

KLASSZIKUS FIZIKA LABORATÓRIUM

7. MÉRÉS

Mágneses szuszceptibilitás mérése

Mérést végezte:

Enyingi Vera Atala

ENVSAAT.ELTE



Mérés időpontja:

2011. október 5.

Szerda délelőtti csoport

1. A mérés célja

Az anyagokat mágneses térbe helyezve az anyagban mágneses dipólmomentum (\mathbf{m}) alakul ki. Első közelítésben ennek egységnyi térfogatra (V) eső része arányok a \mathbf{H} mágneses térerősséggel.

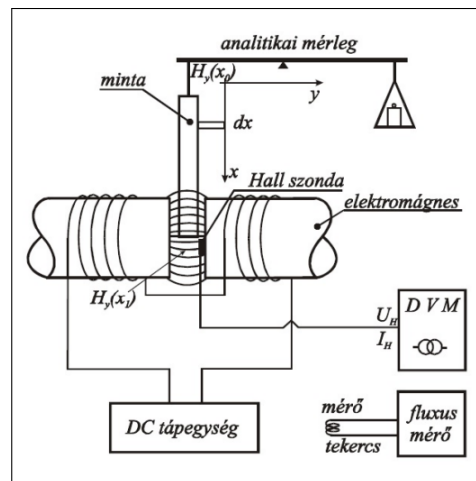
$$\mathbf{M} = \frac{\mathbf{m}}{V}$$

Az arányossági tényező neve mágneses szuszceptibilitás, jele κ . A méréssel ennek az értéknek a meghatározását kívánjuk elérni.

2. A mérés eszközei

A mérési elrendezés az alábbi képen látható.

- Hall-szonda
- Analitikai mérleg
- Fluxusmérő
- Elektromágnes
- Voltmérő
- Áramgenerátor
- 19-es számú réz minta
- 13-as számú alumínium minta



1. ábra. A mérési elrendezés vázlatja

3. A mérés elmélete

Az anyagok külső mágneses tér hatására polarizálódnak. A \mathbf{M} mágnesezettség és a \mathbf{H} mágneses térerősség közötti kapcsolatra, kis térerősségek és izotróp anyagok esetén fennáll az alábbi összefüggés:

$$\mathbf{M} = \kappa \mu_0 \mathbf{H}$$

Ahol κ dimenziótlan mennyiség, melynek neve szuszceptibilitás, μ_0 pedig a mágneses permeabilitás.

A \mathbf{B} mágneses indukció és a \mathbf{H} mágneses térerősség közötti összefüggés definiálja a μ relatív mágneses permeabilitás. Ekkor az alábbi összefüggések állnak fenn:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \kappa \mathbf{H}$$

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

Ezekből adódik, hogy:

$$\mu = 1 + \kappa$$

Innen látszik, hogy μ szintén dimenziótlan mennyiség.

Az anyagokat a szuszceptibilitásuk alapján osztályozni lehet:

- *paramágneses anyag*: μ kis pozitív szám. A mágneses térrel egyező irányú a mágnesezettség.
- *diamágneses anyag*: μ kis negatív szám. A mágneses térrel ellenkező irányú a mágnesezettség.
- *ferromágneses anyag*: μ és κ nagy pozitív számok, melyek \mathbf{H} függők.

4. A mérés menete

A mérés során az anyagminta κ szuszceptibilitását határozzuk meg Gouy-módszerrel. A mintát elektromágnes inhomogén mágneses terébe helyezzük, a mágneses indukció nagyságát hitelesített Hall-szondával mértük. A mintára ható erőt analitikai mérleggel határoztuk meg.

A mérést az ablakhoz közelebbi, második mérőhelyen végeztem. Itt a maximálisan elérhető tér 0,7 T.

A mintát úgy kell elhelyeznünk, hogy az egyik vége az erős $H_y(x_1)$ térben legyen, a másik vége pedig a közel nulla térerősségű x_0 helyen. A rá ható erő nagysága ekkor az alábbi összefüggésből számolható:

$$F = \frac{(\kappa - \kappa_0)A\mu_0 H_y^2}{2} = \frac{(\kappa - \kappa_0)AB_y^2}{2\mu_0} \quad (1)$$

Ahol az alábbi értékek szerepelnek: $\kappa_0 = 3,77 \cdot 10^{-7}$ a levegő szuszceptibilitása, A a minta keresztmetszete és B_y az y irányú mágneses indukció. A szuszceptibilitás mérése során megadjuk az $F(B^2)$ grafikont, ahonnan kiszámoljuk κ értékét.

