Pracovní úkol

1. U feritových kroužků I, II a III
   a. změřete závislost indukce B_m a koercitivní síly H_c na intenzitě magnetického pole H_m
   b. sledujte základní typy hysterezních smyček v závislosti na intenzitě pole H_m a zjistěte přibližně, při které intenzitě pole H_m (nebo v kterém intervalu intensit polí) jednotlivé typy hysterezních smyček přecházejí jeden v druhý.
2. Okalibrujte aparaturu pomocí střídavého napětí známe velikosti
3. Výsledky bodu 1a) zpracujte tabelárně a graficky.

Teoretická část

Ferity jsou magnetické oxidy chemického vzorce $M^{2+}Fe_2^{3+}O_4$, kde M^{2+} je kov s oxidačním číslem 2. Pod vlivem magnetického pole u nich dochází ke změnám rozložení domén, což se navenek projeví magnetizační křivkou a hysterezní smyčkou.

Hysterezní smyčkou nazýváme závislost indukce B na magnetickém poli H při cyklickém magnetování mezi poli $-H_m$ a $+H_m$, kterým odpovídají dosažené indukce $-B_m$ a $+B_m$.

Podle rozvintí hysterezní smyčky (tj. podle velikosti pole H_m) rozeznáváme tyto základní typy hysterezních smyček (obrázky viz [1] str 132 - 134):

a) Hysterezní smyčka se redukuje na úsečku. Plocha smyčky je nulová, neexistují hysterezní ztráty. V doménách se uplatňují pouze vratné změny.
b) Hysterezní smyčka sestává ze dvou větví, jež se dají aproximovat parabolickými oblouky. Tento tvar smyčky se nazývý Rayleighův. Nedosahuje se magnetického nasycení vzorku.
c) Hysterézní smyčka normálního tvaru. Projevuje se tendence magnetického nasycování vzorku, tj. pozorujeme prakticky konstantní indukci v nejsilnějších aplikovaných polí. Uplatňují se nevratné magnetizační děje.
d) "Zaškrcený" tvar hysterezní smyčky. Vyskytuje se u perminvarových materiálů v Rayleighově oblasti a při přechodu ke smyčce normálního tvaru.

Koercitivní síla H_c je definována jako absolutní hodnota intenzity magnetického pole, při které je magnetická indukce nulová. Pokud se hysterezní smyčka redukuje na úsečku, je koercitivní síla nulová.

Ke studiu hysterezních smyček používáme vzorky ve tvaru kroužků. Magnetické pole v kroužku s primárním vinutím o n_1 závitech určíme dle vztahu

$$H = \frac{2n_1 i}{\pi(d_1 + d_2)}, \tag{1}$$

kde d_1, d_2 jsou vnější a vnitřní průměr kroužku a i je magnetizační proud.

Proud i měříme ampérmetrem zapojeným v obvodu. Protože však miliampér udává efektivní hodnoty proudu I_{ef}, platí pro maximální hodnotu intenzity pole H_m

$$H_m = \frac{2n_1 \sqrt{2}\, I_{ef}}{\pi(d_1 + d_2)}, \tag{2}$$

Abych zjistila, jaké pole H odpovídá výchylce x na osciloskopu, vezmu referenční proud I_0 a jemu odpovídající hodnotu x_0. Úměrnost je následovná:

$$H = x \frac{2n_1 \sqrt{2}\, I_0}{x_0\, \pi(d_1 + d_2)} = C_x\, x \tag{3}$$

Na horizontální destičky osciloskopu přivádíme signál úměrný magnetizačnímu proudu. Na sekundárním vinutí o n_2 závitech se indukuje napětí úměrné časové derivaci indukce $\mathrm{d}B/\mathrm{d}t$, které je připojeno na integrátor. Výstup je připojen na vertikální destičky osciloskopu. Na vertikální ose osciloskopu tedy vynášíme signál úměrný magnetické indukci. Na stínítku osciloskopu pozorujeme obraz hysterezní smyčky. Indukční tok sekundárním vinutím je

$$\phi = \frac{1}{2(d_1 - d_2) n_2 v B}, \tag{4}$$

kde v je výška kroužku.

