

OSNOVNA ŠOLA MIRNA

VPLIV TEMPERATURE NA MAGNETIZEM

Astronomija in fizika

Raziskovalna naloga

Avtor: Enej Rupnik

Mentorica: Vesna Drole Uršič

Mirna, marec 2025

Kazalo

1	Uvod	8
1.1	Namen raziskovalne naloge.....	8
2	Teoretični del.....	9
2.1	Magnetizem	9
2.1.1	Zgodovina magnetizma, elektromagnetizma	9
2.2	Magnetno polje in magnetna sila.....	9
2.2.1	Elektrika v magnetizmu	10
2.2.2	Gostota magnetnega polja.....	12
2.2.2.1	Gostota magnetnega polja v homogenem magnetnem polju	12
2.3	Vrste magnetnih snovi	14
2.3.1	Relativna permeabilnost snovi	14
2.3.2	Magnetizem na atomski ravni	15
2.3.2.1	Diamagnetizem	16
2.3.2.2	Paramagnetizem	16
2.3.2.3	Feromagnetizem.....	17
2.4	Teorija relativnosti in magnetizem.....	17
3	Eksperimentalni del.....	19
3.1	1. Poskus: Vpliv temperature na magnetno silo neodimskega magneta.....	19
3.1.1	Raziskovalna vprašanja in hipoteze	19
3.1.2	Opis eksperimenta in pripomočkov	20
3.1.3	Opis postopkov	21
3.1.4	Rezultati in razprava	22
3.1.4.1	Odvisnost moči magneta od razdalje	23
3.1.4.2	Odvisnost magnetne sile od temperature	27
3.1.4.2.1	Temperaturni koeficient magneta	29
3.1.4.3	Odvisnost magnetne sile od temperature in razdalje	31
3.1.5	Veljavnost hipotez	32

3.2	2. Poskus: Vpliv temperature na elektromagnet.....	33
3.2.1	Raziskovalna vprašanja in hipoteze	33
3.2.2	Opis eksperimenta in pripomočkov	33
3.2.3	Opis postopkov	35
3.2.4	Rezultati in razprava	35
3.2.4.1	Magnetna sila pri votlem jedru elektromagneta.....	36
3.2.4.1.1	Povezava med magnetno silo in tokom	36
3.2.4.1.2	Odvisnost magnetne sile od temperature pri različnih premerih žice.....	38
3.2.4.2	Magnetna sila pri polnem jedru elektromagneta.....	40
3.2.4.2.1	Odvisnost magnetne sile od jedra elektromagneta.....	40
3.2.4.2.2	Odvisnost magnetne sile od temperature pri različnih jedrih	43
3.2.5	Veljavnost hipotez	44
4	Zaključek	45
5	Viri in literatura	46

Kazalo slik

Slika 1: Prikaz magnetnega polja (David J. Griffiths, 2013).....	10
Slika 2: Razlika električnega polja med statičnim (a) in premikajočim se elektronom (b) (Eugene Stefanovich, 2023).....	11
Slika 3: Električna in magnetna polja v premikajočem se elektronu (Sebastian Volz; Jose Ordonez Miranda, 2024).....	11
Slika 4: Prikaz smeri magnetne sile (F), gostote magnetnega polja(B) in smeri gibanja delca (v).....	13
Slika 5: Magnetno polje, ki ga povzroča elektron zaradi spina (Pettruci, idr; 2011)	15
Slika 6: Prikaza ureditve domen za feromagnetne snovi odsotnosti (levo) in prisotnosti zunanjega magnetnega polja (desno) (Congyi Wang idr.).....	17
Slika 7: Prikaz električnih delcev z nabojev ter njihov vpliv na magnetno silo	18
Slika 8: Digitalni laserski termometer	20
Slika 9: Pripomočki pri izvajanju 1. poskusa.....	20
Slika 10: Segrevanje magnetov in merjenje temperature	21
Slika 11: Ohlajanje magnetov in merjenje temperature.....	21
Slika 12: Merjenje magnetne sile in razdalje z ne odšteto silo teže.....	22
Slika 13: Votlo (spredaj) in polno (zadaj) jedro skupaj z navitjem	22
Slika 14: Primer elektromagneta- votlo jedro	34
Slika 15: Merjenje magnetne sile elektromagneta na napetostnem viru.....	34

Kazalo tabel

Tabela 1: Magnetna sila $[N]$ v odvisnosti od temperature T in razdalje x do železne plošče .	22
Tabela 2: Koeficienta razdalje k_x , magnetne sile k_F pri različnih temperaturah T in razlika obeh koeficientov r	24
Tabela 3: Koeficienti kvadrata razdalje k_x in sile k_F pri različnih temperaturah z razliko obeh koeficientov r	26
Tabela 4: Prikaz koeficientov k (% večje/manjše sile) v primerjavi s silo na sobni temperaturi ($22,5\text{ }^\circ\text{C}$), merjenih pri različnih razdaljah in različnih x temperaturah T	28
Tabela 5: Temperaturni koeficient magneta k_T na različnih temperaturah T in razdaljah x	29
Tabela 6: Magnetna sila F v odvisnosti od temperature T in napetosti U pri elektromagnetu z votlim jedrom, s premerom žice $0,3\text{ mm}$ in razdaljo do plošče 1 mm	35

Tabela 7: Magnetna sila F v odvisnosti od temperature T in napetosti U pri elektromagnetu z votlim jedrom, s premerom žice 0,6 mm in razdaljo do plošče 1 mm.....	35
Tabela 8: Magnetna sila F v odvisnosti od temperature T in napetosti U pri elektromagnetu s polnim jedrom, s premerom žice 0,3 mm in razdaljo do plošče 1,4 mm.....	35
Tabela 9: Magnetna sila F v odvisnosti od temperature T in napetosti U pri elektromagnetu s polnim jedrom, s premerom žice 0,6 mm in razdaljo do plošče 1,9 mm.....	35
Tabela 10: Odvisnost koeficientov k_F in deležov večje hitrost d_v od napetosti U in temperature T	37
Tabela 11: Koeficienti magnetne sile $k_{F'}$ v odvisnosti od temperature T in premera žice d pri prostem jedru elektromagneta.....	38
Tabela 12: Podatki o merah jedra	41
Tabela 13: Izračunana prostornina jedra.....	41
Tabela 14: Magnetna sila F pri različnih premerih in jedrih skupaj s koeficientoma k_{Fp} , k_{Fv} in količnikom k_{Fj}	41
Tabela 15: Razlika med koeficientoma k_{Fj} in k_v pri različnih temperaturah T	42
Tabela 16: Koeficienti večje sile $k_{F'}$ pri polnem jedru magneta za različne premere d pri različnih temperaturah T in delež večjega učinka magnetne sile $d_{k_{F'}}$ pri polnem in votlem jedru	43

Kazalo grafov

Graf 1: Prikaz magnetne sile v odvisnosti od razdalje pri različnih temperaturah	23
Graf 2: Prikaz povprečja koeficientov razdalje in sile pri meritvah magnetne sile pri sobni temperaturi	25
Graf 3: Prikaz koeficientov kvadrata razdalje in koeficientov sile pri meritvi magnetne sile pri sobni temperaturi	26
Graf 4: Magnetna sila F pri različnih oddaljenostih x od železne plošče v odvisnosti od temperature T	27
Graf 5: Povečanje sile k v odvisnosti od temperature v primerjavi s temperaturo 22,5 °C....	28
Graf 6: Prikaz temperaturnega koeficienta magneta k_T v odvisnosti od temperature	30
Graf 7: Povprečni koeficient sile k_F v odvisnosti od temperature T	31
Graf 8: Odvisnost koeficienta magnetne sile $k_{F'}$ od temperature T pri votlem jedru elektromagneta.....	39
Graf 9: Odvisnosti koeficienta k_F in deleža večje hitrosti d_v od temperature T	40

Povzetek

V raziskovalni nalogi Vpliv temperature na magnetizem sem raziskoval, kako spreminjanje temperature vpliva na magnetne pojave ter lastnosti elektromagneta in neodimskega trajnega magneta.

Da bi to preučil, sem izvedel dva eksperimenta. V obeh sem magnetno silo meril z enakim orodjem pri različnih oddaljenostih od feromagnetne snovi. Pri prvem sem preučeval, kako toplota vpliva na magnetno silo na različnih razdaljah. V drugem pa sem namesto spreminjanja razdalje preučeval vpliv toplote skupaj s spremembo električne napetosti elektromagneta.

Zbrane podatke sem prikazal in analiziral s pomočjo grafov in tabel, kar mi je omogočilo natančnejšo interpretacijo rezultatov in razlago sprememb magnetnih lastnosti pri različnih pogojih.

Ključne besede: elektromagnetizem, temperatura, notranja energija, magnetno polje

Abstract

The aim of the research paper was to monitor how different temperatures affect magnetic properties of permanent magnet and electromagnet.

For this purpose two experiments were executed. The same equipment was used to measure the magnetic force between a magnet and a ferromagnetic plate in both experiments. In the first experiment I studied how the temperature affects the magnetic force at various distances. The second experiment was based on changing electric voltage and the temperature of the electromagnet.

The collected data were analysed with the help of graphs and tables, which enabled me to interpret the results more correctly and explain the magnetic properties of magnets in different conditions.

Key words: electromagnetism, temperature, internal energy, magnetic field

Zahvala

Iskreno se zahvaljujem mentorici profesorici Vesni Drole Uršič za strokovno vodenje, potrpežljivost in dragocene nasvete. Njena podpora in usmeritve so bile ključnega pomena pri oblikovanju in izvedbi raziskave.

Prav tako se zahvaljujem profesoricama Vesni Kos in Mariji Klančar za lektoriranje raziskovalnega dela.

Nenazadnje se zahvaljujem svoji družini za neomajno podporo, nakup pripomočkov in razumevanje skozi celotno obdobje raziskovanja, še posebno pa očetu, ki mi je pomagal pri izvedbi eksperimentalnega dela.

1 Uvod

Magnetizem je nekoč veljal za skrivnosten pojav, skozi stoletja raziskav pa je postal eden pomembnejših gradnikov sodobne tehnologije. Čeprav so magnetne sile odkrili že v antiki, so znanstveniki njihovo delovanje pojasnili mnogo kasneje.

Magneti so danes nepogrešljivi v vsakdanjem življenju. Najdemo jih v številnih napravah. So telesa, ki okrog sebe ustvarjajo magnetno polje. Delimo jih na naravne in na umetne. Umetni so tisti, ki sami po sebi nimajo magnetnega polja. Da ga ustvarimo, jih moramo namagnetiti ali skozi njih spustiti električni tok. Glede na to umetne magnete delimo na elektromagnete in trajne magnete.

Za raziskovalno nalogo o magnetizmu sem se odločil predvsem zaradi lastnega zanimanja za magnetne pojave. Večino literature sem našel na spletu, kjer so se mi ob prebiranju razlag pojavila številna vprašanja o povezavi magnetizma in atomske zgradbe, zato sem se odločil, da bom v okviru raziskovalne naloge raziskoval magnetizem pri različnih temperaturah, saj ta vpliva na spreminjanje gibanja osnovnih gradnikov v snovi.

1.1 Namen raziskovalne naloge

Ker nas magnetizem spremlja na vsakem koraku, je glavni namen raziskovalne naloge poglobiti razumevanje njegovih osnovnih zakonitosti. Predvsem sem se omejil na raziskovanje fizikalnih lastnosti trajnih magnetov in elektromagnetov ter opazoval, kako temperatura vpliva na njihovo delovanje. Z dovajanjem toplote namreč povečujemo notranjo energijo telesa, to pa spremeni njegove magnetne lastnosti.

- a) Pri prvem poskusu sem preučeval velikost magnetne sile med neodimskim magnetom in feromagnetno snovjo, medtem ko sem spreminjal razdaljo med njima in temperaturo magneta.
- b) Pri drugem poskusu sem preučeval velikost magnetne sile med elektromagnetom in feromagnetno snovjo ob spreminjanju napetosti, premera vodnika in temperature elektromagneta.

2 Teoretični del

2.1 Magnetizem

Magnetizem je sklop fizikalnih količin in pojavov, ki se dogajajo v magnetnem polju. Skupaj z elektriko magnetizem predstavlja eno od dveh vej elektromagnetizma.

2.1.1 Zgodovina magnetizma, elektromagnetizma

Magneti so bili znani že v antičnih časih. Ime magnet izvira iz grške besede "μαγνήτις λίθος" (magnētis lithos), kar pomeni "magnetni kamen". Ta izraz je izpeljan iz imena z rudami bogate pokrajine Magnesia, kjer so našli mineralno kamnino magnetit. Prvi zapisi o uporabi in preučevanju magnetov segajo 4000 let nazaj. Med prvimi so magnete uporabljali Kitajci in ljudstva v Ameriki za pomoč pri orientaciji na Zemlji (Mohorič & Babič, 2014, str. 67).