4.1. A Hall-szonda hitelesítése

Az elektromágnessel előállított teret a *Hall-szondával* mérjük. A szonda és a mágneses tér kapcsolatának megállapítása egy mérőtekerccsel és fluxusmérővel történik, ezekkel mérjük a mágneses indukció nagyságát. A Hall-effektusra ismert összefüggés szerint:

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

R_H a Hall-állandó, d a félvezető lapka vastagsága, I_H a Hall-áram, B a mágneses indukció.

A hitelesítéskor megadjuk az $U_H(B)$ függvényt, amiből következtethetünk a mágneses indukcióra.

A mérés során fontos I_H állandósága.

Az n menetszámú tekercset a térbe helyezzük, a felületét az erővonalakra merőlegesen állítjuk be. Ezután kihúzzuk olyan távolságra, ahol a térerősség már nullának tekinthető. A tekercsen áthaladó mágneses fluxus ekkor folyamatosan változik, ami az indukciótörvény miatt $U = \frac{d\Phi}{dt}$ feszültséget indukál. A τ időre integrálva innen megkapjuk a teljes fluxusváltozást. Ezt egy fluxusmérővel mérjük.

Innen B könnyen számolható:

$$B = \frac{\Delta\Phi}{n\bar{F}}$$

n a tekercs menetszáma, és \bar{F} az átlagos menetfelület.

4.2. A minta mérése

A 1 összefüggés alapján F -et B^2 függvényében ábrázolva egy egyenest kapunk m meredekséggel. Ezzel kifejezhető a mágneses szuszceptibilitás:

$$\kappa = \kappa_0 + \frac{2\mu_0 m}{A}$$

5. Mérési adatok és kiértékelés

5.1. A Hall-szonda hitelesítése

A hitelesítéshez használt mágnes adatai a következők:

n menetszám	194
r_k külső menet sugara	$4,8 \pm 0,05\text{mm}$
r_b belső menet rugara	$3,05 \pm 0,05\text{mm}$

A tekercs felületének számítása:

$$\bar{F} = \frac{\pi r_k^3 - r_b^3}{3 r_k - r_b} = (49,2 \pm 0,25) \cdot 10^{-6}\text{m}^2$$

$$B = a \cdot U_H + b$$

A fenti, 1. táblázatban szereplő $U_H - B$ adatpárokra illesztettem a fenti egyenletű egyenest, és így kaptam az a és b paramétereket:

$$a = (4,163 \pm 0,004) \cdot 10^{-3} \frac{T}{V}$$

$$b = 0,0239 \pm 0,0004T$$

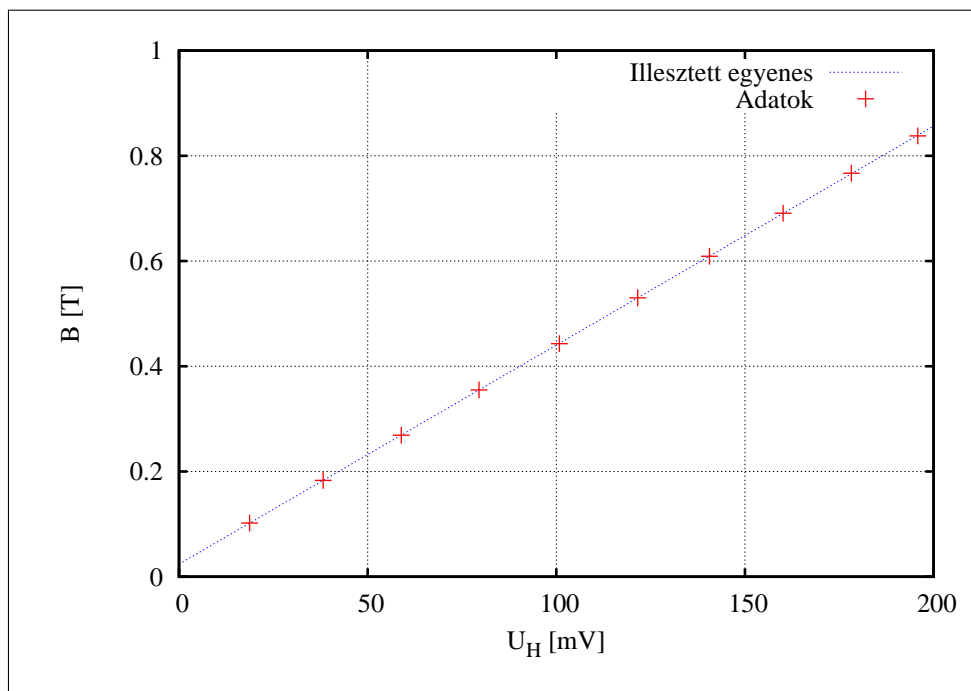
$I[A]$	$\Phi[mVs]$	$U_H[mV]$	$B[T]$
0,4	0,97	18,7	0,102
0,8	1,75	38,2	0,183
1,2	2,57	58,9	0,269
1,6	3,39	79,5	0,355
2,0	4,23	100,8	0,443
2,4	5,06	121,6	0,530
2,8	5,81	140,6	0,609
3,2	6,60	160,1	0,691
3,6	7,32	178,2	0,767
4,0	8,00	195,8	0,838