Pro kalibraci vertikální osy použijeme střídavého napětí o frekvenci ω a efektivní hodnotě napětí U_{ef}. Na vstup z integrátoru pripojíme k-krát menší napětí z děliče. Na výstupu z integrátoru je napětí

$$u \sim \frac{\sqrt{2} U_e f}{k\omega} \tag{5}$$

Konstanta úměrnosti je stejná jako při měření magnetické indukce. Pokud změříme pro známou hodnotu U_{ef} vertikální rozměr úsečky y_0, pak bude jinému vertikálnímu rozměru y odpovídat magnetická indukce

$$B = \frac{y}{y_0} \frac{2\sqrt{2}\, U_{ef}}{\omega\,(d_1 - d_2)\, v\, n_2} = C_y\, y \tag{6}$$

Všechny vztahy viz [1]

Měření

Schéma obvodů používaných při měření najde čtenář v [1] str 135 a 136. Parametry jednotlivých kroužků jsou udány v Tabulce 1. Během všech měření jsem na vertikálních destičkách používala stejné nastavení citlivosti.

kroužek	n_1	n_2	d_1[mm]	d_2[mm]	v[mm]
I	50	6	29.2	20.75	4.4
II	50	6	30.65	21.8	4.35
III	300	6	31	21.8	4.15

Tabulka 1.: Parametry feritových kroužků

Při kalibraci y-ové osy jsem na zdroji napětí naměřila $U_{ef} = (6.72 \pm 0.05)$V. Na odporové dekádě jsem nastavila $R_d = 999\Omega$. Napětí bylo tedy děleno v poměru 1 : 1000 a $k = 1000$. Pro toto nastavení jsem změřila délku úsečky na osciloskopu $y_0 = (168 \pm 5)$mm. Dle vztahu (6) určíme konstantu C_y pro jednotlivé kroužky. Síťovou frekvenci uvažuji $f = (50.0 \pm 0.5)$ Hz. Odchylky byly zpracovány dle standardní teorie chyb (podrobně viz [2]).

$$C_y^{\mathrm{I}} = (1.61 \pm 0.08)\,\mathrm{T} \cdot \mathrm{m}^{-1}$$

$$C_y^{\mathrm{II}} = (1.56 \pm 0.08)\,\mathrm{T} \cdot \mathrm{m}^{-1}$$

$$C_y^{\mathrm{III}} = (1.57 \pm 0.08)\,\mathrm{T} \cdot \mathrm{m}^{-1}$$

Hodnoty C_y se v rámci přesnosti měření sice shodují, ale pro další výpočty použiji pro každý kroužek vlastní hodnotu konstanty.

Konstantu úměrnosti C_x pro jednotlivé kroužky určíme dle vztahu (3). Pro maximální proud jsem vždy změřila horizontální rozměr smyčky. Pro první feritový kroužek byla šířka stopy $x_0 = (120 \pm 5)$mm při protékajícím proudu $I_0 = (150 \pm 8)$mA (změřeno na rozsahu $300mA$). Druhý vzorek byl kalibrován při proudu $I_0 = (200 \pm 8)$mA (změřené na tomtéž rozsahu jako u vzorku I) a šířce smyčky $x_0 = (150 \pm 5)$mm. Třetí vzorek jsem kalibrovala při hodnotách $I_0 = (1200 \pm 40)$mA (na rozsahu $1.5A$) a $x_0 = (140 \pm 5)$mm. Odchylky proudu jsou určeny na základě použitého ampérmetru, jehož třída přesnosti byla 2.5. Odchylka x_0 je stanovena odhadem jako $0,5cm$. Konstanty úměrnosti magnetického pole a šířky stopy pro jednotlivé vzorky tedy jsou

$$C_x^{\mathrm{I}} = (1130 \pm 100)\,\mathrm{A} \cdot \mathrm{m}^{-2}$$

$$C_x^{\mathrm{II}} = (1140 \pm 80)\,\mathrm{A} \cdot \mathrm{m}^{-2}$$

$$C_x^{\mathrm{III}} = (43.8 \pm 3.0) \cdot 10^3\,\mathrm{A} \cdot \mathrm{m}^{-2}$$

Výsledky měření s jednotlivými kroužky udávají Tabulky 2-4. Magnetická indukce B_m je vypočítána dle vztahu (6). Hodnota intenzity magnetického pole H_m je určena dle vztahu (2). Velikost koercitivní síly H_c jsem určila na základě vztahu (3).

