Jegyzőkönyv

7.
Mágneses szuszceptibilitás mérése

Készítette:
Bozsoki Péter,
másodéves fizikushallgató

1999. február 19., péntek

1. A mérés célja

A tapasztalatok szerint a különböző anyagok különbözőképpen viselkednek mágneses térben. Az anyag "reakciója" a mágneses térre három fajta lehet:

- az anyag megpróbálja csökkenteni azt a mágneses teret, amiben van. Ezt úgy éri el, hogy a **H** külső mágneses térerősség hatására az anyag *mágneses dipólmomentum vektorának* térfogategységre eső része (ami a **H** külső mágneses térerősséghez hasonlóan vektoriális mennyiség, neve *mágnesezettség* és jele **M**) iránya ellentétes lesz **H**-val, nagysága pedig **H** α-szorosa (α pozitív valós szám). Az ilyen anyagokat <u>diamágneseknek</u> hívjuk.
- az anyag tovább növeli a mágneses térerősséget, de csak kis mértékben. Ezen anyagoknál **M** iránya azonos **H**-val, és szintén α-szorosa (α pozitív valós szám). Az ilyen anyagok neve <u>paramágnes.</u>
- az anyag nagy mértékben erősíti a mágneses térerősséget. Ezek **H(M)** függvénye nem lineáris, azonban **H** és **M** iránya azonos. Ezen anyagokat <u>ferromágneseknek</u> nevezzük.

A fentieket meg lehet úgy is fogalmazni, hogy a **H(M)** függvény minden esetben $\kappa' \cdot \mathbf{M}$ alakú. Dimenzióokok miatt κ' helyett $\kappa\mu_0$-t használunk, ahol κ valós szám (neve mágneses szuszceptibilitás), μ_0 értéke pedig $4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am (s neve mágneses permeabilitás). Ezen felírás alkalmazásakor a diagmágneses anyagok κ-ja alacsony negatív érték és konstans (pontosabban nem függ a mágneses térerősségtől; az anyagtól, a hőmérséklettől, stb. függhet!) a paramágneses anyagokra jellemző κ alacsony pozitív szám, mely nem függ **H**-tól, míg a ferromágneses anyagokra jellemző κ függ a mágneses tértől.

Jelen mérés célja néhány dia- illetve paramágneses anyag mágneses szuszceptibilitásának meghatározása volt a klasszikus Gouy-módszer szerint.

2. A mérés elve (a Gouy-módszer)

Ha az anyagot mágneses térbe helyezzük, akkor a mágneses dipólusokra erő hat. Ha a tér inhomogén, akkor különböző erő hat az egyik (amúgy fizikailag nem létező) mágneses monopólusra (amelyet a mágneses dipólus képzeletbeli "kettévágásával" hozunk létre) mint a másikra. Az így keletkező erőt meg tudjuk mérni, s ha ismert a mágneses térerősség, akkor az $F_y = 0.5 \cdot (\kappa - \kappa_0) \cdot A \cdot \mu_0 \cdot H_y^2$ összefüggés segítségével meg tudjuk határozni a mágneses szuszceptibilitást. A képletben κ az adott anyag mágneses szuszceptibilitása, κ_0 a levegő mágneses szuszceptibilitása, A a mért anyag keresztmetszete. Természetesen az összefüggés **F** és **H** x és z komponensére is igaz, de mi a mérési összeállítás segítségével egydimenziósra egyszerűsítettük a problémát.

Tehát ismernünk kell F_y-t, A-t, μ_0-t, κ_0-t és H_y-t. Ezek közül F_y-t, A-t és H_y-t mérjük, μ_0-t és κ_0-t ismerjük.

A Gouy féle mérésnél a az inhomogén mágneses teret a következőképpen hozzuk létre: létrehozunk egy viszonylag erős mágneses teret, majd a mintát úgy helyezzük el, hogy az egyik vége ebben az erős térben legyen, a másik pedig ettől távol, ahol jó közelítéssel 0 a mágneses térerősség. A mérés során F_y mérése analitikai mérleggel történik, H_y-é Hall-szondával, az A felületé a kör keresztmetszetű minta átmérőjének mérésével (tolóméterrel).