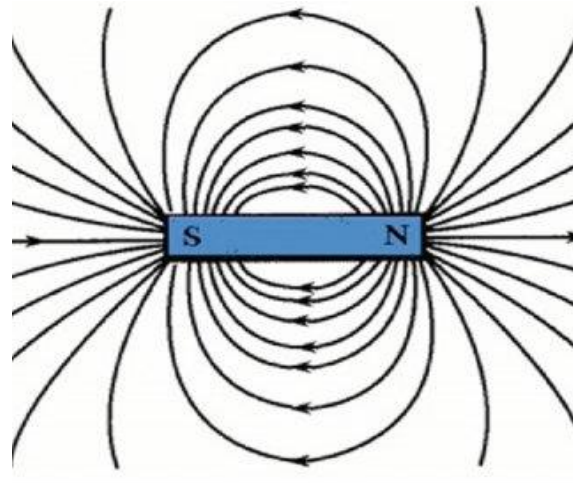
V 17. stol. so se začele prve resnejše raziskave o magnetizmu, pri čemer je William Gilbert prispeval pomemben delež z odkritjem Zemljinega magnetnega polja. Prvi, ki je povezal razmerje med elektriko in magnetizmom, je bil Hans Christian Ørsted, ki je leta 1819 dokazal, da električna žica okoli sebe povzroči magnetno polje. Enačbo in zakon za omenjen poskus sta izpeljala Jean-Baptiste Biot in Félix Savart. K nadaljnjemu razvoju magnetizma sta veliko doprinesla André-Marie Ampère in Michael Faraday. V drugi polovici 19. stoletja je vse dotedanje znanje iz magnetizma, elektrike in optike povzel James Clerk Maxwell in to združil v enačbe elektromagnetizma, danes znane kot Maxwellove enačbe. V začetku 20. stol. je Albert Einstein uporabil Maxwellove enačbe za dokaz svoje teorije relativnosti, s katero si lahko tudi razložimo magnetno silo kot učinek relativnih hitrosti električnih nabojev. (Wikipedia Magnetism).

2.2 Magnetno polje in magnetna sila

Prostor oziroma vektorsko polje, v katerem na magnetne ali feromagnetne materiale deluje magnetna sila, imenujemo magnetno polje. Tako kot pri vsakem vektorskem polju tudi tukaj velja, da se jakost magnetnega polja z oddaljenostjo od vira zmanjšuje.

Vsak magnet ima južni in severni pol, za katera velja, da se nasprotna pola privlačita, enaka pa odbijeta. Severni pol magneta je tisti, ki se kot prosto vrteči magnet obrne proti geografskemu severu Zemlje, kjer se nahaja južni pol njenega magnetnega polja. Magnetno polje grafično prikažemo z magnetnimi silnicami, ki potekajo od severnega proti južnemu polu magneta. Nimajo konca ampak se nadaljujejo tudi skozi notranjost magneta. Gostota magnetnih silnic je merilo za jakost magnetnega polja. Del magnetnega polja, kjer so si silnice enake po smeri in jakosti, imenujemo homogeno magnetno polje. Primer homogenega polja je polje med poloma podkvastega magneta.

Magnetna telesa zmeraj nastopajo v parih ali v sodem številu polov in nikoli kot magnetni monopoli (en pol). Tudi če magnet prepolovimo, bo vsaka polovica imela svoj severni in južni pol (Mohorič & Babič, 2014, str. 68, 69).



Slika 1: Prikaz magnetnega polja (David J. Griffiths, 2013)

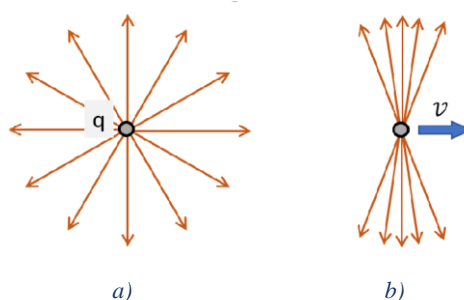
2.2.1 Električna v magnetizmu

Magnetna sila F_m je privlačna ali odbojna sila, ki deluje med gibajočimi se električnimi delci v magnetnem polju. Izhaja iz gibanja elektronov v atomih oziroma iz električnega toka v vodniku. Električni tok (I) je definiran kot količina naboja (e), ki se v dani časovni enoti (t) pretoči skozi presek vodnika. Enačba za električni tok je:

$$I = \frac{\Delta e}{t}$$

Smer električnega toka ja nasproten smeri gibanja elektronov.

Pozitivno ali negativno nabiti delci povzročijo okoli sebe električno polje (Mohorič & Babič, 2014, str. 46) Ko se nabiti delec začne premikati, poleg električnega polja, ki se stisne v smeri gibanja, gibanje povzroči tudi magnetno polje, smer katerega je pravokotna na smer gibanja nabitega delca (slika 2).

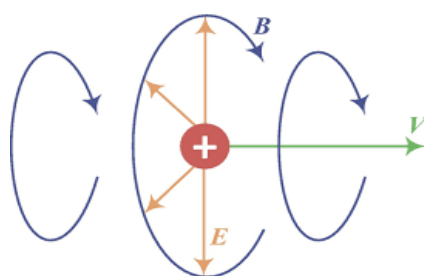


Slika 2: Razlika električnega polja med statičnim (a) in premikajočim se elektronom (b) (Eugene Stefanovich, 2023)

Magnetno polje se pojavi pri premikajočih se delcih z električnim nabojem.

Tako kot električna sila ne deluje na vsa telesa (nevtralni naboji), tudi magnetna sila ne deluje na vsa. Deluje le na tista, ki imajo v sebi premikajoči se električni naboj oziroma povzročajo magnetno polje zaradi električnega toka ali gibanja elektronov v atomu.

Silnice magnetnega polja so koncentrične krožnice okoli premikajočega se električnega naboja (slika 3). Smer magnetnega polja je odvisna od smeri gibanja elektronov oziroma od smeri toka (Valenčič, 1993, str. 11- 27).



Slika 3: Električna in magnetna polja v premikajočem se elektronu (Sebastian Volz; Jose Ordonez Miranda, 2024)

Ko električni tok teče skozi vodnik, okoli njega nastane magnetno polje. To polje postane močnejše, če vodnik večkrat ovijemo okoli valjastega objekta, s čimer dobimo tuljavo. Takemu magnetu pravimo elektromagnet (Mohorič & Babič, 2014, str. 71).

2.2.2 Gostota magnetnega polja

Magnetna sila med dvema telesoma je odvisna od moči magnetnih polj obeh teles, kar imenujemo gostota magnetnega polja. To je fizikalna količina, ki opisuje intenziteto magnetnega polja v določeni točki v prostoru (Mansfield & O'Sullivan, 2011, str. 413). Simbol za gostoto magnetnega polja je B , osnovna enota je tesla (T). V grafičnem prikazu je vidno, da je gostota magnetnega polja večja tam, kjer so magnetne silnice bolj skupaj, in manjša, ko se oddaljujemo od vira magnetnega polja. Zemlja ima na primer gostoto magnetnega polja 10^{-5} T, stalni magneti od 10^{-3} T do 1 T, elektromagneti v laboratorijih do 50 T, nevtronska zvezda pa ima lahko magnetno polje kar 10^6 T (Mohorič & Babič, 2014, str. 73).

2.2.2.1 Gostota magnetnega polja v homogenem magnetnem polju

Z gostoto magnetnega polja se lahko izračuna velikost magnetne sile, ki deluje na neko telo, in obratno. Če se električno nabiti delec premika v prostoru, kjer je prisotno homogeno magnetno polje, je magnetno polje v vseh točkah in smereh okoli premikajočega se delca enake jakosti. Magnetna sila na delec je odvisna od gostote oziroma intenzitete homogenega magnetnega polja, od velikosti naboja e ter hitrosti delca v .

Če se ta giblje hitreje (povzroča večji tok) ali ima večji naboj (e), bo imel močnejše magnetno polje in zato večjo silo v prisotnem homogenem magnetnem polju (gl. podpoglavje 2.4). Zaradi opisanih fizikalnih količin delca in dejstva, da večja gostota homogenega magnetnega polja (B) pomeni večjo silo na delec (F), lahko zapišemo spodnjo enačbo magnetne sile:

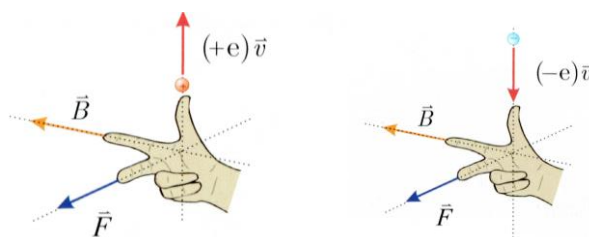
$$F = evB$$

Za izračun gostote homogenega magnetnega polja, ki ga povzroča neko telo, se zgornjo enačbo samo preuredi. Iz nje je možno izpeljati osnovno enoto gostote magnetnega polja: tesla (T).

Magnet z gostoto homogenega magnetnega polja 1 T povzroča silo 1 N na električno nabiti delec z nabojem 1 As, ki se giblje s hitrostjo 1 m/s. Prav tako ob sili 1 N na nabiti delec, ki s svojim gibanjem povzroči električni tok 1 A na dolžini 1 metra, nastane magnetno polje z gostoto 1 T.

$$B = \frac{F}{ev} = \left[\frac{1\text{N} \times \text{s}}{1\text{As} \times 1\text{m}} \right] = \left[\frac{\text{N}}{\text{Am}} \right] = [1\text{T}]$$

Enačbi zgoraj veljata samo, če je $\vec{B} \perp \vec{v}$ oziroma če je gostota magnetnega polja pravokotna na gibanje delca. Smer sile na premikajoče se delce je odvisna od smeri gibanja in smeri gostote magnetnega polja. Smeri vseh danih količin lahko določimo s pravilom desne roke (slika 4).



Slika 4: Prikaz smeri magnetne sile (F), gostote magnetnega polja (B) in smeri gibanja delca (v)

(dr. Aleš Mohorič, mag. Vitomir Babič, 2014)

Tako kot na električno nabiti delec lahko tudi na vodnik, po katerem teče električni tok, deluje sila v homogenem magnetnem polju. Kot je razvidno iz okrajšane enačbe z enotami (gl. zgoraj), lahko silo na vodnik z električnim tokom (I) in dolžino vodnika (l) v homogenem magnetnem polju zapišemo z naslednjo enačbo (Mohorič & Babič, 2014, str. 73–74):

$$B = \frac{F}{Il}$$

2.3 Vrste magnetnih snovi

Magneti se delijo na trajne in elektromagnete. Obstajajo tudi snovi, ki same po sebi ne povzročajo magnetnega polja, a ga v magnetnem polju začnejo inducirati; npr. železo, kobalt, nikelj ...

2.3.1 Relativna permeabilnost snovi

Relativna magnetna permeabilnost μ_r je fizikalna količina, ki opisuje zmožnost specifičnega materiala, da v prisotnosti zunanega magnetnega polja tudi sam začne ustvarjati magnetno polje. Izrazimo jo z razmerjem gostote magnetnega polja v snovi B , ko je material izpostavljen zunanemu magnetnemu polju, in gostote magnetnega polja v vakuumu B_0 (ali v snovi, ki ni izpostavljena vplivu zunanega magnetnega polja). To razmerje nam pove, koliko je gostota magnetnega polja v snovi večja v primerjavi z gostoto v vakuumu pri enakem zunanjem polju. Za večino snovi je razmerje blizu 1, le za feromagnetne snovi je vrednost velika. Enačbo za relativno magnetno permeabilnost snovi μ_r zapišemo:

$$\mu_r = \frac{B}{B_0}$$

Magnetno polje v snovi B je odvisno od gostote zunanega magnetnega polja B_0 in od gostote magnetnega polja B_{in} , ki ga je material induciral.

Material lahko namreč sam povzroči magnetno polje, lahko pa zunanje magnetno polje povzroči, da se atomi, ki povzročajo magnetno polje, poravnajo.

$$B = B_{in} + B_0$$

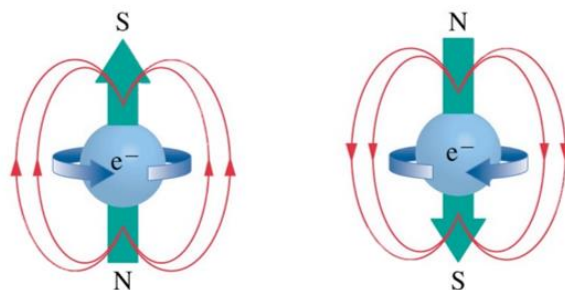
Če se to enačbo gostote magnetnega polja vnese v zgornjo, se po preoblikovanju izkaže, da je relativna permeabilnost v snovi μ_r v linearni odvisnosti s količnikom gostote inducirane magnetnega polja B_{in} in polja B_0 (Shenoy, 2021).

2.3.2 Magnetizem na atomski ravni

Gostota magnetnega polja, ki ga material lahko inducira, je odvisna od atomske zgradbe snovi. Magnetno polje je posledica gibanja električnih nabojev: pri elektromagnetih in vodnikih nastane zaradi električnega toka, pri stalnih magnetih pa zaradi premikanja elektronov v atomih (Mohorič & Babič, 2014, str. 79).

V atomu ločimo dve osnovni vrsti gibanj elektronov. Med protoni in elektroni deluje privlačna električna sila. Zaradi nje elektroni krožijo okrog jedra atoma. To gibanje imenujemo orbitalno gibanje, ki povzroča magnetno polje okrog posameznega elektrona oziroma okoli celotnega atoma. Pri tem gibanju se skupno magnetno polje lahko izniči, če dva elektrona krožita v nasprotnih smereh.

Druga vrsta gibanja elektronov, ki ima veliko večji vpliv na skupno magnetno polje atoma, opredelimo kot vrtenje elektronov ali spin. To je vrtilna kvantna količina, ki opisuje vrtenje elektrona in prav tako povzroča magnetno polje okoli njega (Valenčič, 1993, str. 85, 87). Vsak elektron s spinom proizvaja magnetno polje okoli sebe, kar privlači elektrone z nasprotnim spinom oziroma nasprotno smerjo magnetnega polja (slika 5).



