000	151
3,6	150,3	19,2	765	586000	188
4,0	162,6	22,5	829	688000	221

3. táblázat. A 14. minta vizsgálata közben mért adatok

I (A)	U_H (mV)	F/g (mg)	B (mT)	B^2 (mT ²)	F (μ N)
0,0	4,4	0,0	6,63	44,0	0,0
0,4	21,5	-0,3	95,6	9130	-2,94
0,8	36,7	-0,7	175	30500	-6,87
1,2	54,3	-1,3	266	70800	-12,8
1,6	71,6	-2,2	356	127000	-21,6
2,0	87,6	-3,2	439	193000	-31,4
2,4	104,3	-4,5	526	277000	-44,1
2,8	120,5	-6,0	610	373000	-58,9
3,2	136,1	-7,6	691	478000	-74,6
3,6	149,8	-9,2	763	582000	-90,3
4,0	163,8	-11,0	836	698000	-108

4. táblázat. A 19. minta vizsgálata közben mért adatok

I (A)	U_H (mV)	F/g (mg)	B (mT)	B^2 (mT ²)	F (μ N)
0,0	4,5	0,0	7,15	51,1	0,0
0,4	21,3	0,9	94,5	8930	8,83
0,8	38,2	1,4	182	33300	13,7
1,2	54,9	-0,3	269	72500	-2,94
1,6	70,1	-4,3	348	121000	-42,2
2,0	87,2	-11,4	437	191000	-112
2,4	105,3	-22,5	531	282000	-221
2,8	120,8	-34,6	612	374000	-339
3,2	137,7	-50,8	700	490000	-498
3,6	150,9	-65,4	768	590000	-642
4,0	163,9	-81,5	836	699000	-800

5. táblázat. A grafit minta vizsgálata közben mért adatok

I (A)	U_H (mV)	F/g (mg)	B (mT)	B^2 (mT ²)	F (μ N)
0,0	4,4	0,0	6,63	44,0	0,0
0,4	20,9	-0,2	92,4	8540	-1,96
0,8	37,7	-0,4	180	32300	-3,92
1,2	54,1	-0,8	265	70300	-7,85
1,6	70,7	-1,3	351	123000	-12,8
2,0	87,4	-1,9	438	192000	-18,6
2,4	103,4	-2,6	521	272000	-25,5
2,8	119,6	-3,4	606	367000	-33,4
3,2	137,0	-4,6	696	485000	-45,1
3,6	149,9	-5,4	763	583000	-53,0
4,0	163,1	-6,4	832	692000	-62,8

6. táblázat. Az üres plexiedény vizsgálata közben mért adatok

I (A)	U_H (mV)	F/g (mg)	B (mT)	B^2 (mT ²)	F (μ N)
0,0	4,7	0,0	8,19	67,1	0,0
0,4	20,7	-0,3	91,4	8350	-2,94
0,8	35,9	-0,8	170	29000	-7,85
1,2	52,5	-1,6	257	65900	-15,7
1,6	70,7	-2,7	351	123000	-26,5
2,0	87,4	-4,0	438	192000	-39,2
2,4	103,3	-5,7	521	271000	-55,9
2,8	119,7	-7,6	606	367000	-74,6
3,2	136,5	-9,8	694	481000	-96,1
3,6	150,4	-11,9	766	586000	-117
4,0	163,9	-14,2	836	699000	-139

7. táblázat. A vízzel telt plexiedény vizsgálata közben mért adatok