Jako chybu určení y_m uvažuji 5%, nejméně však $2mm$. Chybu určení x_c jsem odhadla na 10% (ovšem opět nejméně $2mm$), přičemž do chyby jsem zahrnula i nepřesné určení nulové hodnoty intenzity magnetického pole.

Grafické zpracování je vyneseno do Grafů 1-6. Grafy 1-3 udávají závislot indukce B_m na intenzitě magnetického pole H_m. Závislost koercitivní síly H_c na intenzitě pole H_m je vykreslena v Grafech 4-6. Data byla zpracována v programu Gnuplot. Grafy jsou zařazeny na konci dokumentu.

$\frac{I}{\mathrm{mA}}$	$\frac{y_m}{\mathrm{cm}}$	$\frac{B_m}{\mathrm{T}}$	$\frac{\Delta B_m}{\mathrm{T}}$	$\frac{x_c}{\mathrm{cm}}$	$\frac{H_m}{\mathrm{kA \cdot m^{-1}}}$	$\frac{\Delta H_m}{\mathrm{kA \cdot m^{-1}}}$	$\frac{H_c}{\mathrm{kA \cdot m^{-1}}}$	$\frac{\Delta H_c}{\mathrm{kA \cdot m^{-1}}}$
300	1.4	0.022	0.004	0	1.5	0.2		
400	2.1	0.033	0.005	0.5	2.0	0.2	0.2	0.1
500	3.3	0.052	0.006	1.4	2.6	0.2	0.6	0.1
600	7.8	0.123	0.012	2.6	3.1	0.2	1.1	0.2
700	10.2	0.160	0.016	3.1	3.6	0.2	1.4	0.2
800	12.1	0.190	0.018	3.4	4.1	0.2	1.5	0.3
900	12.6	0.198	0.019	3.6	4.6	0.2	1.6	0.3
1000	13.4	0.211	0.020	3.7	5.1	0.2	1.6	0.3
1100	14.2	0.289	0.022	3.9	5.6	0.2	1.7	0.3
1200	14.5	0.296	0.022	4.0	6.1	0.2	1.8	0.3

Tabulka 4.: Naměřené a vypočítané hodnoty pro kroužek III

$\frac{I}{\mathrm{mA}}$	$\frac{y_m}{\mathrm{cm}}$	$\frac{B_m}{\mathrm{T}}$	$\frac{\Delta B_m}{\mathrm{T}}$	$\frac{x_c}{\mathrm{cm}}$	$\frac{H_m}{\mathrm{A \cdot m^{-1}}}$	$\frac{\Delta H_m}{\mathrm{A \cdot m^{-1}}}$	$\frac{H_c}{\mathrm{A \cdot m^{-1}}}$	$\frac{\Delta H_c}{\mathrm{A \cdot m^{-1}}}$
5	0.7	0.011	0.004	0	4.5	0.3		
10	1.6	0.026	0.004	0	9.0	0.3		
13	2.3	0.037	0.005	0.3	11.7	0.3	3	3
15	2.8	0.045	0.005	0.3	13.5	0.3	3	3
20	3.9	0.063	0.006	0.5	18	1	6	3
30	6.2	0.100	0.010	0.7	27	1	8	3
40	7.8	0.126	0.012	0.9	36	1	10	3
50	9.3	0.150	0.015	1.0	45	1	11	3
60	10.4	0.168	0.016	1.1	54	1	12	3
70	11.2	0.181	0.018	1.2	63	7	14	4
80	12.2	0.197	0.019	1.2	72	7	14	4
100	12.5	0.202	0.020	1.2	90	7	14	4
120	13.2	0.213	0.020	1.3	108	7	15	4
150	13.6	0.220	0.021	1.3	135	7	15	4

Tabulka 2.: Naměřené a vypočítané hodnoty pro kroužek I

$\frac{I}{\mathrm{mA}}$	$\frac{y_m}{\mathrm{cm}}$	$\frac{B_m}{\mathrm{T}}$	$\frac{\Delta B_m}{\mathrm{T}}$	$\frac{x_c}{\mathrm{cm}}$	$\frac{H_m}{\mathrm{A \cdot m^{-1}}}$	$\frac{\Delta H_m}{\mathrm{A \cdot m^{-1}}}$	$\frac{H_c}{\mathrm{A \cdot m^{-1}}}$	$\frac{\Delta H_c}{\mathrm{A \cdot m^{-1}}}$
20	1.1	0.017	0.004	0	17	1		
40	2.1	0.033	0.005	0	34	1		
60	3.0	0.047	0.005	0.2	51	1	2	2
70	3.6	0.056	0.006	0.4	60	6	5	3
80	4.1	0.064	0.006	0.5	69	6	6	3
90	4.7	0.073	0.007	0.6	77	6	7	3
100	5.4	0.084	0.008	0.7	86	6	8	3
110	6.1	0.095	0.009	1.0	94	6	11	3
120	6.9	0.108	0.010	1.1	103	6	13	3
130	7.5	0.117	0.011	1.3	112	6	15	3
150	8.8	0.137	0.013	1.9	129	6	22	4
170	10.2	0.159	0.015	2.4	146	6	27	5
190	11.8	0.184	0.018	2.6	163	6	30	5
200	11.9	0.186	0.018	2.8	172	6	32	6

Tabulka 3.: Naměřené a vypočítané hodnoty pro kroužek II

Hysterezní smyčka kroužku I měla tvar úsečky do intenzity $H_m = (10 \pm 3)\,\mathrm{A \cdot m^{-1}}$. Poté přešla do Reyleighova tvaru a při intenzitě vyšší než $H_m = (20 \pm 5)\,\mathrm{A \cdot m^{-1}}$ jsem pozorovala smyčku normálního tvaru.

Hysterezní smyčka kroužku II byla lineární pro intenzitu pole do $H_m = (45 \pm 8)\,\mathrm{A \cdot m^{-1}}$, kdy se změnila na Rayleighův tvar. Normální tvar smyčky vykazoval vzorek při intenzitách vyšších než $H_m = (100 \pm 10)\,\mathrm{A \cdot m^{-1}}$.

Pro vzorek III vyrobený z perminvarového materiálu byl lineární tvar hysterezní křivky při intenzitách menších než $H_m = (2.0 \pm 0.2)\,10^3 \cdot \mathrm{A \cdot m^{-1}}$. Rayleighův tvar byl pozorovatelný při intenzitách do $H_m = (3.5 \pm 0.3)\,10^3 \cdot \mathrm{A \cdot m^{-1}}$, kdy přešel ve tvar zúžený. Po překonání intenzity $H_m = (4.5 \pm 0.3)\,10^3 \cdot \mathrm{A} \cdot \mathrm{m}^{-1}$ smyčka vykazovala normální tvar. Chyby intenzit polí, při kterých se měnily tvary hysterezních smyček, jsou odhadnuty.

Diskuze

Závislosti, které jsem jsem naměřila, odpovídají teoretickým předpokladům. V průběhu měření jsem se dopustila největších nepřesností při určování rozměrů hysterezních smyček, kdy velmi záleželo na úhlu pohledu při odečítání délek. Zakřivený povrch obrazovky a nesnadné měření délek pomocí milimetrového proužku, se také odrazilo v chybách veličin.

Další chyby měření mohou být způsobeny indukčností soustavy potenciometrů, nepřesností integrátoru nebo kolísáním napětí v síti.