1. táblázat. A Hall-szonda kiértékelése

B tehát ismertnek tekinthető a fenti egyenlet alapján.

$$B = 4,163 \cdot 10^{-3} U_H + 0,0239$$

Az illesztett egyenest és a mért adatokat az alábbi grafikonon ábrázoltam.



2. ábra. A Hall-mérés grafikonja

A mérések hibája: $\Delta I = 0,1A$, $\Delta U = 0,1mV$, $\Delta \Phi = 0,01mVs$.

B hibája ezek alapján számolható:

$$\Delta B = B \left(\frac{\Delta \Phi}{\Phi} + \frac{\Delta \bar{F}}{\bar{F}} \right) = 0,1B$$

A szonda fontos paramétere az $\frac{R_H}{d}$ (R_H a Hall-állandó, d pedig a szonda lapjának vastagsága.) Erre felírhatjuk a következő összefüggést:

$$U_H = \frac{R_H}{d} I_H \cdot B \quad (2)$$

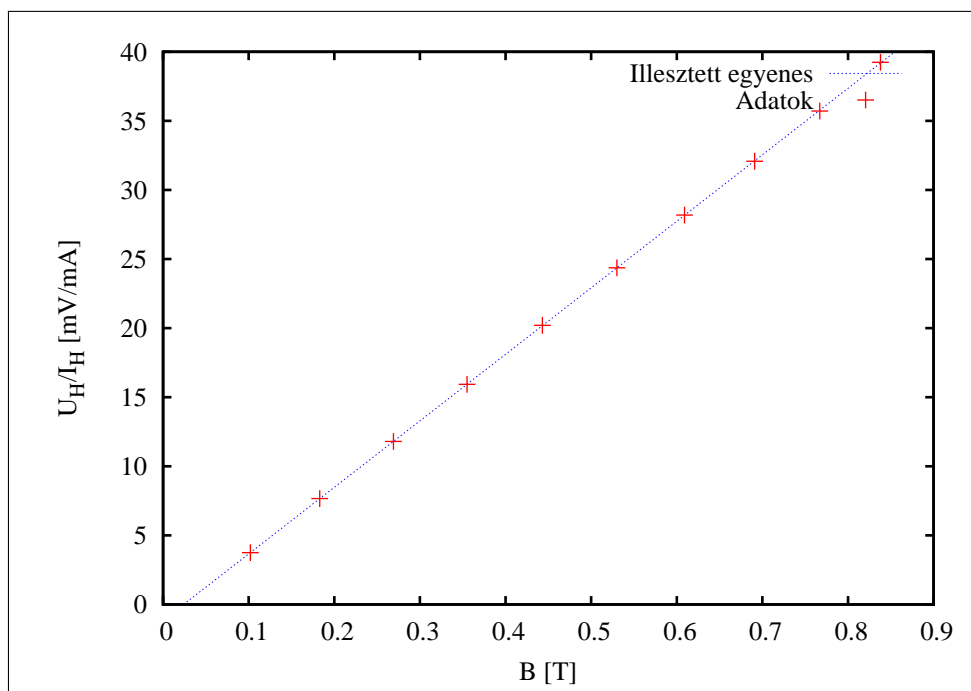
$I_H = 4,99mA$ a szondán átfolyó áram.