A mérés pontos kivitelezéséhez hozzátartozik, hogy meghatározzuk a Hall-szondára jellemző R_H/d értéket, ugyanis a szonda feszültséget mér és ebből a Hall-effektus alapján származtatjuk a mágneses indukciót a $B = d \cdot U_H/(I_H \cdot R_H)$ összefüggés alapján (R_H a Hall-

állandó, d pedig a szonda félvezető lapkájának a vastagsága). Ezt úgy tudjuk kivitelezni, hogy a mágneses tér nagyságát megmérjük a Hall-szondával is és valamilyen más módón is. Ez a más mód egy indukciós tekercs segítségével történik: a tekercset behelyezzük a mágneses térbe, felületével a mágneses indukcióra merőlegesen, majd kihúzzuk onnan, egészen addig a helyig ahol a tekercs körüli mágneses indukció nagyon kicsi (gyakorlatilag nulla). A tekercsben változott a mágneses fluxus, így őbenne feszültség indukálódott. Ezen a feszültség integrálja az indukciótörvény értelmében a két pont közötti fluxuskülönbséggel egyenlő, így meg tudjuk határozni a mágneses indukciót a tekercsek között.

Tehát a mérés menete a következő: meghatározni a mérésben részt vevő Hall-szondára jellemző R_H/d értéket majd ezek után meghatározni azon anyagokra (mintákra) ható erőt ismert (mért) mágneses térerősség[1] mellett, s ezen adatokból kiszámolni az adott anyagra jellemző mágneses szuszceptibilitás mértékét.

3. A mérés kivitelezése

A mérés gyakorlati kivitelezésekor a mágneses tér előállításához elektromágnest használunk, mely egy kb. 1 cm-es légrésben biztosít maximálisan 1.1 T-t. A Hall-szonda mérőegysége az elektromágnes egyik pofájára van felragasztva. A Hall-szonda I_H áramát egy rendkívül pontos áramgenerátor szolgáltatja, az elektromágnesen keresztülfolyó áramot pedig egy egyenfeszültségű tápegység. A Hall-szonda hitelesítésére használt tekercs mértani adatai ismertek, a fluxusváltozás mérése pedig egy fluxmérővel történik.

3.1. A Hall-szonda hitelesítése

A fentebb leírtak értelmében a mérés során megmértem a U_H-t és $\Delta\Phi$-t különböző feszültségek mellett. Ezen adatok az 1. táblázat oszlopaiban olvashatóak: az első oszlop tartalmazza a mérési pont sorszámát, a második oszlopban az elektromágnesre kötött feszültséget tüntettem fel, a harmadik oszlop tartalmazza a Hall-szondán mért U_H feszültségeket, és a 4. oszlopban tekinthetőek meg a fluxusváltozások mértéke a különböző feszültségek mellett, a tapasztalt hiba mértékével együtt. Az 5. oszlop már számolt adatokat tartalmaz: $\Delta\Phi$ értékeiből kiszámoltam a mágneses indukciót. Ezt a $B=\Delta\Phi/(n\cdot\underline{F})$ összefüggés segítségével tettem meg, ahol n=194 a merőtekercs menetszáma, $\underline{F}$ pedig az átlagos menetfelület, azaz: $F=\frac{1}{r_k-r_b}\cdot\int_{r_b}^{r_k}\pi r^2 dr$ (r_k és r_b a tekercs külső ill. belső meneteinek a sugara, értékük a mi esetünkben: r_k=4,8 mm, r_b=3,05 mm). Ezen értékeket behelyettesítve a $B=104.76\cdot\Delta\Phi$ összefüggéshez jutunk, ahol az B dimenziója mT, a $104.76\cdot$konstansé mm^{-2}, a $\Delta\Phi$ dimenziója pedig mVs. (A 104,76 mm^{-2} az $n\underline{F}$ kiszámolt, ehhez a méréshez tartozó, numerikus értéke.)

Most már ismerjük B-t ill. U_H-t, ki tudjuk számolni az R_H/d értéket, hisz $R_H/d=U_H/(I_H\cdot B)$ (a mérés során az áramgenerátor által szolgáltatott I_H áramerősség 9,94 mA volt). A táblázat 6. oszlopa ezen értékeket tartalmazza. Az utolsó cellában a előzőleg számolt adatok számtani átlaga van, a továbbiakban ezt tekintem R_H/d értékének.