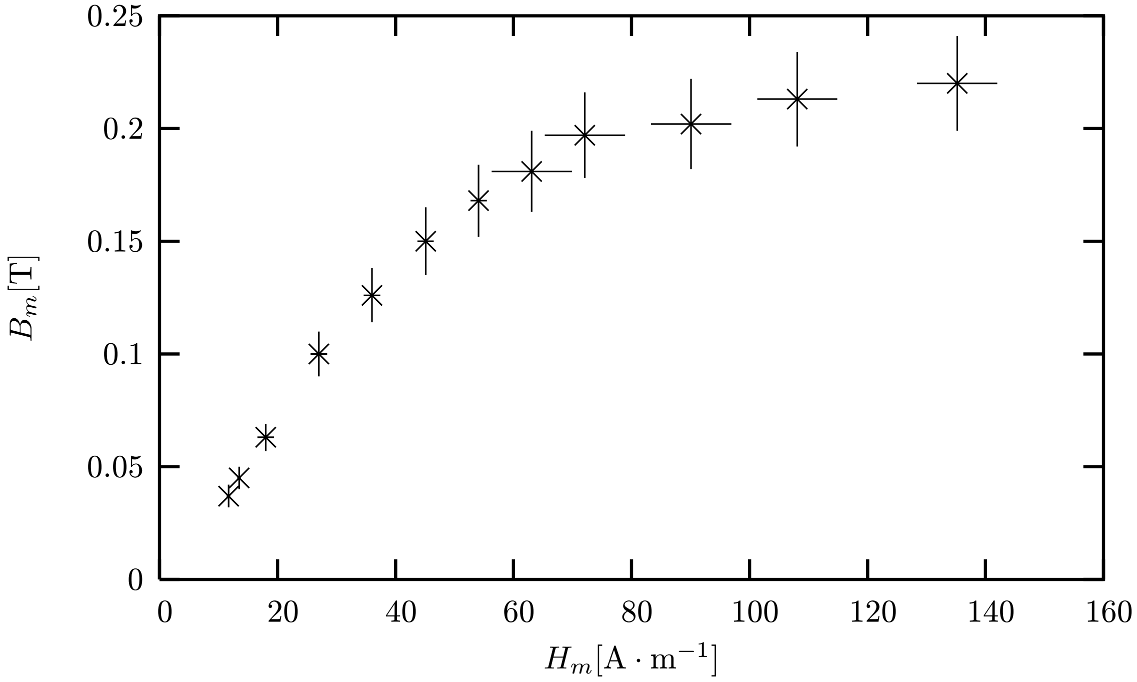
Určení, ve kterém intervalu intenzit polí H_m jednotlivé typy hysterezních smyček přecházejí jeden v druhý, bylo velmi obtížné a subjektivní, jelikož smyčky plynule mění tvar. Proto relativní chyby v této části měření dosahují až 30%.

Závěr

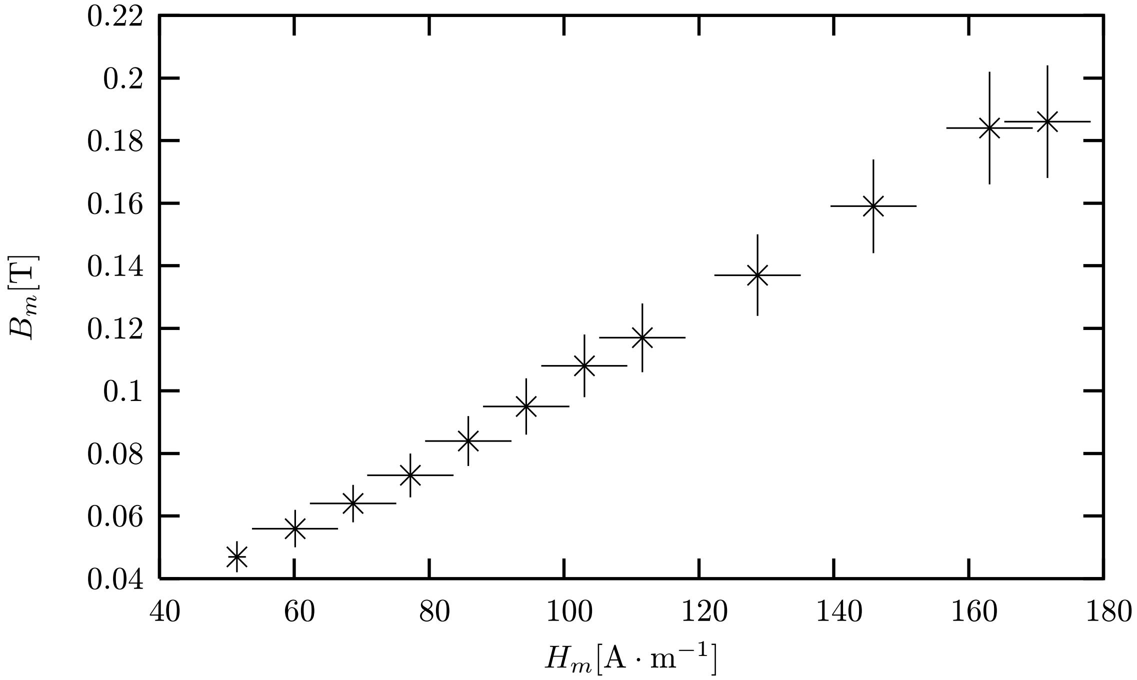
Prozkoumala jsem různé typy hysterezních smyček pro tři feritové kroužky a určila závislosti indukce a koercitivní síly na intenzitě magnetického pole. Výsledky udávají Tabulky 2-4. Grafické závislosti jsou vyneseny v Grafech 1-6.

Literatura

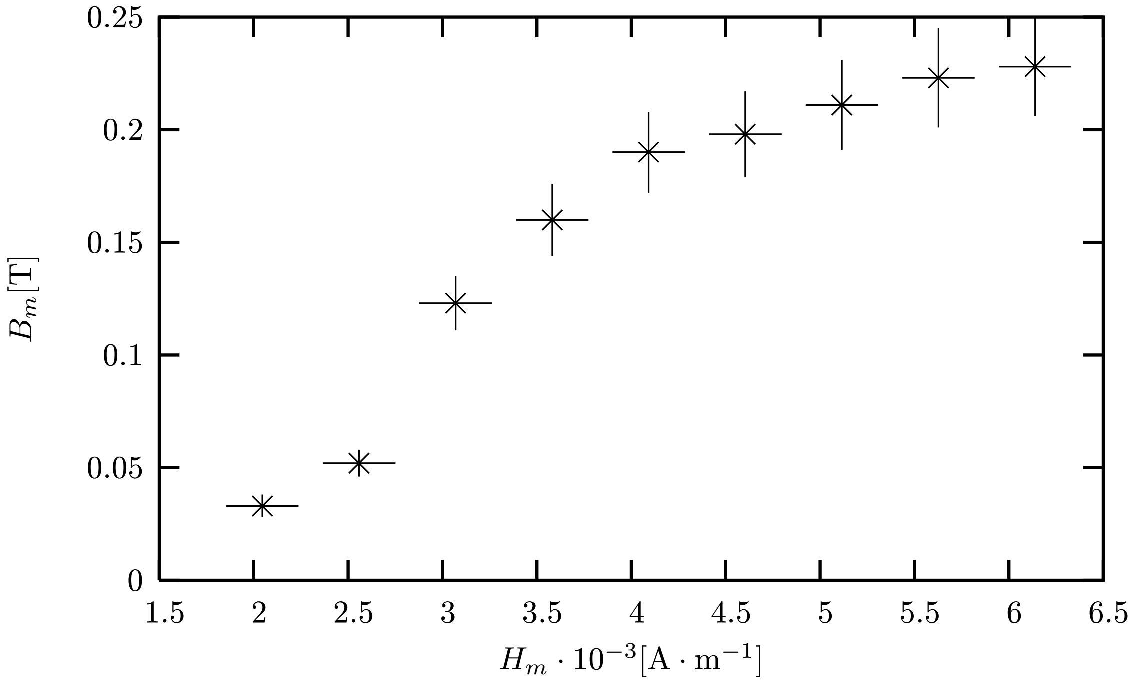
[1] R. Bakule, J. Šternberk: Fyzikální praktikum II., SPN, Praha 1989
[2] J. Englich: Zpracování výsledků fyzikálních měření, Praha 2000



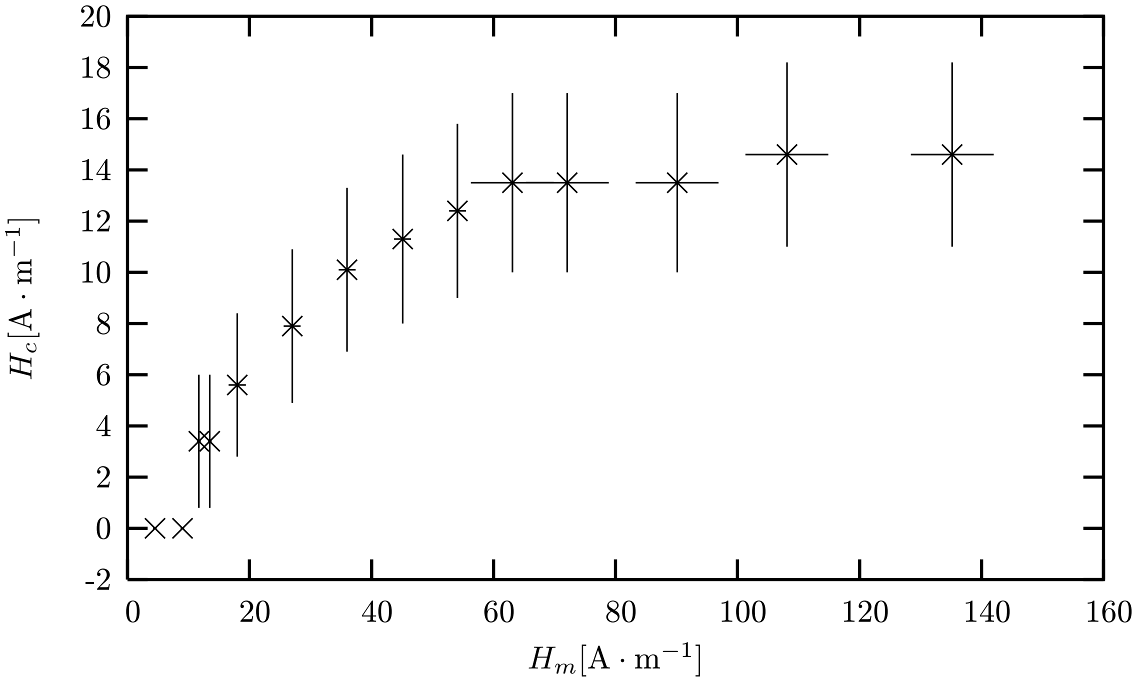
Graf 1.: Závislost magnetické indukce na intenzitě pole pro feritový kroužek I



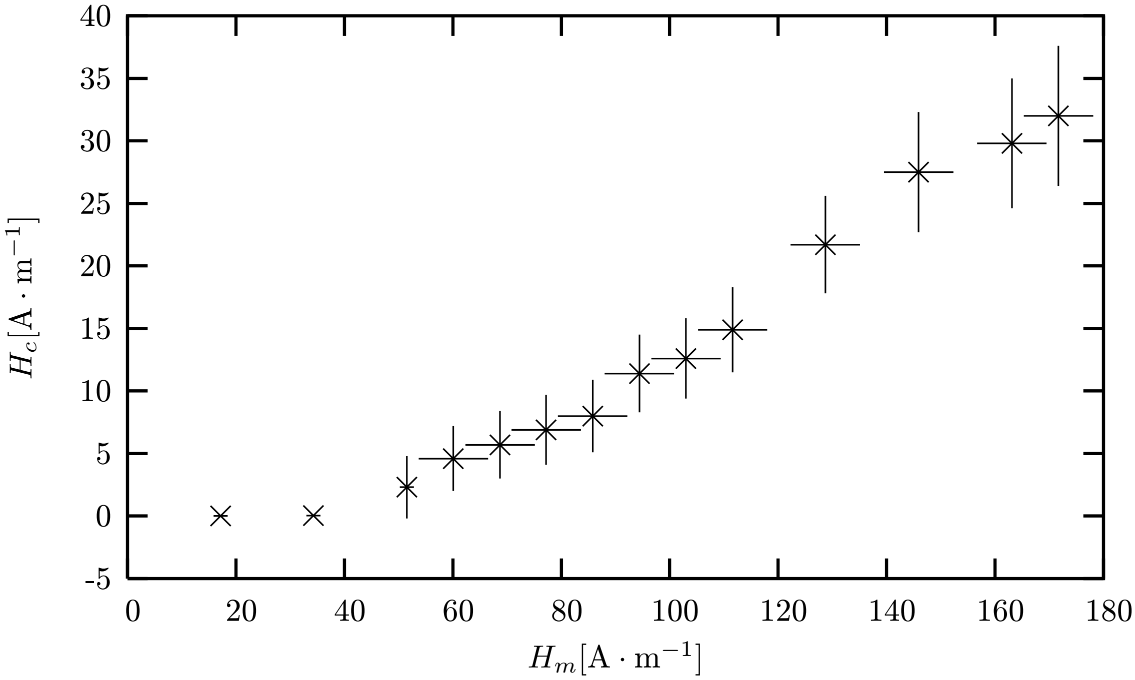
Graf 2.: Závislost magnetické indukce na intenzitě pole pro feritový kroužek II