Slika 5: Magnetno polje, ki ga povzroča elektron zaradi spina (Pettruci idr., 2011)

Če je elektron v zunanji lupini v paru, se skupno magnetno polje z drugim elektronom izniči (slika 5). Če pa se elektron nahaja tam, kjer ni povezan z drugim elektronom, govorimo o atomu elementa, ki ima magnetne značilnosti, vendar to še ne pomeni, da bo snov iz tega elementa tudi magnetna (Reich, 2013).

2.3.2.1 Diamagnetizem

Diamagnetizem je lastnost materiala, pri katerem se spin in orbitalno gibanje elektronov kombinirata tako, da se skupno magnetno polje atoma izniči (Valenčič, 1993, str. 87). Čeprav tak material sam po sebi ni magneten, saj elektroni s spinom nastopajo v parih, začne ob prisotnosti zunanega magnetnega polja interagirati (medsebojno delovati) z njim. Zunanje magnetno polje povzroči spremembo v gibanju elektronov materiala. Ta povzročča, da magnetno polje v snovi začne delovati v nasprotni smeri zunanega magnetnega polja, kar pa povzroči odbojno magnetno silo na telo. Ta pojav je eden izmed posledic elektromagnetne indukcije.

Diamagnetni materiali imajo majhno relativno magnetno permeabilnost $\mu_r \leq 1$, kar pomeni, da je zunanje magnetno polje B_0 v vakuumu močnejše od polja v snovi B . Diamagnetizem je prisoten v vseh snoveh, a je opazen samo takrat, ko preostali magnetni učinki, kot sta paramagnetizem ali feromagnetizem, ne prekrijejo njegovega vpliva. Pod diamagnetne materiale spadajo voda, les, zlato, grafit in mnoge organske spojine (Shenoy, 2021).

2.3.2.2 Paramagnetizem

Pri paramagnetizmu imajo atomi nesparjene elektrone. Atomi teh snovi imajo zaradi spina in orbitalnega gibanja elektronov lasten magnetni moment, kar pomeni, da se obnašajo kot majhni magneti s severnim in južnim polom.

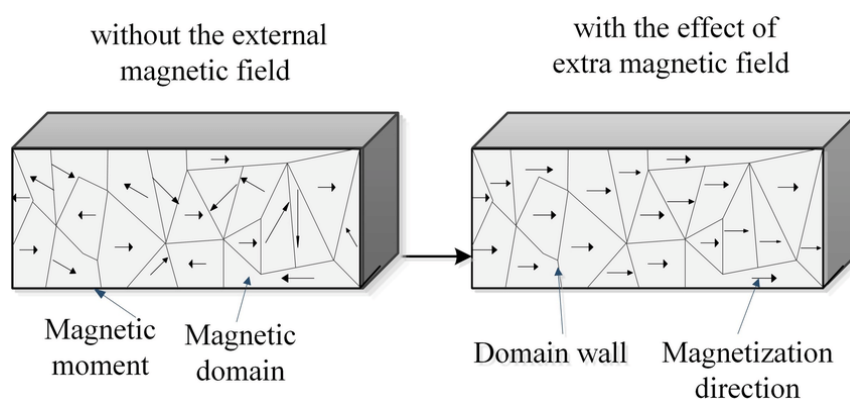
Če ni zunanega magnetnega polja, so magnetni momenti atomov naključno razporejeni, zato se skupno magnetno polje snovi izniči. Ko je snov postavljena v zunanje magnetno polje, na atome deluje magnetni navor, ki magnetne momente atomov delno poravnava v smeri silnic zunanega magnetnega polja (južni pol atoma se bo obrnil proti severnemu polu zunanega magnetnega polja in obratno). Magnetno polje v snovi se tako ojača.

Če je vpliv paramagnetizma na snov večji od vpliva diamagnetizma, potem je snov paramagnetna. Relativna magnetna permeabilnost paramagnetnih materialov je $\mu_r \geq 1$, kar pomeni, da je inducirano magnetno polje B_{in} v materialu močnejše od zunanega magnetnega polja B_0 na izbrani razdalji.

S paramagnetizmom in diamagnetizmom se določi, ali na telo v magnetnem polju deluje privlačna ali odbojna sila (Shenoy, 2021).

2.3.2.3 Feromagnetizem

Oblika paramagnetizma, pri kateri se atomi lokalno poravnajo v isto smer, je feromagnetizem. Skupinam atomov, katerih magnetni momenti se enako usmerjeni, pravimo magnetne domene. Zanje je značilno, da so različno usmerjene, zato je snov navzven nemagnetna. Ko telo postavimo v zunanje magnetno polje, se skušajo magnetne domene med seboj poenotiti in poravnati v smeri zunanjega magnetnega polja (slika 6).



Slika 6: Prikaza ureditve domen za feromagnetne snovi v odsotnosti (levo) in prisotnosti zunanjega magnetnega polja (desno) (Congyi Wang idr.)

Ko feromagnet umaknemo iz zunanjega magnetnega polja, bo ostal namagneteten. S pomočjo opisane postopka, ki mu pravimo magnetizacija, se izdelujejo trajni magneti. Če izpostavimo telo zunanjemu magnetnemu polju, feromagnetizem izkazujejo predvsem železo, nikelj, kobalt. Feromagnetni imajo veliko relativno magnetno permeabilnost ($\mu_r \gg 1$), kar pomeni, da zaradi svoje strukture, sestavljene iz magnetnih domen, povzročajo veliko močnejše magnetno polje v snovi kot zunanje magnetno polje (Valenčič, 1993, str. 87, 88).

2.4 Teorija relativnosti in magnetizem

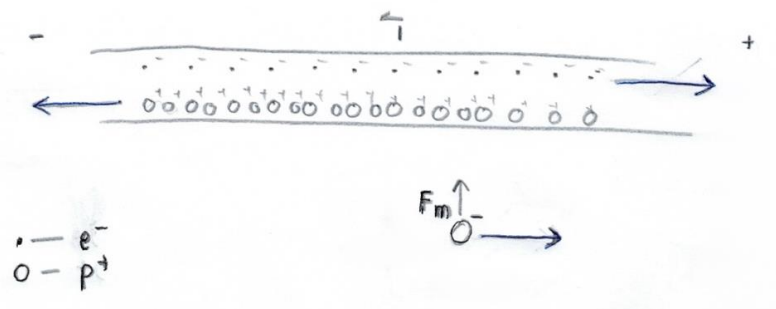
Magnetizem je posledica gibanja delcev z električnim nabojem. Zakaj gibajoči se naboji povzročajo magnetno polje, podrobneje pojasnjuje posebna teorija relativnosti.

Posebna teorija relativnosti trdi, da je hitrost svetlobe c vedno konstantna na glede na to, s katere točke opazujemo oziroma kako hitro se giblje opazovano telo. Zaradi tega se pri telesih, ki se gibljejo z večjo hitrostjo, dolžina v smeri gibanja zmanjša glede na opazovalca v

mirovanju. Hitreje kot se telo giblje, bolj izrazita je ta sprememba dolžine v smeri njegovega gibanja. Ta pojav je v klasični mehaniki zanemarljiv, saj postane opazen šele pri hitrostih, primerljivih s hitrostjo svetlobe. Pri gibanju električnih nabojev pa ta pojav neposredno prispeva k nastanku magnetnega polja.

Predstavljajmo si vodnik, po katerem teče električni tok, ter negativno nabiti delec, ki se premika vzporedno z vodnikom. Ko elektron zapusti svoje mesto v vodniku, bo to mesto ostalo pozitivno nabito. Pri gibanju elektronov v eno smer se zdi, kot da se pozitivni naboji premikajo v nasprotni smeri.

Če gledamo z vidika negativno nabitega delca, ki se v vodniku giblje vzporedno z električnim tokom v isti smeri kot elektroni, bo videti, kot da elektroni v vodniku mirujejo. Navidezni pozitivni naboji pa se bodo premikali v nasprotni smeri s hitrostjo, ki je enaka vsoti hitrosti delca in hitrosti pozitivnih nabojev. Zaradi zgoraj opisanega pojava se bodo pozitivni naboji zdeli bolj zgoščeni, saj se bodo skrčili v smeri gibanja. Tako je v perspektivi delca zaznan presežek pozitivnega naboja, kar privlači negativno nabiti delec k vodniku. Na delec deluje privlačna sila, ki je rečemo magnetna sila. (slika 7).



Slika 7: Prikaz električnih delcev z nabojev ter njihov vpliv na magnetno silo

Ta sila ne bo delovala na statičen delec, saj se bosta iz perspektive delca oba naboja premikala z enako hitrostjo (navidezni pozitivni naboji so posledica gibanja elektronov v drugo smer, zato bo hitrost teh dveh delcev z nabojem zmeraj enako zgoščena) (Vocademy, 2023).

3 Eksperimentalni del

V eksperimentalnem delu sem raziskoval vpliv temperature na lastnosti neodimskega magneta in elektromagneta. Pri tem sem si zastavil več raziskovalnih vprašanj in postavil hipoteze, ki sem jih sistematično preverjal skozi eksperimente.

3.1 1. Poskus: Vpliv temperature na magnetno silo neodimskega magneta

Pri prvem poskusu sem meril magnetno silo med neodimskim magnetom in železno ploščo. Neodimski magnet sem izpostavil različnim temperaturam in s silomerom meril magnetno silo na različnih oddaljenostih. Različne temperaturne razpone, od $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, sem dosegel z ohlajanjem v hladilniku in zmrzovalniku ter s segrevanjem v pečici.

3.1.1 Raziskovalna vprašanja in hipoteze

Raziskovalna vprašanje: V kakšnem odnosu sta razdalja in magnetna sila med magnetom in feromagnetno snovjo in ali je to razmerje enako pri različnih temperaturah?

Hipoteza 1: Predvidevam, da sta si magnetna sila in razdalja obratno sorazmerni tudi pri različnih temperaturah. Ko magnetu za nek delež zmanjšamo razdaljo do feromagnetne snovi, bo magnetna sila za enak delež večja. Tudi pri različnih temperaturah bo delež ostal enak, saj se moč magnetov ne glede na razdaljo spreminja v enakem razmerju s temperaturno spremembo.

Raziskovalno vprašanje: Ali sprememba temperature vpliva na gostoto magnetnega polja?

Hipoteza 2: Predvidevam, da temperatura vpliva na gostoto magnetnega polja magneta.

S spreminjanjem temperature vplivamo na notranjo energijo magneta, to pa lahko vpliva na moč magnetnega polja, saj bi lahko s spreminjanjem notranje energije spremenili hitrost elektronov.

Raziskovalno vprašanje: V kakšnem razmerju (če sploh) sta gostota magnetnega polja trajnega magneta in temperatura?

Hipoteza 3: Predpostavljam, da gostota magnetnega polja magneta narašča z višanjem temperature in da sta gostota magnetnega polja in temperatura premo sorazmerni.

S povečevanjem notranje energije teles (z višanjem temperature) se elektroni začnejo pospešeno gibati, kar povzroči večjo magnetno silo.

3.1.2 Opis eksperimenta in pripomočkov

Pri eksperimentu sem uporabljal neodimski magnet, ki ima specificirano vlečno silo 539 N, kar pomeni, da je toliko sile potrebno za odmik magneta, pritrjenega na 1 cm debelo železno ploščo. Uporabil sem tudi železno ploščo debeline 2 cm. Neodimski magnet ima strukturno sestavo $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, gostoto magnetnega polja pa 1,22–1,26 T, kar ga uvršča med magnete z oznako N38.

Za lažje merjenje magnetne sile sem izdelal merilni pripomoček. Ta je narejen iz pravokotnega lesenega ohišja. Na vrhu ohišja je vstavljen poseben nastavek za navojno palico, ki omogoča nastavljanje razdalje do železne plošče. Na navojno palico je navit dvižni očesni vijak, ki je povezan z dodatnim nastavkom za obešanje silomera (slika 9).



Slika 8: Digitalni laserski termometer



Slika 9: Pripomočki pri izvajanju 1. poskusa

Za merjenje magnetne sile med magnetom in železno ploščo sem uporabil digitalno tehtnico in navaden silomer za manjše sile na večji razdalji od plošče. Razdaljo od magneta do plošče sem meril s 6-centimetrskim ravnilom, ki sem ga na zadnjem delu utrdil s stiroporjem, da sem zagotovil pravi kot in stabilnost.

Zaradi eksperimentiranja z magnetom pri različnih temperaturah sem uporabljal zaščitne rokavice. Površinsko temperaturo magneta sem meril z digitalnim laserskim termometrom (slika 9). Pri okvirnem uravnavanju temperature sem si pomagal tudi s termometrom za merjenje temperature v zmrzovalniku, hladilniku in pečici, kjer sem magnetne ohlajal in segreval na želeno temperaturo.

3.1.3 Opis postopkov

Že pri začetnem raziskovanju sem opazil, da magneti s segrevanjem trajno izgubijo svojo magnetno moč tudi pri sobni temperaturi. Na podlagi tega sem se odločil, da jih za zagotovitev realnih podatkov najprej ohladim. Ko je magnet v zmrzovalniku, hladilniku ali pečici dosegel enako temperaturo kot zrak v napravi, sem mu dokončno izmeril temperaturo (slika 10, 11), nato pa ga prestavil na konstrukcijo za merjenje.



Slika 10: Segrevanje magnetov in merjenje temperature



Slika 11: Ohlajanje magnetov in merjenje temperature

Ko sem magnet obesil na silomer, sem z navojno palico spreminjal njegovo razdaljo do železne plošče. Pri tem sem si zapisoval meritve sile na določenih razdaljah. Že v zgodnjih fazah raziskovanja sem dognal, da morajo biti vsa orodja v enaki poziciji in enako orientirana, saj se manj kot milimetrski sprememba težko odčita na ravnilu, vendar je razlika vseeno opazna na tehtnici. Pri merjenju magnetne sile sem upošteval tudi težo magneta, ki sem jo kasneje odštel, da sem dobil samo vrednost magnetne sile.