A fenti, 2. egyenletet átrendezve:

$$\frac{U_H}{I_H} = HB \quad (3)$$

Ahol H a Hall-állandó. Így tehát egy újabb egyenes illesztése után az alábbi adatot kapjuk:

$$H = \frac{R_H}{d} = 48.14 \pm 0.04 \frac{V}{AT}$$



3. ábra. A Hall-állandó

5.2. A szuszceptibilitás mérése

A mérés során a 19-es számú réz és a 13-as számú aluminium mintát kellett megmérnem.

5.2.1. A 19-es számú réz minta szuszceptibilitása

A minta mérésének első lépéseként megmértem a minta átmérőjét: A mérés hibája:

$2r[mm]$	7,96	7,89	7,98	7,94
----------	------	------	------	------

2. táblázat. A réz rúd átmérőjének mért értékei

$\Delta 2r = 0,01mm$. A fenti adatokból számolt átlagos sugár:

$$\bar{r} = 3,97 \pm 0,03mm$$

A keresztmetszet a fenti adattal számolva:

$$A = \bar{r}^2 \pi = 49,51 \pm 0,06mm^2$$

Az általam mért adatokat az alábbi táblázat tartalmazza: A számolás során $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$.

Az $F(B^2)$ függvény ábrázolásával, egyenes illesztése után kapjuk meg a szuszceptibilitás értékét.

$$m = -170 \pm 5,9 \frac{\mu N}{T^2}$$

$$\kappa = \kappa_0 + \frac{2\mu_0}{A} m = (9 \pm 0,24) \cdot 10^{-6}$$

$$\frac{\Delta \kappa}{\kappa} = \frac{\delta m}{m} + \frac{\Delta A}{A}$$

A hibát [1] alapján számoltam.

A réz tehát a kapott adatok alapján, elvárásainkhoz igazodva diamégneses anyagként viselkedik.

5.2.2. A 13-as alumínium minta

A mérés hibája: $\Delta 2r = 0,01mm$. A fenti adatokból számolt átlagos sugár:

$$\bar{r} = 3,75 \pm 0,02mm$$

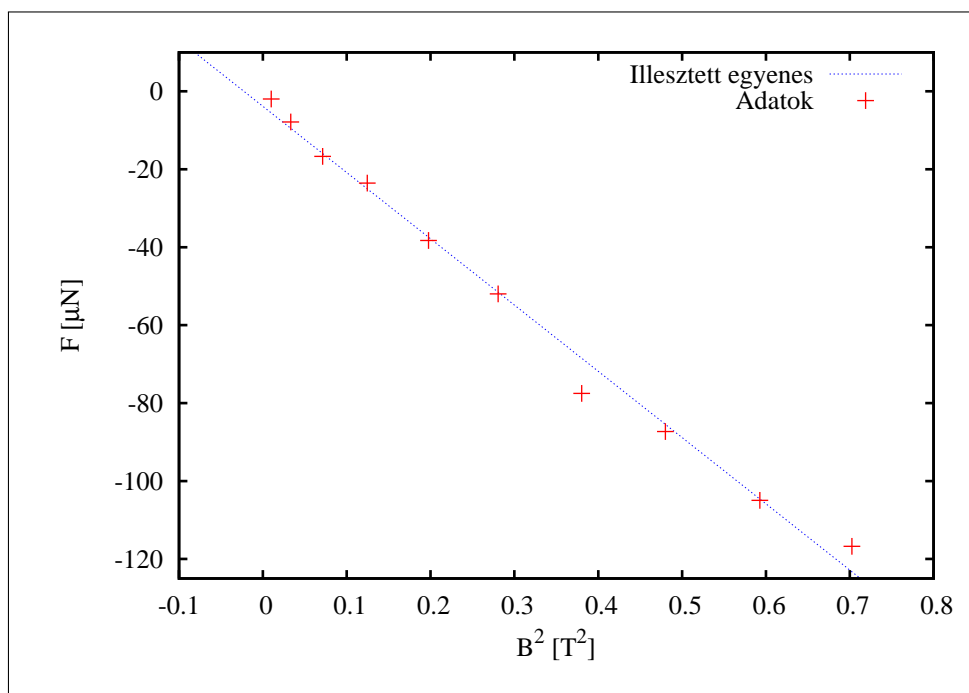
A keresztmetszet a fenti adattal számolva:

$$A = \bar{r}^2 \pi = 44,2 \pm 0,03mm^2$$

Az általam mért adatokat az alábbi táblázat tartalmazza:

I [A]	U_H [mV]	Δm [g]	B [T]	B^2 [T ²]	F [μ N]
0,4	18,1	-0,0002	0,10	0,01	-1,96
0,8	38,1	-0,0008	0,18	0,03	-7,85
1,2	58,4	-0,0017	0,27	0,07	-16,68
1,6	79,0	-0,0024	0,35	0,12	-23,54
2,0	101,0	-0,0039	0,44	0,20	-38,26
2,4	121,5	-0,0053	0,53	0,28	-51,99
2,8	142,4	-0,0079	0,62	0,38	-77,50
3,2	160,7	-0,0089	0,69	0,48	-87,31
3,6	179,2	-0,0107	0,77	0,59	-104,97
4,0	195,6	-0,0119	0,84	0,70	-116,74

3. táblázat. A réz minta mért és számolt adatai



4. ábra. A 19-es réz minta $F(B^2)$ grafikonja

Az $F(B^2)$ függvényt ábrázoltam, majd az egyenes illesztésekor kapott paraméterek alapján meghatároztam a szuszceptibilitás értékét.

$$m = 362,2 \pm 1,1 \frac{\mu N}{T^2}$$

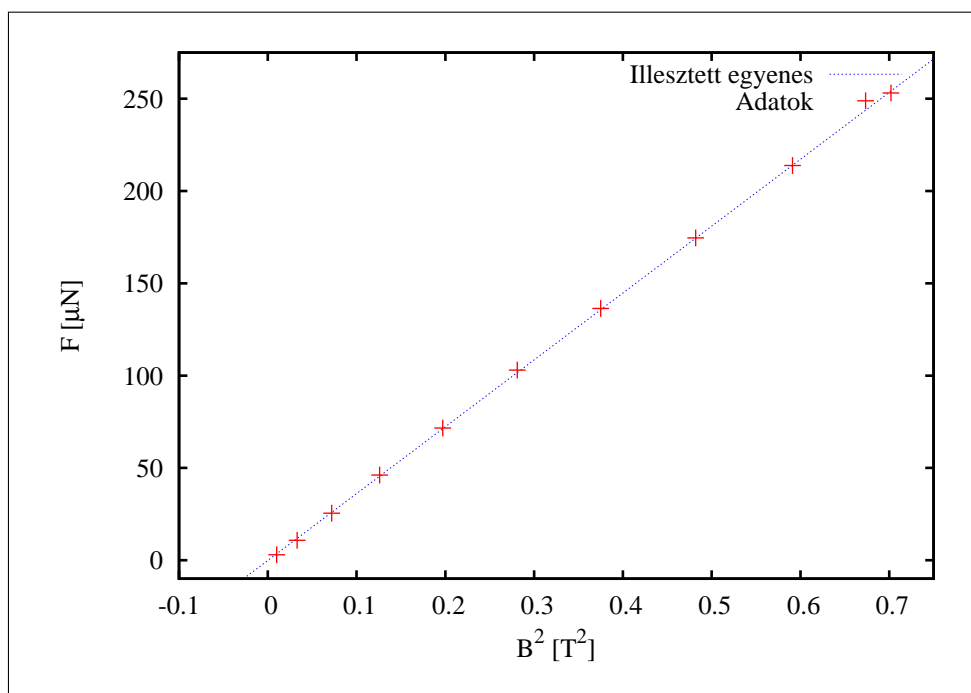
$$\kappa = \kappa_0 + \frac{2\mu_0}{A} m = (18,8 \pm 0,2) \cdot 10^{-6}$$

$2r[mm]$	7,52	7,51	7,47	7,51
----------	------	------	------	------

4. táblázat. Az alumínium rúd átmérőjének mért értékei

I [A]	U_H [mV]	Δm [g]	B [T]	B^2 [T ²]	F [μ N]
0,4	17,7	0,0003	0,098	0,010	2,94
0,8	37,6	0,0011	0,180	0,033	10,79
1,2	58,8	0,0026	0,269	0,072	25,51
1,6	79,6	0,0047	0,355	0,126	46,11
2,0	100,8	0,0073	0,444	0,197	71,61
2,4	121,7	0,0105	0,531	0,281	103,01
2,8	141,4	0,0139	0,613	0,375	136,36
3,2	161,0	0,0178	0,694	0,482	174,62
3,6	178,9	0,0218	0,769	0,591	213,86
4,0	195,5	0,0258	0,838	0,702	253,10

5. táblázat. Az alumínium minta mért és számolt adatai



5. ábra. A 13-es alumínium minta $F(B^2)$ grafikonja

$$\frac{\Delta\kappa}{\kappa} = \frac{\delta m}{m} + \frac{\Delta A}{A}$$

A hibát [1] alapján számoltam.