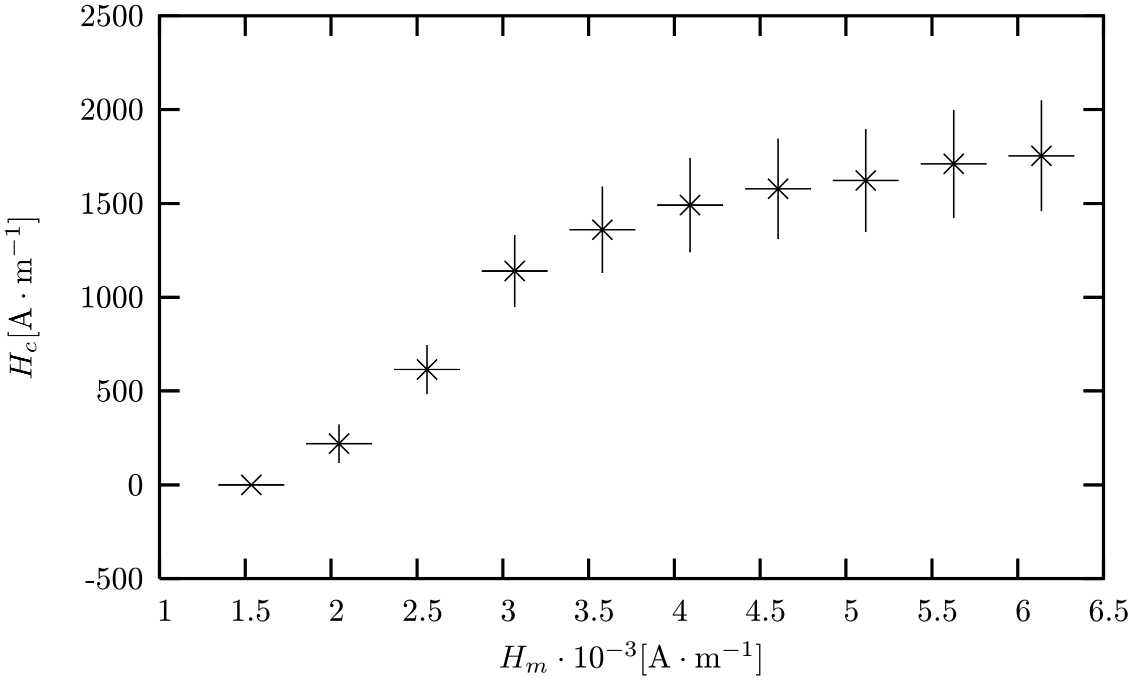
Graf 3.: Závislost magnetické indukce na intenzitě pole pro feritový kroužek III



Graf 4.: Závislost koercitivní síly na intenzitě pole pro kroužek I



Graf 5.: Závislost koercitivní síly na intenzitě pole pro kroužek II



Graf 6.: Závislost koercitivní síly na intenzitě pole pro kroužek III