Slika 12: Merjenje magnetne sile in razdalje z neodšteto silo teže

3.1.4 Rezultati in razprava

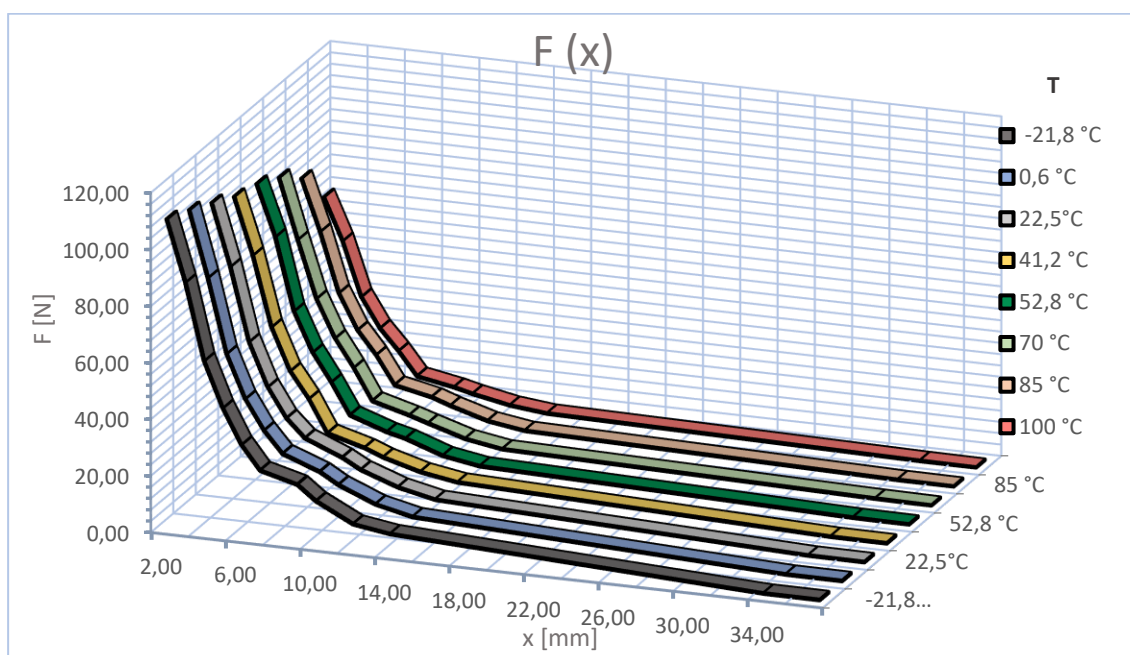
Izmerjene podatke sem si med merjenjem za lažjo sprotno analizo in kasnejšo obdelavo podatkov zapisoval v Excel preglednico.

V spodnji tabeli so prikazane vrednosti magnetne sile F [N] v odvisnosti od temperature T [°C] in razdalje x [mm] magneta do železne plošče. Podatki so prikazani z že odšteto težo magneta, kar pomeni, da prikazujejo samo magnetno silo.

Tabela 1: Magnetna sila [N] v odvisnosti od temperature T in razdalje x do železne plošče

		F [N]													
x[cm]	T [°C]	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	7,5	9,0	10,0	12,0	14,0	34,0	37,0	38,0	41,0
-21,8		109,2	87,7	60,7	44,7	32,4	24,0	20,5	15,4	8,7	6,7	0,5	0,5	0,4	0,3
0,6		105,7	82,6	56,5	41,2	30,8	23,2	18,3	14,4	9,0	6,0	0,5	0,5	0,4	0,3
22,5		101,5	79,8	54,0	38,7	28,4	22,0	16,6	13,0	8,3	5,4	0,5	0,4	0,4	0,3
41,2		97,0	77,1	52,5	37,6	28,5	17,0	13,3	10,7	7,0	4,8	0,4	0,3	0,3	0,2
52,8		94,8	76,9	51,4	37,5	27,7	16,7	12,2	10,6	6,0	3,8	0,4	0,3	0,2	0,2
70,0		90,3	69,2	49,1	35,8	26,1	15,0	11,4	9,3	5,3	3,1	0,5	0,2	0,2	0,2
85,0		83,3	65,3	44,4	32,0	23,9	13,9	11,1	8,8	4,9	2,9	0,4	0,2	0,2	0,2
100,0		70,0	55,3	36,3	25,9	18,6	10,3	7,9	6,3	3,7	2,3	0,4	0,2	0,2	0,2

Podatki iz tabele 1 so prikazani tudi z grafom. Meritve za posamezne temperature so prikazane z različnimi barvami in jih lahko razberemo iz legende.



Graf 1: Prikaz magnetne sile v odvisnosti od razdalje pri različnih temperaturah

Iz grafa je razvidno, da pri vseh merjenih temperaturah velja, da manjša kot je razdalja med magnetom in železno ploščo, večja je izmerjena magnetna sila. Odvisnost ni linearna. Pri majhnih razdaljah je magnetna sila večja, potem pa že z manjšim večanjem razdalje zelo hitro pada. Pri večjih razdaljah se strmina grafa bolj izravna. Iz grafa je tudi razvidno, da z naraščanjem temperature pada magnetna sila.

3.1.4.1 Odvisnost moči magneta od razdalje

Za natančnejšo analizo razmerja med magnetno silo in razdaljo sem najprej določil koeficient dveh zaporednih razdalji k_x in koeficient dveh sil k_F , merjenih na omenjenih zaporednih razdaljah. Zaporedne meritve so označene z indeksom n.

$$k_{x_n} = \frac{x_n}{x_{n+1}}$$

$$k_{F_n} = \frac{F_{n+1}}{F_n}$$

Če predpostavimo, da sta magnetna sila in razdalja v obratnem sorazmerju, velja:

$$k_{x_n} = k_{F_n}$$

To pomeni, da bi zmanjšanje razdalje za določen delež povzročilo enako povečanje magnetne sile. Za preverjanje te predpostavke sem k enačbi prištel tudi morebitno razliko obeh koeficientov.

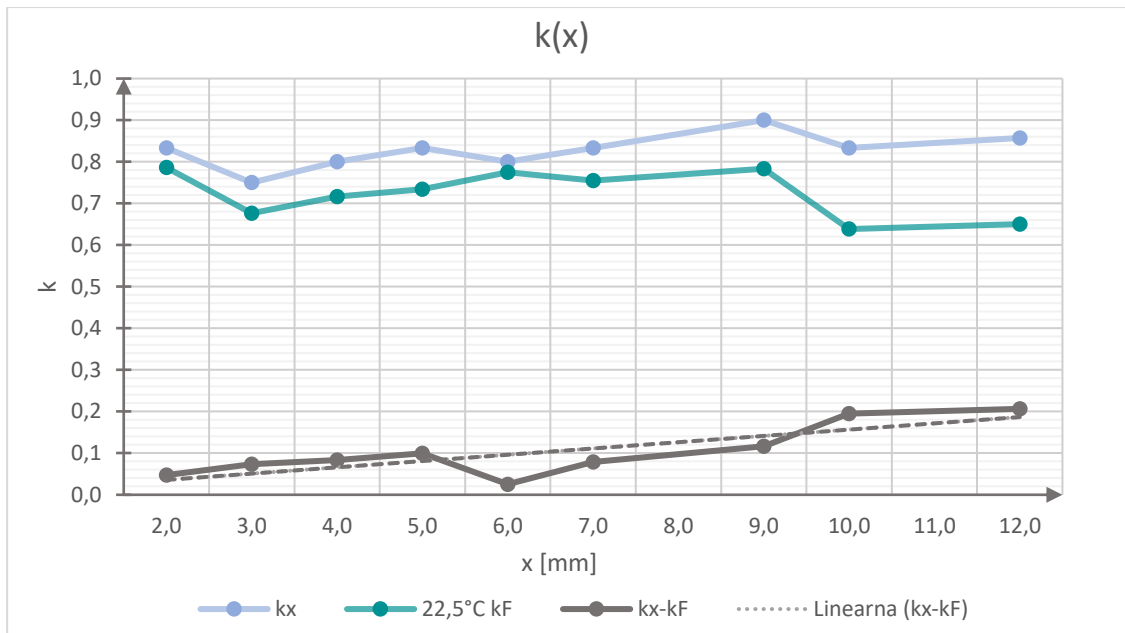
$$\frac{x_n}{x_{n+1}} = \frac{F_{n+1}}{F_n} + r_n$$

Če bo njena vrednost enaka nič, lahko potrdim obratno sorazmerje med omenjenima količinama, če ne bo enaka nič, tega ne morem trditi. Trditev sem preveril pri treh različnih temperaturah.

V spodnji tabeli in grafu so zbrani podatki koeficienta razdalje k_x in magnetne sile k_F ter njuna razlika r pri različnih razdaljah in temperaturah.

Tabela 2: Koeficienta razdalje k_x , magnetne sile k_F pri različnih temperaturah T in razlika obeh koeficientov r

	T[°C]	x [mm]										$\bar{r} = \overline{(k_x - k_F)}$
		2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	7,5	9,0	10,0	12,0	14,0	
k_x		0,83	0,75	0,80	0,83	0,80	0,83	0,90	0,83	0,86	0,41	
k_F	22,5	0,79	0,68	0,72	0,73	0,78	0,76	0,78	0,64	0,65	0,09	
$r=k_x - k_F$	22,5	0,05	0,07	0,08	0,10	0,03	0,08	0,12	0,20	0,21	0,32	0,103
k_F	41,2	0,80	0,68	0,72	0,76	0,60	0,78	0,81	0,65	0,69	0,09	
$r=k_x - k_F$	41,2	0,04	0,07	0,08	0,08	0,20	0,05	0,10	0,18	0,17	0,32	0,107
k_F	-21,8	0,80	0,69	0,74	0,73	0,74	0,85	0,75	0,57	0,77	0,08	
$r=k_x - k_F$	-21,8	0,03	0,06	0,06	0,11	0,06	0,02	0,15	0,27	0,09	0,33	0,094



Graf 2: Prikaz povprečja koeficientov razdalje in sile pri meritvah magnetne sile pri sobni temperaturi

Iz prikazov je razvidno, da razlika med koeficientoma ni enaka nič, poleg tega pa se tudi z razdaljo večja, kar pomeni, da magnetna sila ni v obratnem sorazmerju z razdaljo.

Pravzaprav nobena sila na daljavo (gravitacijska, električna sila) ni z razdaljo obratno sorazmerna. Ta polja se v obliki valovanj širijo v vse tri dimenzije in kot okrogline. To pomeni, da se polje širi v vse smeri enakomerno. Ker je širitev polj enaka obliki krogle, lahko to zapišemo, kot da je ta enaka ploščini krogle:

$$S = 4\pi r^2$$

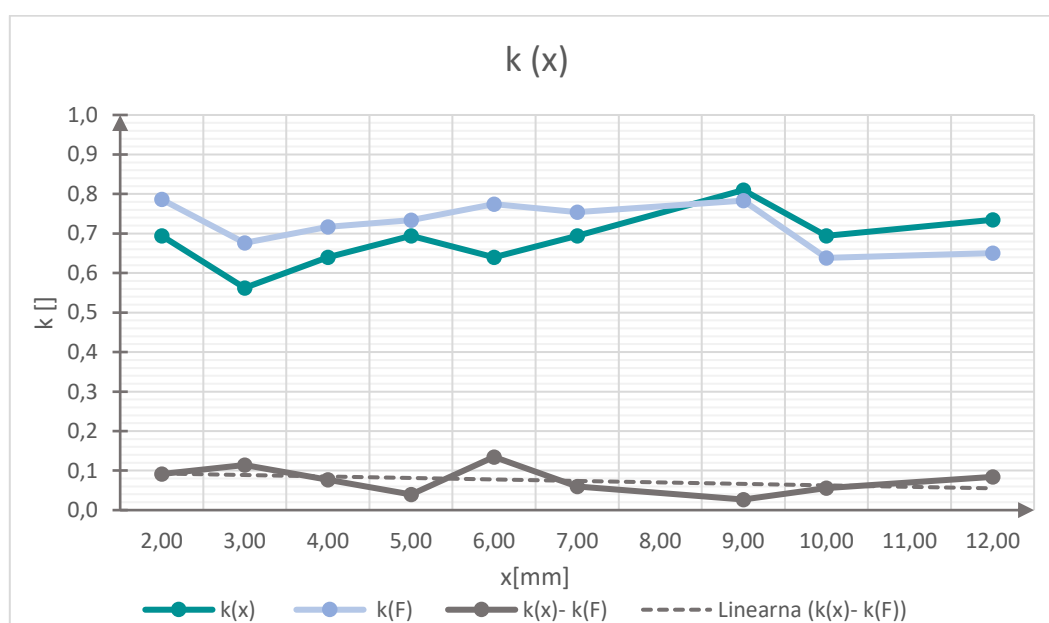
Če to prenesemo tudi na magnetno polje, domnevamo, da je magnetna sila obratno sorazmerna s ploščino kroga. Tako je lahko koeficient dveh razdalji k_x enak količnikoma kvadratov x_1 in x_2 , ki sta bila izmerjena na različnih razdaljah.

$$k_{x'} = \frac{4\pi x_n^2}{4\pi x_{n+1}^2} = \frac{x_n^2}{x_{n+1}^2}$$

V spodnji tabeli in grafu so prikazani podatki koeficienta $k_{x'}$ in koeficienta k_F ter njuna razlika pri treh različnih temperaturah.