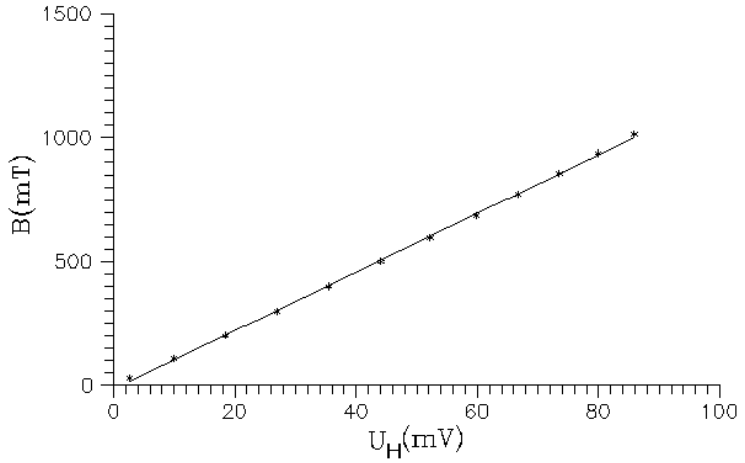
[1] A jegyzőkönyvben a $\mathbf{B}=(1+\kappa)\cdot\mu\cdot\mu_0\cdot\mathbf{H}$ összefüggés miatt nem tettem különbséget a mágneses térősség és a mágneses indukció között. Esetünkben ezen két jellemzője a mágneses térnek ekvivalensnek tekinthető. Természetesen számoláskor figyelembe vettem a kettő közti különbséget.

Táblázat 1

Sorszám	I (A)	U_H (mV)	$\Delta\Phi$ (mVs)	B(mT)	R_H/d (Ω/m)
1	0	2,6	0,28±0,001	29,34±1,05	8,92±0,31
2	0,5	9,9	1,02±0,001	106,86±1,05	9,32±0,31
3	1	18,4	1,92±0,0005	201,16±0,053	9,20±0,14
4	1,5	27	2,85±0,001	298,59±1,05	9,10±0,31
5	2	35,5	3,81±0,0005	399,17±0,053	8,95±0,14
6	2,5	44,1	4,77±0,002	499,75±2,1	8,88±0,66
7	3	52,2	5,69±0,001	596,14±1,05	8,81±0,31
8	3,5	59,8	6,55±0,001	686,24±1,05	8,77±0,31
9	4	66,7	7,36±0,002	771,10±2,1	8,70±0,66
10	4,5	73,5	8,17±0,0005	855,96±0,053	8,64±0,14
11	5	79,9	8,95±0,002	937,68±2,1	8,57±0,66
12	5,5	85,9	9,68±0,001	1014,17±1,05	8,52±0,31
-	-	-	-	-	8,86±0,66

Az 1. ábrán feltüntettem a mért $B(U_H)$ párokat illetve a Grapherrel rájuk illesztett egyenest. Az egyenes meredeksége $d/(R_H I_H) = 11{,}35$ m/(ΩA).

Ábra 1



A mérés viszonylag magas hibája jól látszik a különböző $B(U_H)$ párokhoz tartozó különböző R_H/d értékeken, de a hiba mértékére következtethetünk a mért értékek hibájából is. Ugyanis amíg az U_H Hall-feszültség hibája ±0,05 mV (a Hall-szonda kijelzője mindig stabilan ugyanazt az értéket mutatta -mármint azonos feszültségek esetén-, így a hiba értéke a legkisebb egység fele; ez az oka annak, hogy az U_H Hall-feszültség hibáit nem tüntettem fel a táblázatban), addig ugyanez nem mondható el a fluxusmérőről. Annak hibája ±0,02 mVs-t is elérte időnként. (Amikor nem tapasztaltam ingadozást a kijelzőn, akkor a legkisebb egység felét tekintettem hibának azaz ±0,0005 mVs-ot.) Ezen adatokból és hibanagyságokból a következő végeredmény adódik:

$R_H/d=8{,}86\pm0{,}66$ Ω/m

3.2. A plexi mágneses szuszceptibilitásának mérése

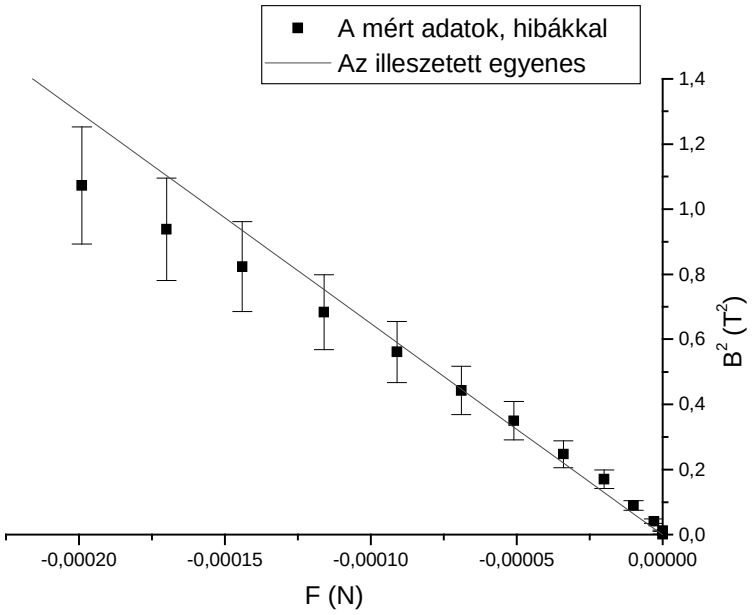
Az első anyag, melynek a mágneses szuszceptibilitását vizsgáltam plexi volt. A minta egy kb. 20 cm hosszú és d_{plexi}=7,99 ±0,01 mm ⇒ r_{plexi}=(3,995±0,005)·10^{-3} m sugarú henger volt. A 2-es táblázat tartalmazza a mért U_H értékeket mV-ban, az ebből számolt mágneses indukció mértékét (az U_H értékeket pontosnak lehet tekinteni, azonban a Hall-szonda R_H/d értékének mérésének hibája "elrontja" a mágneses indukció értékeit is), a számolt B^2 értékeket, ezek hibáját, a mért súlyokat (a mérleget abszolút pontosnak tekintettem, így ezekhez az adatokhoz nem tartozik hiba), és az ebből számolt erőket. A táblázat hibaoszlopai az abszolút hibákat tartalmazzák.

Táblázat 2

Ssz	I (A)	U_H(mV)	B(mT)	$\pm B_{hiba}$	B^2(mT^2)	$\pm B^2_{hiba}$	F/g(g)	F(mN)
1	0	2,5	28,39	2,28	805,8233	134,9382	0,00000	0,000
2	0,5	9,6	109,01	8,77	11882,3476	1989,7454	0,00000	0,000
3	1	17,9	203,25	16,36	41311,0135	6917,6902	-0,00030	-0,003
4	1,5	26,4	299,77	24,13	89860,2539	15047,4496	-0,00100	-0,010
5	2	36,3	412,18	33,18	169892,0425	28449,0845	-0,00200	-0,020
6	2,5	43,8	497,34	40,03	247347,7752	41419,3487	-0,00340	-0,034
7	3	52,1	591,59	47,62	349973,5590	58604,4361	-0,00510	-0,051
8	3,5	58,6	665,39	53,56	442746,3805	74139,6066	-0,00690	-0,069
9	4	66	749,42	60,32	561626,5866	94046,5603	-0,00910	-0,091
10	4,5	72,8	826,63	66,53	683317,5043	114424,1786	-0,01160	-0,116
11	5	79,9	907,25	73,02	823101,4108	137831,5384	-0,01440	-0,144
12	5,5	85,3	968,57	77,96	938118,8225	157091,6522	-0,01700	-0,170
13	6	91,2	1035,56	83,35	1072381,8725	179574,5231	-0,01990	-0,199

Ezen adatsorok segítségével immár könnyen felrajzolható az F(B^2) függvény. A mérési pontokat és a rájuk illesztett egyenest tartalmazza a 2-es ábra.

Ábra 2



Az egyenes meredeksége $(\kappa-\kappa_0)\frac{A}{2\mu_0}$-al egyenlő, ahol A a minta keresztmetszete. Mivel $r_{plexi}=(3{,}995\pm0{,}005)\cdot10^{-3}$ m, ezért $A=(50{,}13\pm0{,}12)\cdot10^{-6}$ m^2, $\mu_0=4\pi\cdot10^{-7}$ $VsA^{-1}m^{-1}$, az egyenes meredeksége pedig $\frac{B^2}{F}=-5359\pm120$ T^2/N a plexi mágneses szuszceptibilitása: $\kappa-\kappa_0=(-9{,}35\pm0{,}22)\cdot10^{-4}$ Mivel $\kappa_0=0{,}3\cdot10^{-6}$ elhanyagolhatóan kicsiny a plexi mágneses szuszceptibilitásához, ezért **$\kappa_{plexi}=(-9{,}35\pm0{,}22)\cdot10^{-4}$**.

3.3. Az alumínium mágneses szuszceptibilitásának mérése

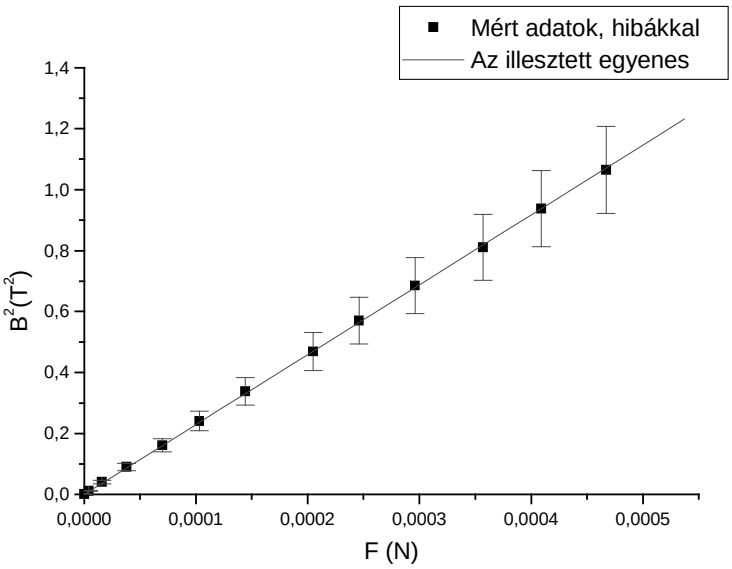
A második vizsgált anyag alumínium volt. A minta egy kb. 20 cm hosszú és $d_{alumínium}=8{,}04\ \pm0{,}01$ mm $\Rightarrow$ $r_{alumínium}=(4{,}02\pm0{,}005)\cdot10^{-3}$ m sugarú henger volt. A 3-as táblázatban feltüntettet adatokból határoztam meg az alumínium minta mágneses szuszceptibilitását. A 3-as táblázat és 3-as grafikon mindenben az előző (2-es táblázat és 2-es ábra) mintájára készült, így az ott leírtak az itteniekre is érvényesek.

Táblázat 3

Ssz	I (A)	U_H(mV)	B(T)	$\pm B_{hiba}$	$B^2(T^2)$	$\pm B^2_{hiba}$	F/g(g)	F(N)
1	0	2,5	0,028	0,002	0,0008	0,0001	0,0000	0,000000
2	0,5	9,5	0,108	0,007	0,0116	0,0016	0,0004	0,000004
3	1	17,8	0,202	0,014	0,0409	0,0055	0,0016	0,000016
4	1,5	26,4	0,300	0,021	0,0899	0,0120	0,0038	0,000038
5	2	35,4	0,402	0,028	0,1616	0,0216	0,0070	0,000070
6	2,5	43,2	0,491	0,034	0,2406	0,0322	0,0103	0,000103
7	3	51,2	0,581	0,040	0,3380	0,0452	0,0144	0,000144
8	3,5	60,3	0,685	0,047	0,4688	0,0627	0,0205	0,000205
9	4	66,5	0,755	0,052	0,5702	0,0763	0,0246	0,000246
10	4,5	72,9	0,828	0,057	0,6852	0,0917	0,0296	0,000296
11	5	79,3	0,900	0,062	0,8108	0,1085	0,0357	0,000357
12	5,5	85,3	0,969	0,067	0,9381	0,1256	0,0409	0,000409
13	6	90,9	1,032	0,072	1,0653	0,1426	0,0467	0,000467

A plexinél azonos eljárással származtatva a mágneses szuszceptibilitást: $A=(50{,}769\pm0{,}126)\cdot10^{-6}$ m^2, az egyenes meredeksége $\frac{B^2}{F}=2292{,}65\pm5{,}67$ T^2/N, így az alumínium mágneses szuszceptibilitása: $\kappa-\kappa_0=(2{,}16\pm0{,}01)\cdot10^{-3}$ Mivel $\kappa_0=0{,}3\cdot10^{-6}$ elhanyagolhatóan kicsiny az alumínium mágneses szuszceptibilitásához, ezért **$\kappa_{alumínium}=(2{,}16\pm0{,}01)\cdot10^{-3}$.** (Megjegyzés: az ehhez a részhez tartozó grafikon technikai okokból a következő oldalon található.)