Ez alapján látható, hogy az alumínium paramágneses anyag.

5.3. A mágneses indukció helyfüggése

A mérés utolsó része volt, hogy egy mobil Hall-szonda segítségével a mágneses indukció helyfüggését kellett megvizsgálnom. A Hall-feszültséget arányosnak vesszük a mágneses indukcióval, mivel a fluxust nem mérjük.

Minderre azért van szükség, hogy a minta végén létrejövő erő elhanyagolhatóságát igazoljuk.

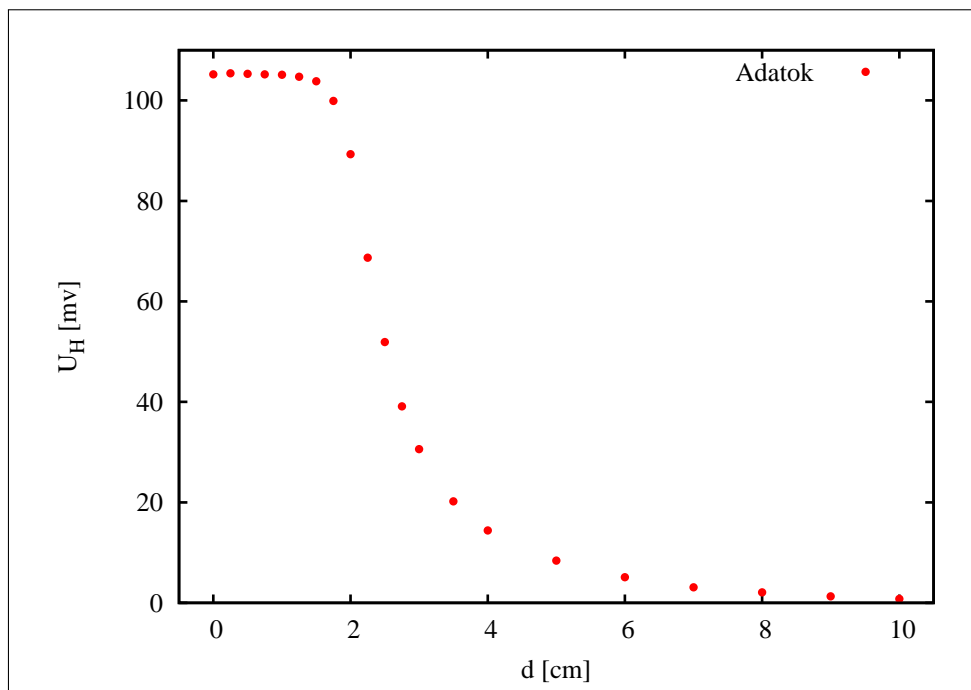
A mérés során kapott adatok:

d [cm]	U_H [mV]	d [cm]	U_H [mV]	d [cm]	U_H [mV]
0	102,2	1,75	96,9	4	11,4
0,25	102,4	2	86,3	5	5,4
0,5	102,3	2,25	65,7	6	2,1
0,75	102,2	2,5	48,9	7	0,1
1	102,1	2,75	36,1	8	-0,9
1,25	101,7	3	27,6	9	-1,7
1,5	100,8	3,5	17,2	10	-2,2

6. táblázat. A mágneses indukció a hely függvényében

A pontok ábrázolásakor U_H -t annyival eltoltam, hogy ne kapjunk negatív értéket, hiszen az azt jelentené, hogy B nagysága negatív, aminek nincs fizikai értelme.

Az ábrázolt pontok alapján könnyen belátható, hogy a nagyjából 10cm-es rúd végén lehanyagolható a mágneses tér erőssége a közepéhez képest.



6. ábra. A térerősség a hely függvényében

6. A mérés végeredményei

Íme a mérés végeredményei még egyszer:

$$\kappa_{19} = (9 \pm 0,24) \cdot 10^{-6}$$

$$\kappa_{13} = (18,8 \pm 0,2) \cdot 10^{-6}$$

Hivatkozások

- [1] Böhönyey - Havancsák - Huhn: Mérések a klasszikus fizika laboratóriumban, Szerkesztette: Havancsák Károly, ELTE Eötvös Kiadó, Budapest, 2003.