Tabela 3: Koeficienti kvadrata razdalje k_x in sile k_F pri različnih temperaturah z razliko obeh koeficientov r

	T [°C]	x[mm]									$\bar{r} = \overline{(k_{x'} - k_F)}$
		2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	7,5	9,0	10,0	12,0	
$k_{x'}$		0,69	0,56	0,64	0,69	0,64	0,69	0,81	0,69	0,73	
k_F	22,5	0,79	0,68	0,72	0,73	0,77	0,75	0,78	0,64	0,65	
$r=k_F - k_{x'}$	22,5	0,09	0,11	0,08	0,04	0,13	0,06	0,03	0,06	0,08	0,076
k_F	41,2	0,79	0,68	0,72	0,76	0,60	0,78	0,80	0,65	0,69	
$r=k_F - k_{x'}$	41,2	0,10	0,12	0,08	0,06	0,04	0,09	0,01	0,04	0,05	0,065
k_F	-21,8	0,80	0,69	0,74	0,72	0,74	0,85	0,75	0,56	0,77	
$r=k_F - k_{x'}$	-21,8	0,11	0,13	0,10	0,03	0,10	0,16	0,06	0,13	0,04	0,094



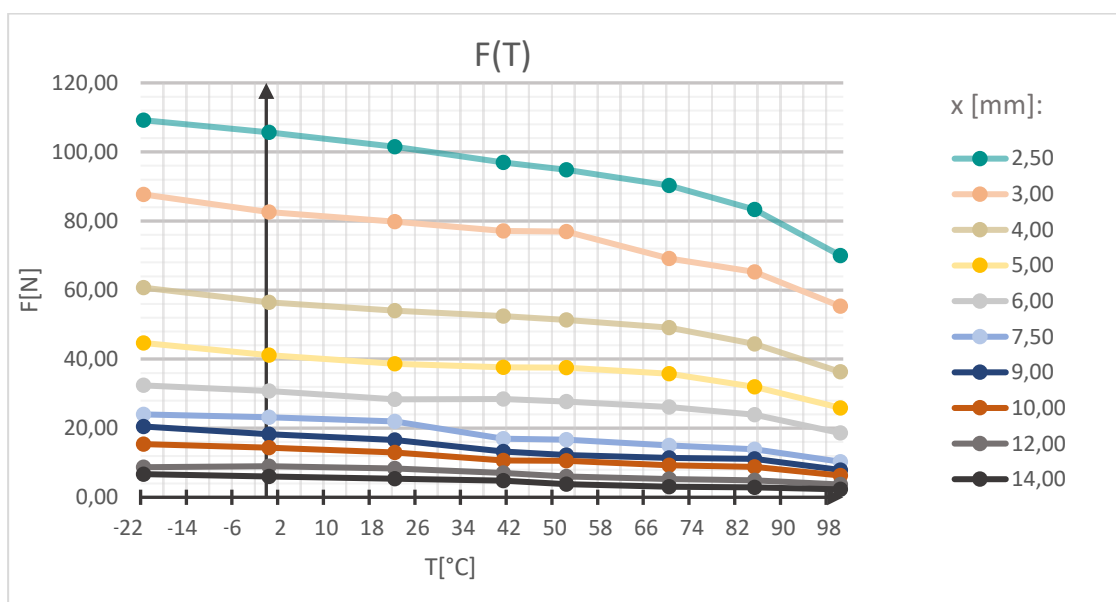
Graf 3: Prikaz koeficientov kvadrata razdalje in koeficientov sile pri meritvi magnetne sile pri sobni temperaturi

Razlika dveh koeficientov je konstantnejša in manjša kot pri prejšnji meritvi ter je le za nekaj procentov večja od nič. Na podlagi tega lahko sklepamo, da med magnetno silo in kvadratom razdalje morda obstaja obratno sorazmerje.

Prisotno razliko v koeficientih pripisujem predvsem temu, da magnet in železo ne ustvarjata enako močnega magnetnega polja. Kovinska plošča ne inducira celotne gostote magnetnega polja, ki ga povzroča magnet (enačba pri magnetni permeabilnost). Diferenca med količinama je tudi razlog, da magnet ne oddaja polja iz točke tako kot električno nabita telesa, pač pa ga povzroča z volumnom v prostoru. To pomeni, da bi morali za natančnejšo analizo upoštevati ploščino sploščene kroglice.

3.1.4.2 Odvisnost magnetne sile od temperature

Če pogledamo podatke v tabeli 3, lahko vidimo, da se povprečna razlika koeficientov povečuje z nižanjem temperature. Videti je, da temperatura vpliva na magnetno silo, kar prikazuje tudi graf 4.



Graf 4: Magnetna sila F pri različnih oddaljenostih x od železne plošče v odvisnosti od temperature T

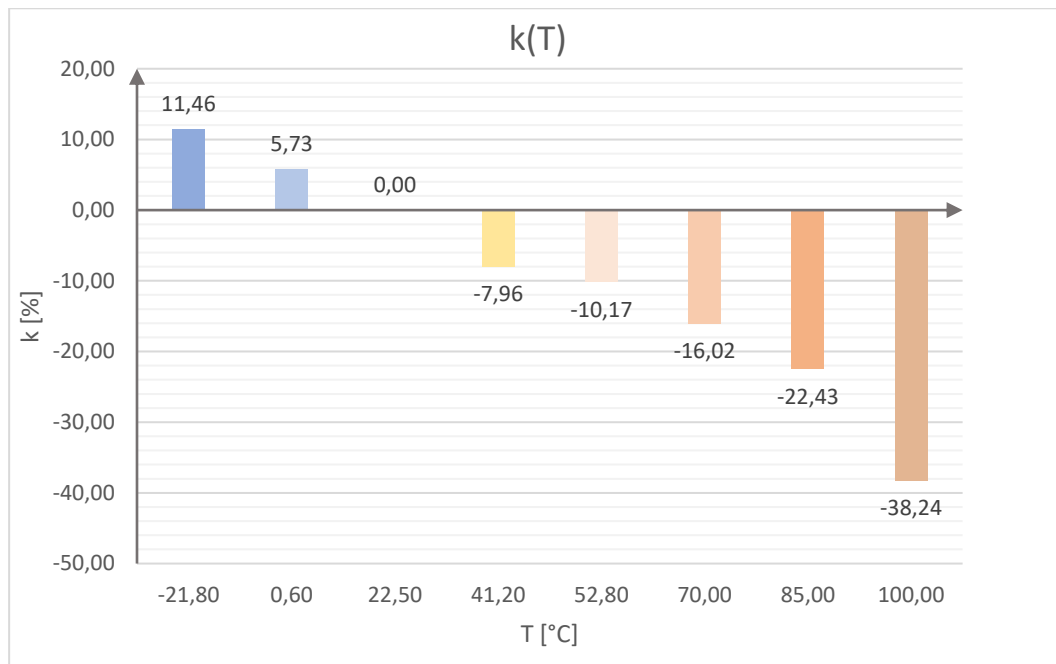
Iz grafa 4 je razvidno, da vrednosti magnetne sile padajo z naraščajočo temperaturo. Ta sprememba je vidna pri vseh razdaljah do feromagnetne snovi.

Magnetna sila in temperatura pri posameznih razdaljah nista sorazmerni skozi celoten temperaturni razpon od -21 °C do 100 °C. To lahko tudi vidimo iz pospešenega padca moči magneta pri temperaturah nad 80 °C in iz ostalih odstopanj pri nižjih temperaturah. Poleg tega tudi ne moremo govoriti o premem sorazmerju, saj se začetna točka grafa ne začne ali konča na izhodišču osi x in y : $T_z \notin x, y(0,0)$.

Zanimalo me je tudi, za kolikšen odstotek se magnetna sila pri določenih temperaturah razlikuje od sile, izmerjene pri sobni temperaturi 22,5 °C. To je prikazano v tabeli 4 in na grafu 5. Pozitivne vrednosti prikazujejo, za koliko odstotkov je sila večja, negativne pa, za koliko odstotkov je sila manjša od tiste pri sobni temperaturi.

Tabela 4: Prikaz koeficientov k (% večje/manjše sile) v primerjavi s silo na sobni temperaturi (22,5 °C), merjenih pri različnih razdaljah in različnih x temperaturah T

		k [%]							
x [mm]	T [C°]	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	7,5	9,0	\bar{k}
-21,8		7,05	9,01	11,04	13,42	12,35	8,33	19,02	11,46
0,6		3,97	3,39	4,42	6,07	7,79	5,17	9,29	5,73
22,5		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
41,2		-4,43	-3,38	-2,78	-2,84	0,35	-22,73	-19,88	-7,96
52,8		-6,60	-3,63	-4,81	-3,10	-2,46	-24,09	-26,51	-10,17
70,0		-11,03	-13,28	-9,07	-7,49	-8,10	-31,82	-31,33	-16,02
85,0		-17,93	-18,17	-17,78	-17,31	-15,85	-36,82	-33,13	-22,43
100,0		-31,03	-30,70	-32,78	-33,07	-34,51	-53,18	-52,41	-38,24



Graf 5: Povečanje sile k v odvisnosti od temperature v primerjavi s temperaturo 22,5 °C

Tudi iz teh prikazov opazimo, da je magnetna sila večja pri nižjih temperaturah (med ohlajanjem) in manjša pri segrevanju magneta. Sklepam, da razlog za to lastnost izhaja iz notranje strukture magneta.

Magnet je sestavljen iz številnih magnetnih domen, v katerih se nahajajo atomi z magnetnim poljem. Ko jih segrevamo, ti pridobivajo na kinetični energiji in začnejo hitreje vibrirati. Glede na to bi pričakovali, da bi s segrevanjem tudi elektroni v atomu pridobivali na kinetični energiji in bi tako z večjo hitrostjo povzročili močnejše magnetno polje. Vendar sem z eksperimentom

ugotovil, da to ne drži. Iz literature sem izvedel, da ima na gostoto magnetnega polja večji vpliv urejenost atomov kot pa hitrost posameznih elektronov.

Atomi s hitrejšim vibriranjem pri višjih temperaturah povzročajo večjo neurejenost magnetnih momentov znotraj momentnih domen in zato šibkejše magnetno polje.

3.1.4.2.1 Temperaturni koeficient magneta

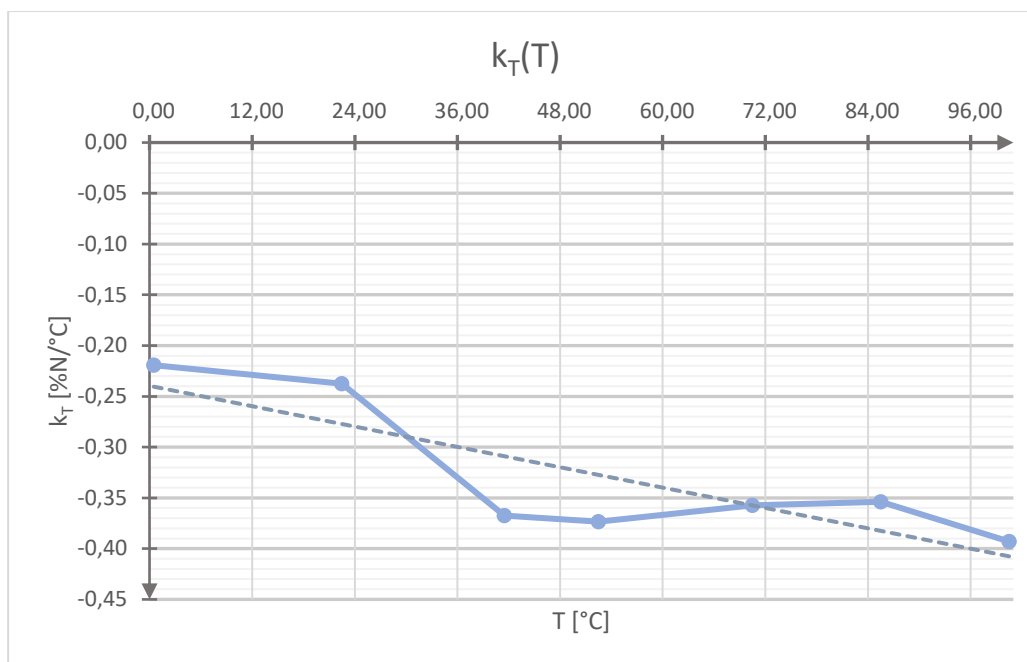
Temperaturni koeficient magneta za določeno temperaturno območje se v praksi izračuna neposredno iz gostote magnetnega polja. Ker pa sem jo izračunal iz izmerjenih magnetnih sil, se vrednosti, specificirane za magnet, razlikujejo od izračunanih pri eksperimentu.