Ábra 3



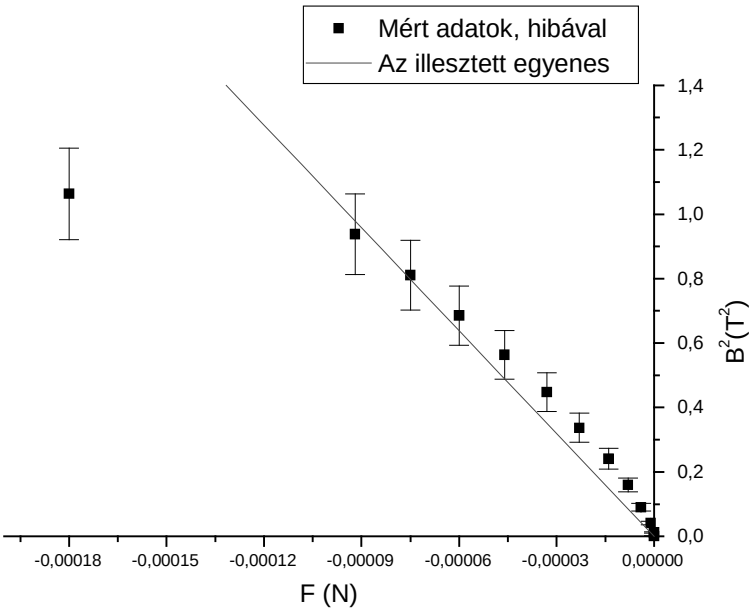
3.4. A vörösréz mágneses szuszceptibilitásának mérése

A harmadik vizsgált anyag vörösréz volt. A minta egy kb. 20 cm hosszú és $d_{réz}$=7,43±0,01 mm henger volt. Így az $r_{réz}$=(3,715±0,005)$\cdot 10^{-3}$ m-nek adódott. A 4-es táblázatban feltüntettet adatokból határoztam meg a réz minta mágneses szuszceptibilitását. A 4-es táblázat és 4-es grafikon mindenben az első ilyen (2-es táblázat és 2-es ábra) mintájára készült, így az ott leírtak érvényesek az itteniekre is.

Táblázat 4

Ssz	I (A)	U_H(mV)	B(T)	$\pm B_{hiba}$	$B^2(T^2)$	$\pm B^2_{hiba}$	F/g(g)	F(N)
1	0	2,4	0,027	0,002	0,0007	0,0001	0,0000	0,000000
2	0,5	9,7	0,110	0,008	0,0121	0,0016	0,0000	0,000000
3	1	17,9	0,203	0,014	0,0413	0,0055	-0,0001	-0,000001
4	1,5	26,4	0,300	0,021	0,0899	0,0120	-0,0004	-0,000004
5	2	35,2	0,400	0,028	0,1598	0,0214	-0,0008	-0,000008
6	2,5	43,2	0,491	0,034	0,2406	0,0322	-0,0014	-0,000014
7	3	51,1	0,580	0,040	0,3367	0,0451	-0,0023	-0,000023
8	3,5	58,9	0,669	0,046	0,4473	0,0599	-0,0033	-0,000033
9	4	66,1	0,751	0,052	0,5633	0,0754	-0,0046	-0,000046
10	4,5	72,9	0,828	0,057	0,6852	0,0917	-0,0060	-0,000060
11	5	79,3	0,900	0,062	0,8108	0,1085	-0,0075	-0,000075
12	5,5	85,3	0,969	0,067	0,9381	0,1256	-0,0092	-0,000092
13	6	90,8	1,031	0,071	1,0630	0,1423	-0,0180	-0,000180

Ábra 4



A plexinél azonos eljárással származtatva a mágneses szuszceptibilitást: A=(43,358±0,117)·10^{-6} m^2, az egyenes meredeksége $\frac{B^2}{F}$ = 10638±2015 T^2/N, így a réz mágneses szuszceptibilitása: **$\kappa_{réz}$=(5,45±0,88)·10^{-4}.**

Megjegyzés: mint az ábráról is leolvasható, az utolsó mért adat erősen kilóg a többi közül. Ezért ezt nem vettem figyelembe a mágneses szuszceptibilitás számolásánál.