Tabela 5 in graf 5 prikazujeta temperaturni koeficient k_T oziroma odstotek spremembe magnetne sile pri izbrani temperaturi T_x glede na izmerjeno magnetno silo pri temperaturi $T_1 = -21,8\text{ }^\circ\text{C}$. Le-tega nato delimo s temperaturno razliko med T_x in T_1 . Na ta način dobimo odstotek povečanja magnetne sile na stopinjo Celzija ($^\circ\text{C}$) v določenem temperaturnem območju. V spodnji enačbi so spremenljive količine označene z indeksom x, stalne vrednosti pa imajo za indeks številke.

$$k_T = \frac{\left(\frac{F_x}{F_1} - 1\right) \times 100}{|T_1 - |T_x||} = \left[\frac{\left(\frac{105,7N}{109,2N} - 1\right) \times 100}{|-21,8^\circ\text{C} - |0,6^\circ\text{C}||} \right]$$

Tabela 5: Temperaturni koeficient magneta k_T na različnih temperaturah T in razdaljah x

	k_T [%N / $^\circ\text{C}$]														\bar{k}_T
x [mm]	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	7,5	9,0	10,0	12,0	14,0	34,0	37,0	38,0	41,0	
T [$^\circ\text{C}$]															
0,6	-0,14	-0,26	-0,31	-0,35	-0,22	-0,15	-0,48	-0,29	0,15	-0,47	0,00	0,00	-0,56	0,00	-0,22
22,5	-0,16	-0,20	-0,25	-0,30	-0,28	-0,19	-0,43	-0,35	-0,10	-0,44	-0,09	-0,25	-0,28	0,00	-0,24
41,0	-0,18	-0,19	-0,21	-0,25	-0,19	-0,46	-0,56	-0,48	-0,31	-0,45	-0,31	-0,53	-0,60	-0,42	-0,37
52,0	-0,18	-0,17	-0,21	-0,22	-0,19	-0,41	-0,54	-0,42	-0,42	-0,58	-0,26	-0,60	-0,60	-0,45	-0,37
70,0	-0,19	-0,23	-0,21	-0,22	-0,21	-0,41	-0,48	-0,43	-0,43	-0,59	-0,15	-0,56	-0,54	-0,36	-0,36
85,0	-0,22	-0,24	-0,25	-0,27	-0,25	-0,39	-0,43	-0,40	-0,41	-0,53	-0,31	-0,48	-0,47	-0,31	-0,35
100,0	-0,29	-0,30	-0,33	-0,35	-0,35	-0,47	-0,50	-0,49	-0,47	-0,54	-0,27	-0,46	-0,41	-0,27	-0,39



Graf 6: Prikaz temperaturnega koeficienta magneta k_T v odvisnosti od temperature

Temperaturni koeficient se torej giblje v obsegu od $-0,2 \frac{\%N}{^\circ C}$ do $-0,4 \frac{\%N}{^\circ C}$. To pomeni, da je za toliko odstotkov večja sila na eno stopinjo ($^\circ C$). Iz grafa 6 je razvidno, da se temperaturni koeficient magneta zmanjšuje s temperaturo, kar pomeni, da padanje magnetne sile s poviševanjem temperature ni linearno. Če bi bil temperaturni koeficient konstanten, bi se z naraščanjem temperature magnetna sila zmanjševala enakomerno.

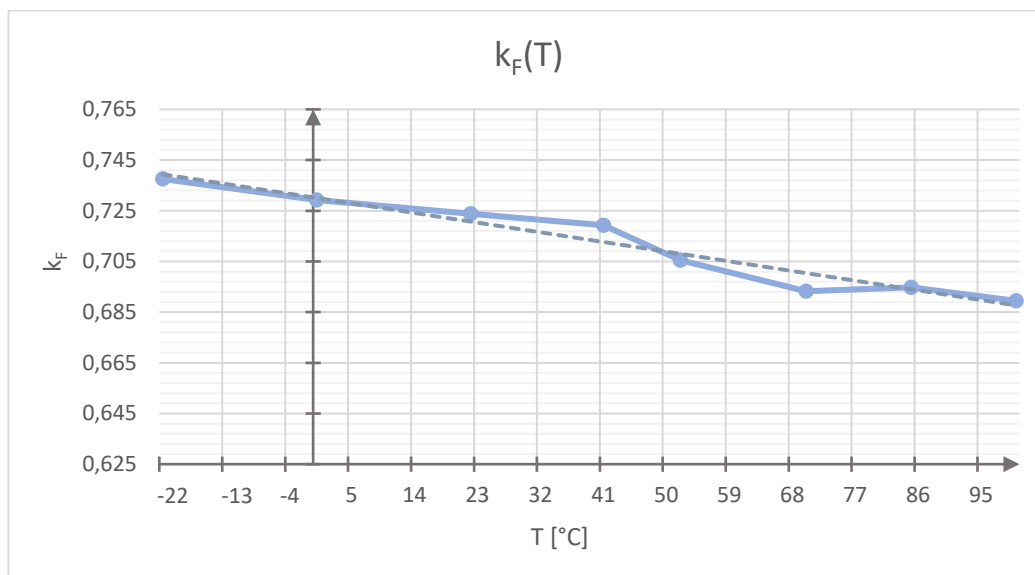
Podobno spremembo lahko vidimo tudi na grafu 3. Ko magnet ohladimo za približno $20 \text{ }^\circ C$, se magnetna sila poveča za 6 %, pri segrevanju za enako temperaturno spremembo pa se zmanjša za 8 %.

Nelinearno zmanjševanje magnetne sile s temperaturo pripisujem temu, da se hitrost vibracije atomov, ki vpliva na magnetno polje, spreminja s korenem kinetične energije atomov W_{k_a} in posledično s korenem notranje energije W_n , ki pa je odvisna od temperature T . To lahko opišemo z naslednjimi enačbami:

$$v_a = \sqrt{\frac{W_{k_a} \times 2}{m}}; \quad W_{k_a} \propto W_n; \quad v_a \propto \sqrt{W_n} \propto \sqrt{T}$$

3.1.4.3 Odvisnost magnetne sile od temperature in razdalje

V spodnjem grafu sem prikazal povprečni koeficient magnetne sile k_F v odvisnosti od temperature. Podatki so povzeti iz tabele 3.



Graf 7: Povprečni koeficient sile k_F v odvisnosti od temperature T

Koeficient sile k_F se zmanjšuje z višanjem temperature, kar je razvidno tudi iz podatkov v tabeli 3. Z višanjem temperature se zmanjšuje razlika med koeficienti sile in koeficienti razdalje.

Iz zgornjega grafa lahko sklepamo, da se velikost magnetne sile ne spreminja enakomerno na vseh razdaljah, ko magnetu spremenimo notranjo energijo. Na podlagi enačbe koeficienta magnetne sile in podatkov iz zgornjega grafa ugotavljam, da se na večji razdalji magnetna sila z nižanjem temperature poveča za večji delež (Δ).

S segrevanjem magneta se zmanjšuje jakost njegovega magnetnega polja. Posledično se zmanjša magnetni navor, kar pomeni, da se z zunanjim poljem poravna v železni plošči manj magnetnih momentov. Zaradi tega material inducira šibkejša magnetna polja kot pred segrevanjem.

Če predpostavimo, da je magnetna permeabilnost železne plošče stalna, bo inducirano magnetno polje plošče linearno sorazmerno z zunanjim magnetnim poljem magneta.

Enako velja tudi za magnetni navor magnetnih momentov:

$$\mu_r = 1 + \frac{B_{in}}{B_0}$$

Na podlagi tega bi pričakovali, da bo ne glede na gostoto zunanjega polja, ki jo lahko spreminjamo s segrevanjem magneta, magnetna sila večja za enak delež na vseh razdaljah. Vendar izmerjeni podatki tega ne potrjujejo. Možna razlaga tega odstopanja bi lahko bila, da se magnetna permeabilnost železne plošče spreminja z gostoto magnetnega polja B_0 , ki se jo spreminja s segrevanjem.

Iz tega sklepam, da število poravnanih magnetnih momentov, ki prispevajo k večji magnetni sili, ni linearno odvisno od gostote zunanjega polja. Prav tako tudi magnetni navor ni v linearnem razmerju z gostoto zunanjega polja.

3.1.5 Veljavnost hipotez

Hipotezo 1, da sta si magnetna sila in razdalja obratno sorazmerni tudi pri različnih temperaturah, lahko **zavrnem**, saj sem dokazal, da je magnetna sila odvisna od kvadrata razdalje. Razloge za manjša odstopanja, ki so se pojavila, sem pripisal možnosti, da železo ne inducira celotnega magnetnega polja, ki ga povzroča magnet.

Prav tako sem opazil, da se s temperaturo spremeni razmerje magnetne sile in razdalje. To spremembo pripisujem možnemu nelinearnemu spreminjanju magnetnega navora z zunanjo gostoto magnetnega polja.

Hipoteza 2, da temperatura vpliva na gostoto magnetnega polja magneta, **je pravilna**, saj se magnetna sila spreminja s temperaturo, kar pomeni, da se tudi gostota magnetnega polja spreminja s temperaturo.

Hipotezo 3, da gostota magnetnega polja magneta narašča z višanjem temperature ter da sta gostota magnetnega polja in temperatura premo sorazmerni, lahko **zavrnem**, kajti meritve so pokazale, da se gostota magnetnega polja zmanjšuje z višanjem temperature, saj je bila izmerjena magnetna sila pri nižjih temperaturah večja kot pri višjih. Razmerje med količinami ni premo sorazmerno in prav tako ni linearno, saj se je na nekaterih temperaturnih območjih magnetna sila zmanjšala izraziteje kot na drugih.

3.2 2. Poskus: Vpliv temperature na elektromagnet

Pri drugem eksperimentu sem raziskoval vpliv temperature na elektromagnet med spreminjanjem premera žice in notranjega jedra. Elektromagnete sem segreval v območju od -20 °C do 100 °C ter opazoval spremembe magnetne sile.

3.2.1 Raziskovalna vprašanja in hipoteze

Raziskovalno vprašanje: Ali sprememba temperature vpliva na gostoto magnetnega polja elektromagneta?

Hipoteza 1: Predvidevam, da temperatura vpliva na gostoto magnetnega polja elektromagneta. Z njo spreminjamo notranjo energijo elektromagneta, kar vpliva na upornost žice in posledično na jakost toka. Prav tako vpliva na permeabilnost jedra elektromagneta.

Raziskovalno vprašanje: Ali sprememba temperature različno vpliva na gostoto magnetnega polja elektromagnetov z različnimi premeri žice in različnimi jedri (polno jedro, votlo jedro)?

Hipoteza 2: Predvidevam, da temperatura ne vpliva na gostoto magnetnega polja elektromagneta z različnimi premeri žic, vpliva pa na gostoto magnetnega polja elektromagneta z različnimi jedri.

S spreminjanjem temperature se bo v različnih jedrih poravnalo različno število domen, kar bo vplivalo, da se bosta tuljavi drugače odzvali na spreminjanje notranje energije.

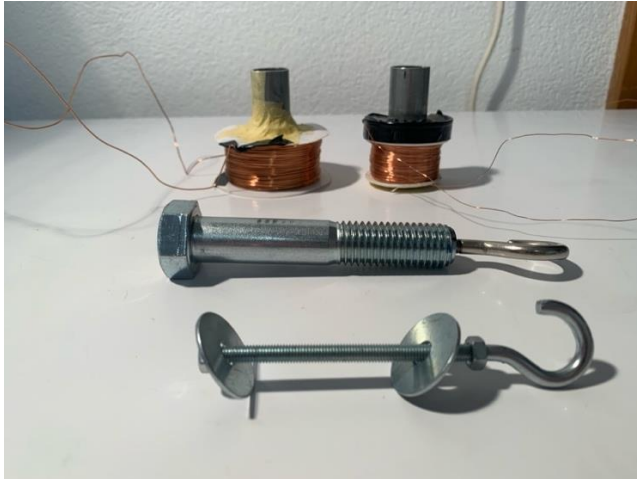
Prečni premer žice ne bo vplival na moč magnetov pri spreminjanju temperature, saj je vpliv temperature pri obeh premerih žic enak.

3.2.2 Opis eksperimenta in pripomočkov

Pri tem eksperimentu sem uporabljal dva elektromagneta in že opisano leseno konstrukcijo z železno ploščo, kjer sem meril magnetno silo.

Elektromagneta sem izdelal iz kovinskega votlega valja, okoli katerega sem navil bakreno žico, lakirano s poliuretanskim zaščitnim lakom. Tanjša izolacija tako omogoča več navojev na sredico elektromagneta. Uporabil sem žici premera 0,3 mm in 0,6 mm. Obe sta imeli enako dolžino (100 m) in bili naviti na kovinska valja z enakim številom navojev. Da bi preprečil

premikanje navitja, sem na konec kovinskega valja pritrdil plastični pokrovček. Ker je bil valj votel, sem lahko vanj po potrebi vstavil polno jedro s kovinskim nastavkom ali pa nanj samo pritrdil nastavek, s katerim sem tuljavo povezal z digitalno tehtnico (slika 13, 14).



Slika 13: Votlo (spredaj) in polno (zadaj) jedro skupaj z navitjem



Slika 14: Primer elektromagneta- votlo jedro

Za vir napetosti sem uporabil električni usmernik, s katerim sem z enosmernim tokom napajal elektromagneta.

Za zagotavljanje konstantne razdalje sem si pomagal z ravnilom. Za zaščito pred visoko in nizko temperaturo sem uporabljal rokavice. Elektromagneta sem ohlajal v zamrzovalniku in segreval v pečici, nato pa temperaturo magneta izmeril z laserskim termometrom.



Slika 15: Merjenje magnetne sile elektromagneta na napetostnem viru

3.2.3 Opis postopkov

V tem poskusu nisem spreminjal razdalje med elektromagnetoma in železno ploščo, temveč sem prilagajal napetost elektromagneta pri enosmernem toku: 25 V, 20 V, 15 V, 10 V, 5 V. Po končanem segrevanju ali ohlajanju sem elektromagnet obesil na digitalno tehtnico, kjer sem nato odčital magnetno silo [N] pri različnih napetostih. Da bi zagotovil meritev izključno magnetne sile, sem tehtnico pred meritvijo tariral.

3.2.4 Rezultati in razprava

Med eksperimentiranjem sem opazil, da se je magnetna sila s časom merjenja na določeni napetosti zmanjševala, hkrati pa se je elektromagnet segreval. Zaradi tega sem pri analizi podatkov večinoma upošteval le meritve pri napetosti 25 V, saj se tuljava takrat še ni segrela in je imela začetno izmerjeno temperaturo. Rezultati meritev so prikazani v spodnjih tabelah.

Tabela 6: Magnetna sila F v odvisnosti od temperature T in napetosti U pri elektromagnetu z votlim jedrom, s premerom žice 0,3 mm in razdaljo do plošče 1 mm

		F [N]			
		25	20	15	10
U [V]	T [°C]				
-25,0		14,3	10,6	6,6	3,1
0,0		13,1	9,4	5,7	2,8
22,0		12,2	8,9	5,4	2,4
52,0		11,5	7,2	3,9	1,4
75,0		9,3	6,5	3,3	1,2
100,0		8,1	5,6	3,2	/

Tabela 7: Magnetna sila F v odvisnosti od temperature T in napetosti U pri elektromagnetu z votlim jedrom, s premerom žice 0,6 mm in razdaljo do plošče 1 mm

		F [N]				
		25	20	15	10	5
U [V]	T [°C]					
-25,0		36,0	32,5	25,7	17,5	6,9
0,0		35,5	30,7	24,4	15,8	5,4
22,0		32,3	28,5	22,5	14,4	5,3
51,0		31,9	26,7	20,6	12,4	3,7
75,0		27,9	25,7	18,3	10,9	3,5
100,0		26,4	23,8	17,3	9,3	3,1

Tabela 8: Magnetna sila F v odvisnosti od temperature T in napetosti U pri elektromagnetu s polnim jedrom, s premerom žice 0,3 mm in razdaljo do plošče 1,4 mm

		F [N]			
		25	20	15	10
U [V]	T [°C]				
-18,8		27,3	18,4	10,2	4,8
0,2		26,3	17,6	10,0	4,5
22,0		24,2	16,3	9,8	4,7
55,2		19,9	14,5	8,9	4,3
75,0		17,5	12,9	7,7	3,5

Tabela 9: Magnetna sila F v odvisnosti od temperature T in napetosti U pri elektromagnetu s polnim jedrom, s premerom žice 0,6 mm in razdaljo do plošče 1,9 mm

		F [N]				
		25	20	15	10	5
U [V]	T [°C]					
-20,0		200,2	165,7	122,4	60,3	14,3
0,0		180,2	155,3	102,3	48,0	11,9
22,5		172,0	142,0	85,3	36,5	9,1
58,8		167,9	130,9	78,9	35,1	8,8
75,0		162,9	125,0	74,9	32,3	8,8

Analiza podatkov iz zgornjih tabel kaže, da se magnetna sila med elektromagnetom in železno ploščo pri vseh napetostih zmanjšuje z višanjem temperature. Iz tega lahko sklepamo, da se z naraščanjem temperature zmanjšuje tudi gostota magnetnega polja.

3.2.4.1 Magnetna sila pri votlem jedru elektromagneta

V tem poglavju sem se osredotočil izključno na analizo podatkov pri votlem jedru tuljave. Pri meritvah z vstavljenim ali polnim feromagnetnim jedrom se namreč pojavi vpliv povečane magnetne permeabilnosti, katere učinke bom analiziral kasneje.

Razlike v temperaturnih meritvah pri različnih meritvah sile sem zanemaril, saj so te zelo majhne (tabele 6, 7, 8, 9). Lahko so tudi posledica merilne napake laserskega termometra. Ta zaradi odboja žarka lahko zajame tudi temperaturo okolice.

3.2.4.1.1 Povezava med magnetno silo in tokom

V zgornjih tabelah je možno opaziti, da se magnetna sila povečuje s premerom žice, kar pomeni, da premer vodnika vpliva na električni tok. Tako je zato, ker se lahko skozi večji presek vodnika v določenem času pretoči več elektronov. Električni tok I je torej odvisen od površine prereza vodnika, kjer je r_v polmer vodnika. Ker je magnetna sila sorazmerna električnemu toku, velja:

$$F_m \propto I \propto \pi r_v^2$$

To lahko preverimo s primerjavo magnetnih sil $F_{0,6}$ in $F_{0,3}$ pri tuljavah z žicama premerov 0,6 mm in 0,3 mm, pri čemer sta bili meritvi izvedeni pri enaki temperaturi in napetosti. Ker je premer ene žice dvakrat večji, je površina prereza 4-krat večja. Zato bi pričakovali, da bosta tudi električni tok in magnetna sila pri žici z večjim premerom 4-krat večja.

Koeficient večje sile k_F lahko izrazimo kot razmerje med silama pri različnih premerih žic:

$$k_F = \frac{F_{0,6}}{F_{0,3}}$$

V tabeli 10, v kateri je prikazan omenjeni koeficient k_F , je možno opaziti, da je magnetna sila pri vodniku s premerom 0,6 mm približno 2,5- 3,26-krat večja kot pri vodniku s premerom 0,3 mm. Glede na povečanje površine prereza pa bi pričakovali 4-kratno povečanje magnetne sile, vendar meritve tega ne potrjujejo. To pomeni, da poleg premera žice nanjo vplivajo še drugi dejavniki.

Na magnetno silo pri elektromagnetu vplivajo električni tok, hitrost elektronov, površina prereza vodnika in magnetna permeabilnost kovinskega valja. Če magnetna permeabilnost ostaja nespremenjena, pomembno vlogo igra hitrost elektronov. Iz prebrane strokovne literature je razvidno, da se hitrost elektronov res spreminja s premerom žice in je večja ob tanjši žici.

Ker magnetna sila pri vodniku z 2-krat večjim premerom ni 4-krat večja, lahko sklepamo, da nanj poleg povečane površine prereza vplivajo tudi različne hitrosti elektronov. Delež vpliva večje hitrosti elektronov v tanjši žici lahko izračunamo kot količnik med pričakovanim večjim deležem magnetne sile k_r in izmerjeno magnetno silo k_F . Tako lahko sklepamo, ker sta magnetna sila in električni tok premo sorazmerna s hitrostjo nabitega delca in z velikostjo naboja v vodniku.

Ker ima žica 4-krat večjo površino prereza, bi pričakovali tudi 4-krat večji tok. Vendar se zaradi drugačne hitrosti elektronov d_v tok pri premeru žice 0,6 mm za določen delež zmanjša v primerjavi z žico 0,3 mm. Ta delež je enak razmerju med koeficientom večje prečne ploščine k_r (4-krat) in koeficientom večje sile k_F (2,6-krat).

$$d_v = \frac{k_r}{k_F} = \frac{\frac{S_{r_{0,6}}}{F_{0,6}}}{\frac{S_{r_{0,3}}}{F_{0,3}}} = \frac{\frac{r_{0,6}^2}{r_{0,3}^2}}{\frac{F_{0,6}}{F_{0,3}}} = \left[\frac{(0,6\text{mm})^2}{(0,3\text{mm})^2} \cdot \frac{12,2\text{N}}{32,3\text{N}} \right] = \frac{4}{2,6} = 1,51$$

Tabela 10: Odvisnost koeficientov k_F in deležov večje hitrost d_v , od napetosti U in temperature T

	k_F	d_v
U [V]	25	25
T [°C]		
-25,0	2,52	1,59
1,0	2,71	1,48
22,0	2,65	1,51
52,0	2,77	1,44
75,0	3,00	1,33
100,0	3,26	1,23

Za sobno temperaturo, pri kateri so bili izmerjeni podatki iz prejšnje enačbe, lahko povzamemo naslednjo enačbo:

$$v_{0,3} = v_{0,6} \times \frac{k_r}{k_F} = v_{0,6} \times 1,51$$

Enačba velja, če zanemarimo morebitno večanje števila poravnanih magnetnih momentov pri večjem polju, zato je prav hitrost v tanjši žici mogoče nekoliko večja.

Iz tabele 10 je razvidno, da se koeficient k_F povečuje s temperaturo. To pomeni, da se vodniki z različnimi premeri različno odzivajo na temperaturne spremembe.

Iz tega lahko sklepamo, da je delež večje hitrost d_v večji ob višji temperaturi, kar pomeni, da se hitrost elektronov v tanjši žici s segrevanjem manjša (tabela 10).

3.2.4.1.2 Odvisnost magnetne sile od temperature pri različnih premerih žice

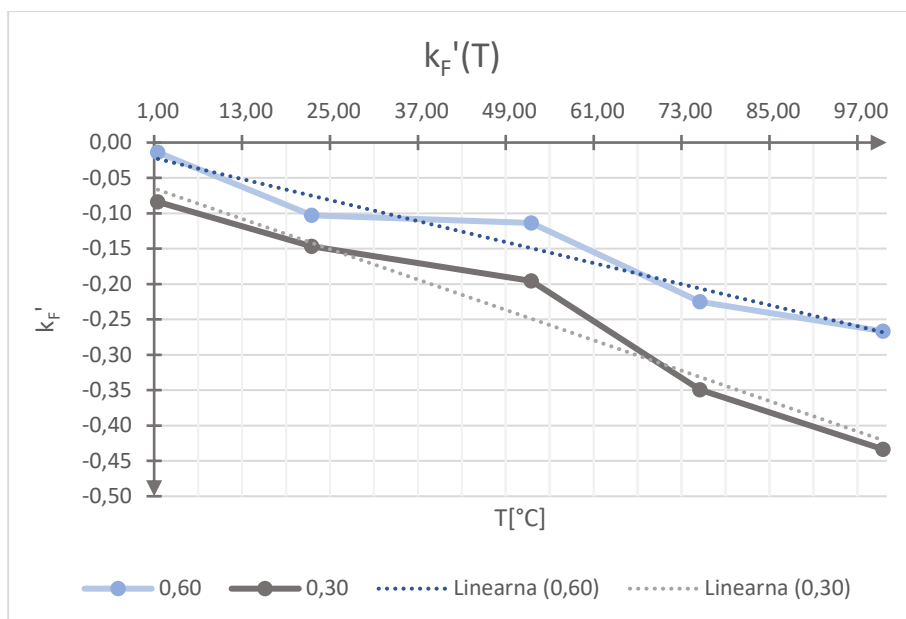
V grafu 8 in tabeli 11 je prikazan koeficient k_F' . Izračunal sem ga iz količnika med magnetno silo, merjeno na izbrani temperaturi F_x , in magnetno sile pri temperaturi -22 °C F_1 .

$$k_F' = \frac{F_x}{F_1} - 1$$

V tabeli 11 so prikazane vrednosti koeficienta k_F' v odvisnosti od premera žice in temperature pri prostem jedru elektromagneta, poleg tega pa tudi razmerje $d_{k_F'}$, ki pove, kolikokrat bolj temperatura vpliva na vodnik s premerom 0,3 mm kot na vodnik s premerom 0,6 mm.

Tabela 11: Koeficienti magnetne sile k_F' v odvisnosti od temperature T in premera žice d pri prostem jedru elektromagneta

		k_F'		$d_{k_F'} = \frac{k_{0,3}}{k_{0,6}}$
	d [mm]	0,3	0,6	
T [°C]	0,0	-0,08	-0,01	6,04
22,0	-0,15	-0,10	1,43	
52,0	-0,20	-0,11	1,72	
75,0	-0,35	-0,23	1,55	
100,0	-0,43	-0,27	1,63	



Graf 8: Odvisnost koeficienta magnetne sile k_F' od temperature T pri votlem jedru elektromagneta

Iz zgornjega grafa je razvidno, da se koeficient sile k_F' s temperaturo zmanjšuje skoraj linearno, kar pomeni, da se zmanjšuje tudi magnetna sila. Na osi x so prikazane vrednosti temperature, pri katerih so bile izvedene meritve.

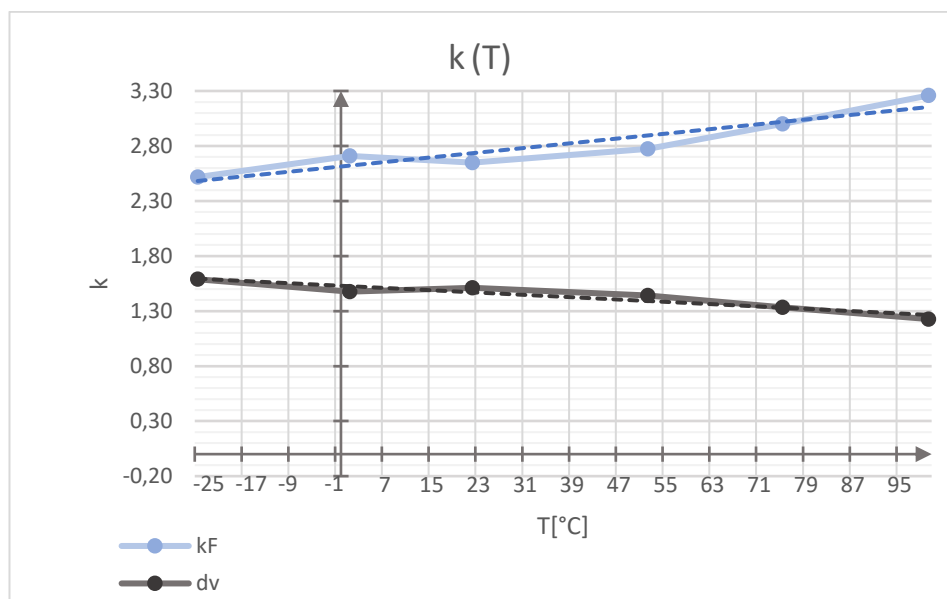
V literaturi sem zasledil, da atomi pri višjih temperaturah močneje vibrirajo, kar poveča električni upor. Zaradi pogostejših trkov med elektroni in atomi elektroni izgubijo del svoje hitrosti in energije, kar zmanjša električni tok in posledično magnetno silo.

Izmerjeni podatki kažejo, da temperatura močneje vpliva na magnetno silo v tanjših žicah. Delež večjega vpliva temperature na magnetno silo pri tanjši žici $d_{k_F'}$ je v povprečju od 1,4–1,6-krat večji kot pri debelejši žici. Sklepam, da toplota bolj vpliva na tanjši vodnik zaradi večje hitrosti elektronov, saj le-ti pri trkih prenesejo na atome več energije, kar povzroči njihovo intenzivnejše nihanje.

Močnejše vibracije atomov v tanjših žicah hitreje povečajo upor, kar dodatno upočasni elektrone in poveča vpliv temperature. Nasprotno pa se v debelejših žicah zaradi manjše hitrosti elektronov na atome prenese manj energije, zato se električni upor povečuje počasneje.

Podatki iz tabele 10 in grafa 9 potrjujejo zgoraj navedeno razmišljanje. Ker koeficient k_F' s temperaturo narašča, se v tanjši žici hitrost elektronov v primerjavi z njihovo hitrostjo pri sobni

temperaturi s segrevanjem zmanjšuje (gl. k_F). To je skladno s predpostavko, da se hitrost elektronov z višanjem temperature zaradi naraščajočega upora zmanjšuje.



Graf 9: Odvisnosti koeficienta k_F in deleža večje hitrosti d_v od temperature T

Omenjeno predvidevanje trkov elektronov in atomov je bil razlog, da se je elektromagnet med poskusom segreval, kar je povzročilo padec magnetne sile. Povečalo se je število trkov, pri katerih se je del energije pretvoril v toploto.

3.2.4.2 Magnetna sila pri polnem jedru elektromagneta

3.2.4.2.1 Odvisnost magnetne sile od jedra elektromagneta

S koeficientom k_F , ki opisuje razmerje magnetne sile pri različnih premerih vodnika, lahko določimo, za koliko je večja magnetna sila pri vodniku s premerom 0,6 mm v primerjavi z vodnikom s premerom 0,3 mm. Nato pa lahko primerjamo koeficienta s prostim jedrom k_{F_1} in vstavljenim jedrom k_{F_2} .

Razlika med votlim in polnim jedrom je v njuni prostornini in številu poravnanih magnetnih domen. Za izračun prostornine sem najprej izmeril potrebne podatke, nato pa za votlo jedro V_v izračunal prostornino polnega oziroma vstavljenega valja V_p , od katerega sem odštel del valja, ki je bil votel.

Tabela 12: Podatki o merah jedra

	l [mm]
d_z	21
d_n	18,8
h	66

Tabela 13: Izračunana prostornina jedra

	V [mm³]
V_v	4538,78
V_p	22859,80
$k_v = \frac{V_p}{V_v}$	5,037

Iz tabele 13 je razvidno, da je prostornina vstavljenega prostega jedra 5-krat tolikšna kot pri votlem jedru.

Za določitev koeficienta večje sile pri večjem premeru 0,6 mm sem uporabil enako enačbo kot pri podpoglavju 3.2.4.1.1 *Povezava med magnetno silo in tokom*. To sem nato uporabil za izračuna koeficientov pri votlem jedru k_{F_v} in polnem jedru k_{F_p} . Ker meritve, prikazane v tabelah 8 in 9, niso bile opravljene na enakih razdaljah, jih ne moremo primerjati. Koeficient k_{F_p} sem tako pridobil iz izračunanih podatkov, ki predpostavljajo, da je magnetna sila obratno sorazmerna z razdaljo. To razmerje sem prikazal z grafom pri prejšnjem eksperimentu. Tako sem dobil predpostavljeno magnetno silo na razdalji 1 mm. Tabela 14 poleg tega prikazuje koeficienta k_{F_p} , k_{F_v} skupaj s količnikom obeh koeficientov k_{F_j} pri napetosti 25 V in različnih temperaturah.

Tabela 14: Magnetna sila F pri različnih premerih in jedrih skupaj s koeficientoma k_{F_p} , k_{F_v} in količnikom k_{F_j}

T [°C]	$\sim F_{p0,6}$	$\sim F_{p0,3}$	k_{F_p}	$k_{F_v} = k_F$	$k_{F_j} = \frac{k_{F_p}}{k_{F_v}}$
-25,0	722,72	53,51	13,51	2,52	5,37
1,0	650,52	51,55	12,62	2,71	4,66
22,0	620,92	47,43	13,09	2,65	4,94
52,0	606,12	39,00	15,54	2,77	5,60
75,0	588,07	34,30	17,14	3,00	5,71

Količnik obeh koeficientov se giblje 4,6–5,7, kar pomeni, da je magnetna sila pri širšem vodniku s polnim jedrom v povprečju za 5,3-krat večja kot pri votlem jedru tuljave.

Koeficient magnetne sile k_F prikazuje, kako se pri večjem premeru povečuje magnetna sila vodnika. Podatki iz Tabele 14 kažejo, da je ta delež vedno večji pri polnem jedru, kar nakazuje,

da poleg močnejšega magnetnega polja pri večjem premeru vodnika na magnetno silo vpliva dodaten dejavnik.

Učinek tega dejavnika je pri polnem jedru približno 5-krat močnejši kot pri votlem. Možen razlog za večjo magnetno silo je, da se pri polnem jedru z večjo prostornino lahko poravna več domen.

Za preverjanje tega predvidevanja lahko analiziramo vpliv večje prostornine polnega jedra, ki ga določa k_V . Če je povečanje prostornine enako povečanju učinka koeficienta magnetne sile pri polnem jedru, lahko predvidevanje potrdimo. Tabela 15 prikazuje razliko koeficienta k_{F_j} in količnika k_V .

Tabela 15: Razlika med koeficientoma k_{F_j} in k_V pri različnih temperaturah T

T [°C]	$k_{F_j} - k_V$
-25,0	0,33
0,2	-0,38
22,0	-0,09
55,2	0,57
75,0	0,68

Razlika koeficientov k_{F_j} in k_V je zelo majhna, kar pomeni, da se z večjo prostornino jedra poravna več magnetnih domen. Kljub temu so prisotna manjša odstopanja, ki jih lahko pripišem različnim oblikama polnega in votlega jedra (slika 14). Možni razlogi odstopanja so tudi pri izračunu magnetne sile na razdalji 1 mm, saj magnetna sila ni povsem obratno sorazmerna s kvadratom razdalje.

Če zanemarimo omenjena odstopanja, sledi, da se z večjo prostornino V poravna večje število magnetnih domen n_d , kar povzroči večjo magnetno silo F_m .

$$V \propto n_d, \quad V \propto F_m$$

3.2.4.2.2 Odvisnost magnetne sile od temperature pri različnih jedrih

Iz tabele 15 je razvidno, da se razlika koeficientov k_{F_j} in k_V povečuje s temperaturo. Ker hitrost elektronov v vodniku ni neposredno povezana z obliko jedra tuljave, mora temperatura vplivati tudi na magnetne lastnosti feromagnetnega materiala. To pomeni, da toplota drugače vpliva na polno jedro kot na votlo. Za lažjo analizo podatkov je v tabeli 16 prikazan koeficient večje sile $k_{F'}$ skupaj z deležem večjega temperaturnega vpliva na vodnik s premerom 0,3 mm kot na vodnik s premerom 0,6 mm $d_{k_{F'}}$. Ta delež je prikazan tako za votlo kot za polno jedro.

Tabela 16: Koeficienti večje sile $k_{F'}$ pri polnem jedru magneta za različne premere d pri različnih temperaturah T in delež večjega učinka magnetne sile $d_{k_{F'}}$ pri polnem in votlem jedru

d [mm] T [°C]	$k_{F'}$ - polno jedro		$d_{k_{F'}} = \frac{k_{0,3}}{k_{0,6}}$	
	0,3	0,6	votlo jedro	polno jedro
1,0	-0,04	-0,10	6,04	0,37
22,0	-0,11	-0,14	1,43	0,81
52,0	-0,27	-0,16	1,72	1,68
75,0	-0,36	-0,19	1,55	1,93

Iz tabele 16 je razvidno, da se delež temperaturnega vpliva pri polnem jedru povečuje s temperaturo. To pomeni, da se z naraščanjem temperature povečuje tudi delež vpliva temperature pri vodniku s premerom 0,3 mm, medtem ko se pri votlem jedru ta delež spreminja drugače.

Ker se pri vodniku premera 0,3 mm gostota zunanega polja z višanjem temperature zmanjšuje hitreje kot pri vodniku premera 0,6 mm, lahko sklepamo, da je vpliv temperature na inducirano magnetno polje jedra odvisen od zunanega magnetnega polja. Če bo gostota zunanega polja manjša pri vodniku premera 0,3 mm kot pri vodniku premera 0,6 mm, bo s tem za večji delež manjši tudi magnetni navor pred segrevanjem pri vodniku s premerom 0,3 mm. To pomeni, da manjše zunanje magnetno polje poveča vpliv temperature na inducirano magnetno polje.

Vseeno ta razlaga še ne pojasni večanja deleža, saj bi moral glede na opisano ostati enak. Menim, da bi bilo lahko povečanje deleža posledica nelinearnega magnetnega navora, vendar to presega okvir te raziskovalne naloge in ostaja odprto za nadaljnje raziskave.

3.2.5 Veljavnost hipotez

Hipotezo 1, da temperatura vpliva na gostoto magnetnega polja elektromagneta, lahko **potrdim**, saj se je elektromagnetu s temperaturo spreminjala magnetna sila, s tem pa tudi gostota magnetnega polja. Ko sem tuljavam povišal temperaturo, se je magnetna sila zmanjšala. To trditev sem preveril na 4 elektromagnetih in pri vseh je bil učinek enak, vendar z različno spremembo magnetne sile pri enaki temperaturni razliki.

Hipoteza 2, da temperatura ne vpliva na gostoto magnetnega polja elektromagneta z različnimi premeri žice, vpliva pa na gostoto magnetnega polja elektromagneta z različnimi jedri, je **delno pravilna**.

Eksperiment je pokazal, da temperatura različno vpliva na gostoto magnetnega polja elektromagnetov tako pri različnih jedrih kot pri različnih premerih žice. Trditev, da temperatura različno vpliva na različna jedra, sem preveril z analizo deleža večje magnetne sile pri spreminjanju temperature. Ugotovil sem, da se pri polnem jedru delež večjega vpliva temperature med vodnikoma povečuje, medtem ko je pri votlem jedru konstanten.

Izkazalo se je tudi, da temperatura različno vpliva na magnetno silo vodnikov z različnima premeroma. Pri vodniku z manjšim premerom temperatura bolj vpliva na magnetno silo, saj pri njem elektroni zaradi večjega števila trkov z atomi izgubijo več energije.

4 Zaključek

Z raziskovalno nalogo Vpliv temperature na magnetizem sem želel raziskati, ali in kako temperatura vpliva na magnetne pojave in magnetizem na splošno. Preučil sem, koliko se spreminja moč neodimskega magneta in elektromagneta pri različnih temperaturah ter kako na njune lastnosti vplivajo drugi dejavniki.

Rezultati eksperimentov so pokazali, da se magnetna sila neodimskega magneta in elektromagneta s segrevanjem zmanjšuje. Zanimivo mi je bilo spoznanje, da s segrevanjem obema magnetoma spreminjam notranjo zgradbo in da imata oba podoben temperaturni koeficient, kar sem ugotovil šele naknadno. Menim, da se to zgodi, ker se pri obeh magnetih delci s povečano notranjo energijo začnejo enako hitreje gibati.

Z izvedbo obeh eksperimentov sem pridobil dober vpogled v vpliv temperature na magnet in elektromagnet, vendar magnetizem vključuje še številne druge pojave. Sprva sem nameraval raziskovanje usmeriti v elektromagnetno indukcijo, a sem se kasneje odločil za bolj poglobljeno analizo le dveh magnetnih pojavov. V prihodnje bi lahko raziskovanje še razširil in izvedel dodatne eksperimente, ki bi še natančneje potrdili in dopolnili moje ugotovitve.

Izdelava raziskovalne naloge me je zelo veselila, hkrati pa sem pridobil veliko uporabnega znanja. Veselim se nadaljnjega raziskovanja na tem področju.

5 Viri in literatura

- Mansfield, M., & O'Sullivan, C. (2011). *Understanding Physics*.
- Pople, S. (1998). *FIZIKA SHEMATSKI PREGLEDI*. Tehniška založba Slovenije.
- Valenčič, V. (1993). *Osnove elektrotehnike II. Magnetostatika, magnetno polje v svnoeh ter inducirano električno polje*. Fakulteta za elektrotehnika in računalništvo.
- Mohorič, d. A., & Babič, m. V. (2014). *FIZIKA 3 Učbenik za fiziko v 3. letniku gimnazij in štiriletnih strokonih šol*.
- Shenoy, M. (2021). *Youtube: Paramagnetism & Diamagnetism / Magnetism & matter / Physics / Khan Academy*. Pridobljeno iz https://www.youtube.com/watch?v=wK7Jr1g4_ws
- Reich, H. (2013). *Youtube: MAGNETS: How Do They Work?* Pridobljeno iz <https://www.youtube.com/watch?v=hFAOXdXZ5TM>
- Shenoy, M. (2021). *Youtube: Magnetic susceptibility & permeability / Magnetism & matter / Physics / Khan Academy*. Pridobljeno iz Youtube: https://www.youtube.com/watch?v=_9RcHLSmmjo&t=307s
- Voademy. (2023). Pridobljeno iz <https://www.youtube.com/watch?v=Z31jsD63nsA&t=2383s>
- Pridobljeno 27. October 2024 iz Wikipedia Magnetism: <https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetism>