

Meno a priezvisko:

Škola:

Predmet:

Školský rok/blok:

Skupina:

Trieda:

Dátum:

Škola pre mimoriadne nadané deti a Gymnázium

Fyzika

/

Teória

Magnetické pole

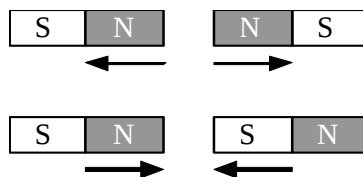
Stacionárne magnetické pole

1.1 Základné magnetické javy

Prejavy magnetického poľa, v ktorom žijeme, si ľudstvo uvedomuje od pradávna. Ľudia veľmi skoro zistili, že úlomky niektorých nerastov – prirodzených magnetov – sa vždy rovnako orientujú v priestore a využívali tento jav, aby našli správnu cestu na púšti alebo na mori. Čoskoro zistili, že **železné predmety sa dajú zmagnetizovať – v styku s prirodzenými magnetmi sa stávajú magnetickými dipólmi – stálymi magnetmi**. Jedným z prevratných vynálezov bola magnetka – voľne otáčavý ľahký magnet a jeho vylepšená podoba – kompas.

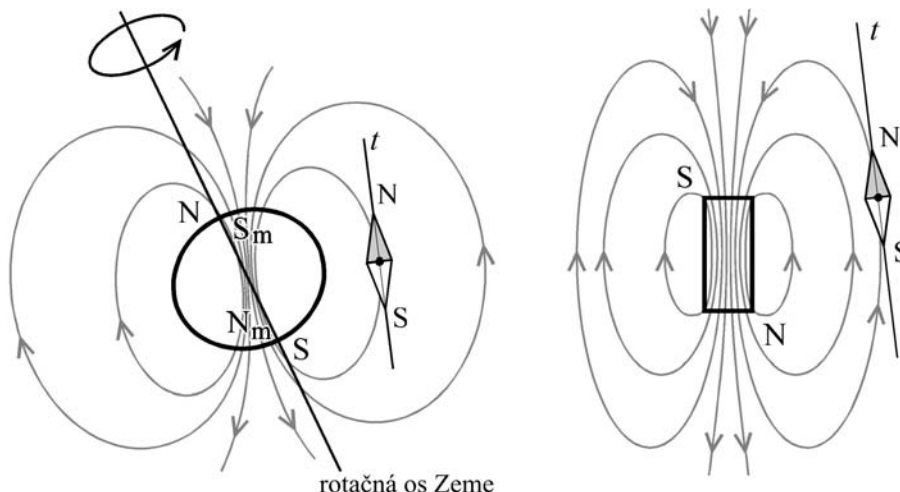
Starovekí Gréci poznali, že existujú nerasty schopné priťahovať drobné železné predmety. Pretože nerasty sa ťažili pri meste Magnézia, dostali názov **magnety**.

Kúsky rudy, ktoré sú schopné priťahovať železné predmety, sa nazývajú permanentné **magnety**. Silové účinky permanentného magnetu sa najviac prejavujú na dvoch miestach, ktoré sa nazývajú **póly magnetu**. Medzi nimi je neutrálne pásmo.



Tyčový magnet otáčavý okolo osi sa nazýva **magnetka**. V blízkosti Zeme magnetka zaujíma severojužný smer. V blízkosti magnetu v tvare gule sa magnetka správa ako v blízkosti Zeme. Zem sa správa ako magnet.

Pól magnetky, ktorý ukazuje na sever, sa nazýva severný pól (N), pól ukazujúci na juh je južný pól (S). Súhlasné magnetické póly sa priťahujú, nesúhlasné sa odpudzujú. To znamená, že v blízkosti severného geografického pólu je južný magnetický pól.



Obr.: Magnetické pole v okolí Zeme sa podobá na magnetické pole stáleho tyčového magnetu. O rozložení indukčných čiar sa môžeme presvedčiť pomocou magnetky. Pozdĺžna os magnetky má vždy smer dotýčnice t k indukčnej čiare.

Do konca 18. storočia sa poznatky o magnetizme obmedzovali iba na permanentné magnety. Nebola známa žiadna súvislosť medzi elektrickými a magnetickými javmi. V roku 1820 dánsky fyzik Oersted zistil, že sa magnetka v blízkosti vodiča s prúdom správa ako v blízkosti permanentného magnetu. Jeho pokusy ukázali, že existuje súvislosť medzi elektrickými a magnetickými javmi. Ukázali tiež, že magnetické javy súvisia s elektricky nabitými časticami v pohybe.

Podľa súčasných predstáv okolo každej častice s nábojom, ktorá je vzhľadom na inerciálnu vzťažnú sústavu v pokoji, je elektrické pole. Okolo častice s nábojom, ktorá je vzhľadom na inerciálnu vzťažnú sústavu v pohybe, pozorujeme okrem elektrického poľa aj pole magnetické.

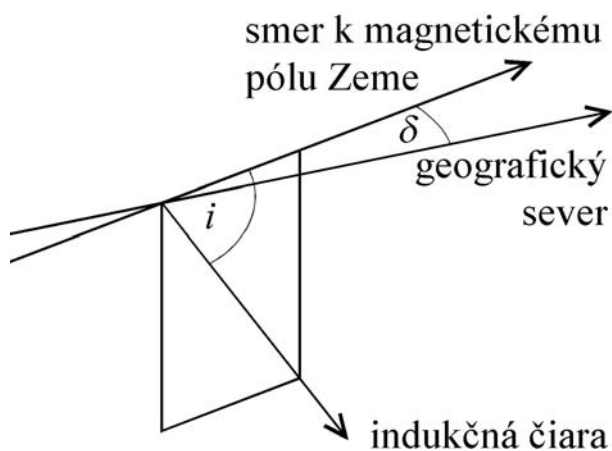
Magnetické pole je časť elektromagnetického poľa, ktorá sa prejavuje silovým pôsobením na pohybujúce sa elektricky nabitú časticu.

Teda magnetické pole pozorujeme okolo pohybujúcich sa nabitých častíc a pôsobí iba na pohybujúce sa nabitú časticu. Pôsobenie magnetického poľa na elektricky nabitú časticu v pohybe je jeden z prejavov elektromagnetickej interakcie. Sily, ktorými magnetické pole pôsobí na nabitú časticu, sa nazývajú **magnetické sily**.

Poznámka: Aj magnetické pole permanentného magnetu je vyvolané pohybujúcimi sa nabitými časticami. Jeho zdrojom sú elementárne prúdy prislúchajúce pohybom elektrónov v atónoch magnetu.

Každý stály magnet je **dipól** – má dva póly, ktoré sú navzájom neoddeliteľné. Medzinárodné označovanie pólov je odvodené z angličtiny – **N** (*north*), severný pól a **S** (*south*), južný pól. Ak stály tyčový magnet rozrežeme podľa ľubovoľnej roviny na dve časti, získame znova dva magnetické dipóly. Známe sú vlastnosti magnetických dipólov prejavujúce sa ich vzájomným silovým pôsobením. Ak dva stále magnety k sebe priblížime súhlasnými pólmi, odpudzujú sa. Naopak, dva magnety sa navzájom priťahujú, ak ich k sebe priblížime nesúhlasnými pólmi.

Prišlo sa na spôsob ako zmapovať magnetické pole pomocou **indukčných čiar**, do ktorých sa usporiadajú drobné železné piliny, keď nimi posypeme okolie stálych magnetov. Železo je **feromagnetická látka**. Jednou z jej vlastností je schopnosť stať sa v magnetickom poli vzbudeným – *indukovaným magnetom*. Železné piliny – drobné indukované magnety – sa navzájom na seba naviažu svojimi nesúhlasnými pólmi a vytvárajú reťazce. Myslenú čiaru, ktorá prechádza reťazcom, nazývame **indukčná čiara**. Ak teraz použijeme magnetku, môžeme pozorovať, aký smer zaujme: Pozdĺžna os magnetky leží vždy na dotýcnici k indukčnej čiare.



Obr.: Magnetická inklinácia i a magnetická deklinácia δ (západná)

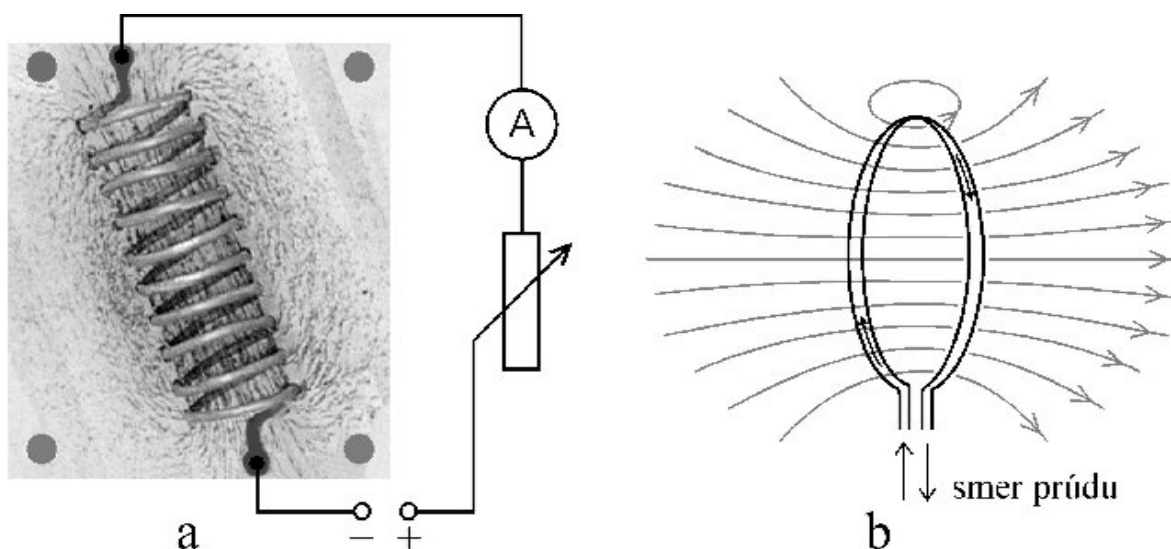
Podarilo sa zmapovať aj magnetické pole Zeme. Vieme, že Zem má vlastnosti stáleho magnetu. Jeho južný magnetický pól leží v blízkosti severného geografického pólu v Arktíde a jeho severný magnetický pól sa nachádza blízko južného geografického pólu. Magnetka umiestnená na povrchu Zeme ukazuje smer ku geografickému severu len veľmi približne. Uhol medzi smerom, ktorý ukazuje magnetka a smerom geografického poludníka sa nazýva

magnetická deklinácia δ . Magnetická inklinácia i na určitom mieste zemského povrchu je uhol medzi vodorovnou rovinou a smerom indukčnej čiary, meraný v zvislej rovine.

Poznámky:

- v našej zemepisnej šírke (napr. pre Bratislavu $48^{\circ} 09'$ severnej šírky a $17^{\circ} 07'$ východnej dĺžky) je hodnota západnej deklinácie δ približne $4,5^{\circ}$ a inklinácia i má približnú hodnotu 63° . Táto hodnota sa so zemepisnými súradnicami mení. Do istej miery sa mení poloha magnetických pólov Zeme aj v závislosti od času, a preto tabuľky s hodnotami uhlov δ , i treba občas korigovať.
- Južný pól zemského magnetu je miesto na povrchu Zeme, ku ktorému smeruje severný pól magnetky. Pretože leží v blízkosti severného geografického pólu, zvykne sa tento pól nazývať **severný geomagnetický pól Zeme**. Na základe dohody zobrazujeme indukčné čiary tak, že z južného geomagnetického pólu Zeme indukčné čiary vystupujú a do severného geomagnetického pólu vstupujú.
- Magnetka alebo iný stály magnet sa v magnetickom poli zeme orientuje do smeru magnetickej indukčnej čiary. Za severný (N – north) pól stáleho magnetu považujeme ten pól, ktorý sa orientuje ku geomagnetickému severnému pólu a za južný (S – south) ten pól, ktorý sa obracia smerom k južnému geomagnetickému pólu.

Magnetické pole nachádzame aj v okolí elektrických vodičov, ktorými prechádza elektrický prúd. Na jeho skúmanie môžeme použiť tie isté postupy aké používame na skúmanie stálych magnetov – magnetku alebo železnú pilinu. Na obrázku sú pomocou železných pilín zobrazené indukčné čiary v dutine a v blízkom okolí valcovej cievky s jednou vrstvou závitov, ktorou prechádza prúd I .



a) Jednovrstvová valcová cievka upevnená na doske z priehľadného plexiskla. Cievkou prechádza prúd I (približne 10 A). Dosku sme posypali železnými pilinami. Po miernom poklopaní na dosku sa piliny zoradili do obrazcov, znázorňujúcich indukčné čiary.

b) Magnetické pole jednotlivého závitú.

Z obrázku vľavo môžeme vyčítať dôležitú vlastnosť magnetického poľa: Indukčné čiary magnetického poľa sú uzavreté krivky. Preto sme ich ako uzavreté krivky nakreslili aj keď sme znázorňovali magnetické pole stáleho magnetu a Zeme. O ich existencii sa môžeme presvedčiť aj pomocou magnetky.

Pomocou magnetky môžeme určiť aj smer indukčných čiar magnetického poľa cievky a závitú. Ak meníme smer prúdu, ktorý prechádza cievkou a sledujeme ako sa správa magnetka umiestnená v dutine cievky alebo pred ňou, môžeme vysloviť pravidlo pravej ruky (Ampérove).

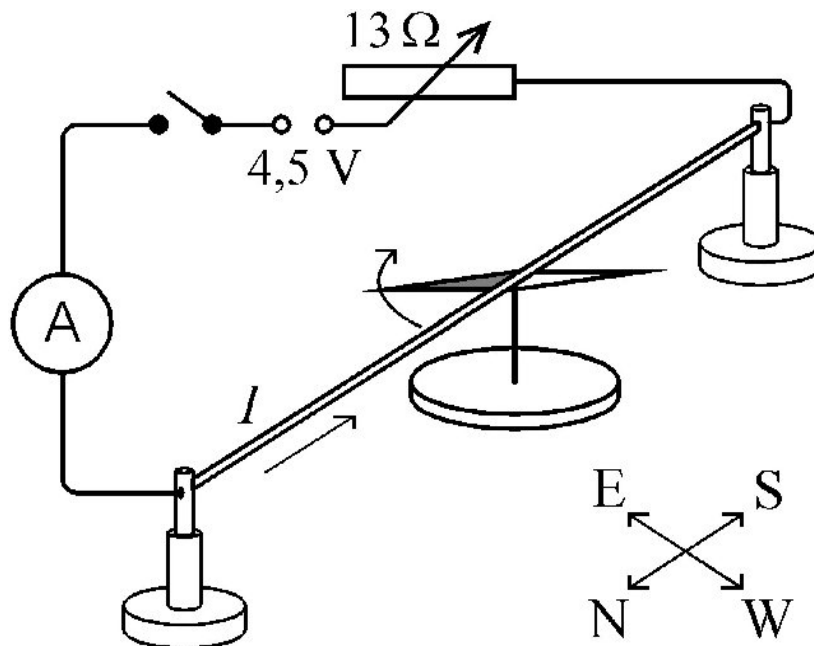
Ak uchopíme cievku do pravej ruky tak, aby prsty ukazovali smer prúdu v jej závitoch, severný pól magnetky v jej dutine sa vychýli v smere palca.

Poznámky:

Magnetka zaujme v magnetickom poli vždy smer, ktorý má indukčná čiara. Môžeme preto usudzovať, že podľa uvedeného pravidla indukčné čiary vystupujú z cievky v smere palca.

Experiment:

Urobme teraz experiment, ktorým by sme mohli preskúmať magnetické pole v okolí priameho vodiča. Zopakujeme pokus, ktorý urobil v roku 1820 H. CH. OERSTED. Pokus nie je zložitý – jeho usporiadanie vidíme na obrázku:

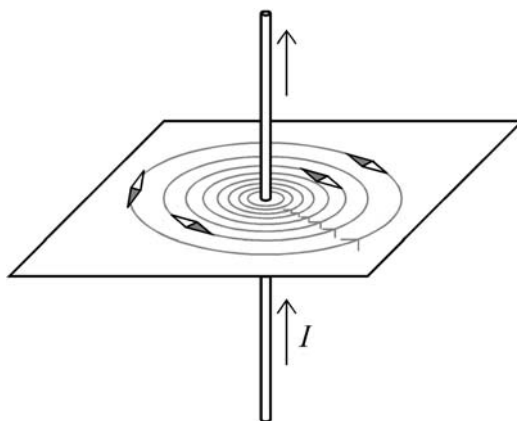


Obr.: Oerstedov pokus. Magnetka pod vodičom sa vychýlila podľa pravidla pravej ruky.

Pri zmenách parametrov obvodu (meníme napr. smer prúdu I prepínaním vodičov na svorkách zdroja), môžeme overiť pravidlo pravej ruky:

Ak položíme otvorenú dlaň pravej ruky na vodič tak, aby prsty ukazovali smer prúdu, severný pól magnetky pod vodičom sa vychýli v smere palca.

Keď dáme priamy vodič s prúdom do zvislej polohy a budeme vkladať do rôznych bodov v jeho okolí magnetku, zistíme, že magnetické indukčné čiary majú v každej rovine kolmej na vodič tvar sústredných kružníc. (na obr.:)



Obr.: Magnetické indukčné čiary znázornené v rovine kolmej na priamy vodič s prúdom majú tvar sústredných kružníc. O ich tvare sa môžeme presvedčiť napr. pomocou magnetky.

Rovnakých rovín, ktoré sú kolmé na priamy vodič, by sme mohli nakresliť ľubovoľne veľa. Indukčné čiary obklopujú priamy vodič tak, ako keby ležali na povrchu valcových plôch, v ose ktorých je vodič.

Smer indukčných čiar obkľučujúcich priamy rovný vodič s prúdom určíme pomocou pravidla pravej ruky:

Ak uchopíme pravou rukou priamy vodič tak, aby palec mal smer prúdu, indukčné čiary majú smer zahnutých prstov.

1.1.0 Základné poznatky o magnetickom poli

Základné poznatky o magnetickom poli sme preberali už na základnej škole:

1. Okolo magnetu existuje magnetické pole, ktoré ovplyvňuje ocelové predmety – tie sú k magnetu priťahované **magnetickou silou**.
2. Existenciu magnetického pola dokážeme magnetkou – magnetom tvaru kosoštvorca, ktorý sa môže voľne otáčať; severný pól je spravidla zafarbený na červeno (tmavo).
3. V blízkosti tyčového magnetu sa magnetka natočí tak, že severným pólom mieri k južnému pólu magnetu; značenie *N* - severný pól, *S* - južný pól.
4. **Zem** – má vlastnosti magnetu, preto sa používa magnetka ako kompas k orientácii (v blízkosti severného geografického pólu leží južný magnetický pól).

Magnetické pole môže byť:

1. **Stacionárne** – vlastnosti pola sa **nemenia v čase** (napríklad magnetická indukcia je konštantná, ...); zdrojom je permanentný magnet (ktorý je voči čidlu, ktorým pole registrujeme) v **pokoji, vodič**, ktorým prechádza **stály elektrický prúd**,
2. **Nestacionárne** – vlastnosti magnetického pola sa **menia v závislosti od času**; zdrojom je: magnet, ktorý sa vzhľadom na čidlo pohybuje, vodič, ktorým prechádza časovo premenlivý prúd,

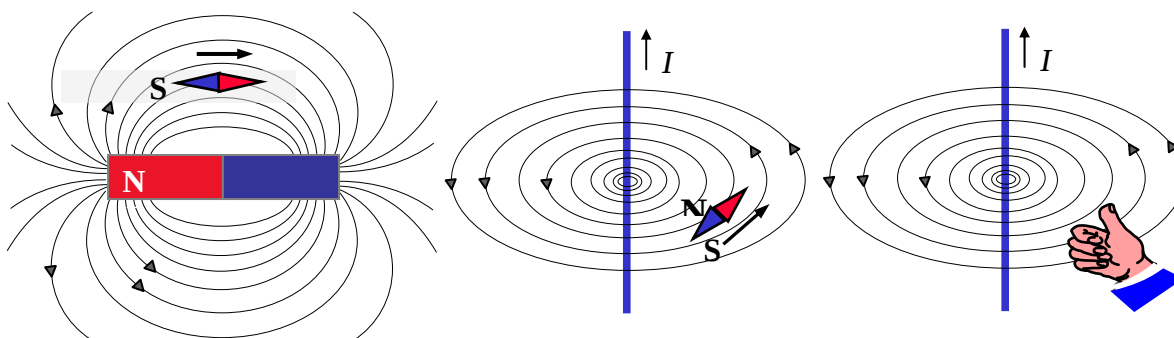
Pri hľadaní príkladov zdrojov jednotlivých typov magnetického pola je nutné si uvedomiť, že **pohyb je relatívny**. Ak sa bude pohybovať magnet a zároveň čidlo, ktorým magnetické pole vyšetrujeme, tak, že vzdialenosť medzi magnetom a čidlom bude konštantná, bude magnet (z pohľadu čidla) zdrojom stacionárneho magnetického pola.

Pohybujúci permanentný magnet je pre čidlo zdrojom nestacionárneho magnetického pola. Pre muchu, ktorá sedí na magnete, je zdrojom stacionárneho pola.

1.1.1 Stacionárne magnetické pole

Magnetické pole je *objekt*, ktorý sa prejavuje silovým pôsobením na magnety, teda na iné objekty, ktoré majú vo svojom okolí magnetické pole.

Magnetické indukčné čiary - Orientácia magnetických indukčných čiar a spôsob jej určenia



Obrázok zobrazuje magnetické indukčné čiary v okolí tyčového magnetu a priameho vodiča s prúdom, magnetka je vložená do magnetického poľa permanentného magnetu a priameho vodiča s prúdom.

Šípka pri magnetke znázorňuje južno-severný smer pólov magnetky. Šípky na magnetických indukčných čiarach sú v súhlasnom smere ako je južno-severný smer magnetky.

Posledný obrázok znázorňuje pravú ruku so zahnutými prstami a vztýčeným palcom, teda je v polohe vhodnej pre určenie orientácie magnetických indukčných čiar v okolí priameho vodiča s prúdom podľa Ampérovho pravidla.

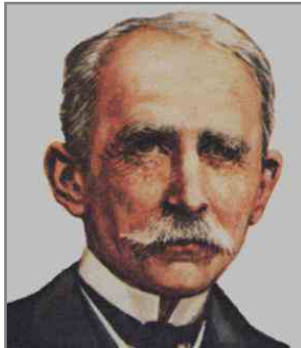
- časť elektromagnetického poľa, ktorá sa prejavuje silovým pôsobením na pohybujúce sa elektricky nabitú časticu,
- zdrojom **stacionárneho magnetického poľa** je nepohybujúci sa vodič s konštantným prúdom alebo nepohybujúci sa permanentný magnet,
- magnetické pole sa prejavuje silovým pôsobením,
- na opis priestorového rozloženia magnetického poľa zavádzame sústavu orientovaných kriviek, ktoré sa nazývajú **magnetické indukčné čiary**. Magnetická indukčná čiara je priestorovo orientovaná krivka, ktorej dotyčnica v danom bode má smer osi veľmi malej

magnetky umiestnenej v tomto bode. Smer od južného k severnému pólu magnetky určuje orientáciu indukčnej čiary.

- orientáciu magnetických indukčných čiar určujeme pomocou **Ampérovho pravidla pravej ruky**: Naznačíme uchopenie vodiča do pravej ruky tak, aby palec ukazoval dohodnutý smer prúdu vo vodiči; potom prsty ukazujú orientáciu magnetických indukčných čiar.
- magnetické pole, ktorého indukčné čiarly sú rovnobežné priamky, nazývame homogénne magnetické pole.



A.M. AMPÉRE



J.A. FLEMING



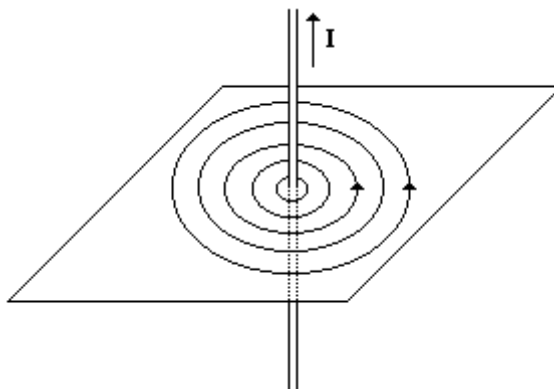
H.CH. OERSTED

1.1.2 Magnetické pole vodiča s prúdom

Magnetické vlastnosti materiálov boli známe už od staroveku, ale až v roku 1820 si dánsky fyzik, chemik a filozof Hans Christian Oersted (1777 - 1851) všimol **súvislosti magnetizmu a elektrického prúdu**. Zistil, že magnetka umiestnená v blízkosti vodiča sa vychýli, ak začne pretekať vodičom prúd. S výsledkami jeho skúmania sa oboznámil francúzsky fyzik André Marie Ampère (1775 - 1836), ktorý následne zistil, že na seba **vzájomne silami pôsobia vodiče, ktorými prechádza elektrický prúd**. Týmto pokusmi bola dokázaná prítomnosť magnetického poľa v okolí vodičov s prúdom. **Jeho príčinou je pohyb nositeľov elektrického náboja (elektrónov) vo vodiči**.

Pomocou magnetky je možné skúmať magnetické pole cievky, pričom zistíme, že je v podstate **veľmi podobné** ako magnetické pole v okolí permanentného magnetu. Aj pri cievke môžeme hovoriť o severnom a južnom póle.

Iný typ pola bude v okolí priameho vodiča s prúdom. O priebehu magnetického pola priameho vodiča sa môžeme presvedčiť pomocou ocelových pilín, ktoré sa správajú ako miniatúrne magnetky.



Na základe týchto pokusov možno definovať **magnetické indukčné čiarly**:

Magnetická indukčná čiara je priestorová orientovaná krivka, ktorej dotyčnica v danom bode má smer osy veľmi malej magnetky umiestnenej v tomto bode. Orientáciu indukčnej čiary určuje smer od severného k južnému pólu magnetky ($N \rightarrow S$).

Magnetické indukčné čiary vnútorného pola magnetu majú opačnú orientáciu. Je to dané tým, že magnetické indukčné čiary sú (na rozdiel od siločiar elektrického pola) vždy krivky uzatvorené.

Porovnaním s definíciou magnetickej indukcie $\vec{B}$ možno povedať, že dotyčnica zostrojená v ľubovoľnom bode magnetickej indukčnej čiary má smer vektora magnetickej indukcie.

Často sa používa **nesprávny** termín „magnetické siločiar“ („siločiar magnetického pola“). Ten nemôžeme považovať za presný.

Pojem magnetickej siločiar (čiara pola vektora magnetickej intenzity) vo fyzike existuje. Je to orientovaná krivka, ktorá má vo všetkých bodoch (kde je $H \neq 0$) dotyčnicu v smere vektora magnetickej intenzity $\vec{H}$. Ak zodpovedá hustota siločiar v každom bode veľkosti vektora $\vec{H}$, sú magnetické siločiar modelom magnetického pola.

Magnetické indukčné čiary (čiary pola vektora magnetickej indukcie) definované vyššie (za predpokladu, že zodpovedá hustota indukčných čiar v každom bode veľkosti vektora magnetickej indukcie $\vec{B}$) **sú modelom silových účinkov magnetického pola.**

Budeme sa zaoberať výhradne magnetickými indukčnými čiarami.

Magnetické indukčné čiary priameho vodiča s prúdom majú tvar sústredných kružníc rozložených v rovine kolmej k vodiču, ktorých stredy ležia v mieste priechodu vodiča rovinou. Orientáciu magnetických indukčných čiar je možné určiť pomocou **Ampérovho pravidla pravej ruky**:

Ak do pravej ruky naznačíme uchopenie vodiča tak, aby palec ukazoval dohodnutý smer prúdu vo vodiči, prsty ukazujú orientáciu magnetických indukčných čiar.

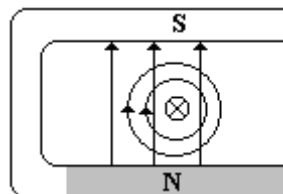
Dohodnutý smer prúdu je daný pohybom **kladných** častíc – teda **od kladnej** svorky zdroja **k zápornej**. Pre magnetické pole a pravidlá na určovanie orientácie magnetických indukčných čiar, magnetickú silu, ... je tento smer veľmi podstatný. **Všetky pravidlá vychádzajú z dohodnutého smeru prúdu. (!!!)**

Magnetické indukčné čiary sú vždy krivky uzatvorené (na rozdiel od siločiar elektrického pola). Pri **elektrickom poli** sú nabité telesá zdrojom elektrického pola a elektrické siločiar na nich začínajú a končia – tento druh pola sa nazýva ako pole **žriedlové**. V magnetických poliach obdobný zdroj neexistuje a pole označujeme ako pole **vírové**.

1.1.3 Magnetická sila

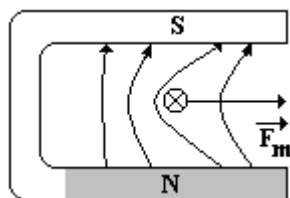
Silové pôsobenie určitého druhu je charakteristickým rysom každého fyzikálneho pola. V gravitačnom poli je to newtonovská sila, v elektrickom poli sa jedná o silu coulombovskú. Podobne je to aj v prípade pola magnetického – jeho základným prejavom je silové pôsobenie na vodič s prúdom.

O existencii magnetickej sily $\vec{F}_m$ sa môžeme presvedčiť pokusom: medzi dva póly magnetu je pohyblivo umiestnený vodič.



Vodič pripojíme k zdroju napätia. Podľa smeru prúdu vo vodiči (a teda podľa orientácie magnetických indukčných čiar v okolí vodiča) a podľa polarít magnetu, sa vodič vychýli buď na jednu stranu alebo na druhú.

Príčinou vychýlenia vodiča je vzájomné pôsobenie magnetu a vodiča s prúdom prostredníctvom ich magnetických polí.



Vľavo od vodiča sú magnetické indukčné čiary oboch polí orientované súhlasne, zatiaľ čo vpravo od neho opačne. Vzniká nesúmerné rozloženie magnetických indukčných čiar v okolí vodiča. Zložením oboch polí vzniká pole výsledné s väčšou hustotou indukčných čiar vľavo a menšou hustotou vpravo od vodiča. To sa prejaví vznikom magnetickej sily $\vec{F}_m$, ktorá pôsobí na vodič a mieri do miesta s menšou hustotou magnetických indukčných čiar. Pri zmene smeru prúdu alebo orientácie magnetických indukčných čiar magnetu sa zmení aj orientácia magnetických síl.

Poznámka: Pri kreslení obrázkov a náčrtov sa často volí taký pohľad, keď vektor danej veličiny mieri **z** alebo **do** nákresu (do papiera, do tabule, ...), pričom jeho smer je dôležitý. Symbolom $\odot$ sa označuje smer vektora, ktorý mieri **z** nákresu (mnemotechnická pomôcka – pozeráme sa na vrchol štartujúcej rakety). Symbolom $\otimes$ sa označuje smer vektora, ktorý mieri **za** nákres (mnemotechnická pomôcka – pozeráme sa na spodok štartujúcej rakety).

Do teraz sme uvažovali len vodič, ktorý bol umiestnený v magnetickom poli kolmo k indukčným čiarom. V prípade, že bude vodič zvierať s indukčnými čiarami ľubovoľný uhol, bude silové pôsobenie na vodič vždy menšie. Veľkosť magnetickej sily bude nulová, pokiaľ bude vodič rovnobežný s magnetickými indukčnými čiarami. Tento jav sa v praxi využíva v prípade, ak medzi póly magnetu umiestnime vodič v tvare slučky, ktorý sa otáča okolo svojej osy. Ak prechádza slučkou elektrický prúd, pôsobí na časť slučky kolmo k indukčným čiarom magnetické sily opačného smeru, ktoré nútia slučku k otáčavému pohybu. Moment tejto dvojice síl sa v priebehu otáčania mení podľa toho, ako sa mení veľkosť magnetických síl.

Praktický význam môžeme hľadať u dynám, generátorov elektrického prúdu, elektromotorov.

1.1.4 Magnetická indukcia

Homogénne magnetické pole je pole, ktoré je možné modelovať pomocou dvoch nesúhlasných rozľahlých pólů magnetu v malej vzdialenosti od seba. Vektory magnetickej indukcie (a teda aj magnetické indukčné čiary) sú navzájom rovnobežné.

Jedná sa opäť len o idealizáciu – skutočné magnetické polia sú nehomogénne. Nehomogenity vznikajú najmä na okrajoch pola – magnetické indukčné čiary prestávajú byť navzájom rovnobežné. Homogénne magnetické pole sa definuje podobne ako homogénne elektrostatické pole.

Ak budeme od teraz uvažovať v homogénnom magnetickom poli vodič kolmo k indukčným čiarom tohoto pola, zistíme, že veľkosť magnetickej sily je:

1. Priamo úmerná prúdu I , ktorý prechádza vodičom.
2. Priamo úmerná dĺžke l časti vodiča, ktorá je v magnetickom poli (tzv. **aktívna dĺžka**) – možno spraviť myšlienkový pokus: rozdeliť vodič na viac malých častí a výslednú magnetickú silu určiť ako výslednicu dielčích magnetických síl od týchto malých častí.

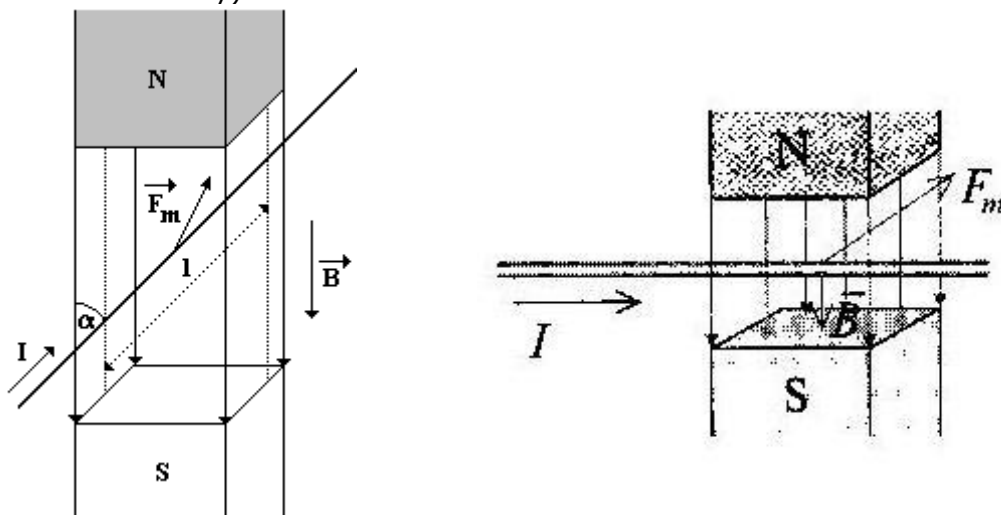
V uvažovanom prípade platí $F_m = B \cdot I \cdot l$, kde veličina B má význam konštanty úmernosti a charakterizuje silové pôsobenie magnetického pola na vodič s prúdom. V homogénnom magnetickom poli má stále rovnakú veľkosť ($B = \text{konšt.}$) a spolu so smerom magnetických indukčných čiar určuje vektorovú veličinu $\vec{B}$ – **magnetickú indukciu**; $[B] = N \cdot A^{-1} \cdot m^{-1} = T$

(tesla). Nikola Tesla bol chorvátsky elektrotechnik žijúci v USA, bol známy svojimi vynálezmi v oblasti elektrických strojov a vysokých frekvencií.

Jednotka tesla je pomerne veľká – veľkosť magnetickej indukcie permanentného magnetu je rádovo $10^{-2} - 10^{-1} T$, veľkosť magnetickej indukcie Zeme je v našich zemepisných šírkach rádovo $10^{-5} T$. Pre laboratórne účely sa konštruujú elektromagnety s veľkosťou magnetickej indukcie rádovo jednotiek tesla,

Ak by bol vodič umiestnený do homogénneho magnetického poľa rovnobežne s indukčnými čiarami, silové pôsobenie by nenastalo ($F_m = 0 N$). Veľkosť magnetickej sily závisí od uhla α , ktorý zvierajú vodič s indukčnými čiarami magnetického poľa: $F_m = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha$, kde $\alpha \in \langle 0; \pi \rangle$.

Magnetická sila $\vec{F}_m$ je kolmá na vodič a zároveň na magnetickú indukciu $\vec{B}$ (a teda aj na magnetické indukčné čiary).



Na určenie jej smeru používame **Flemingovo pravidlo ľavej ruky**:

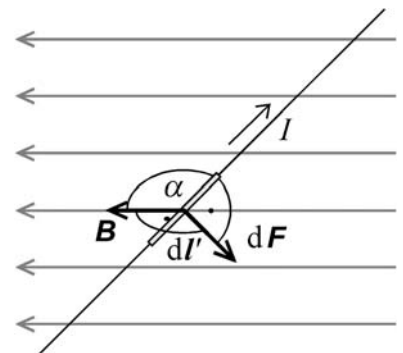
Ak položíme otvorenú ľavú ruku k priamemu vodiču tak, aby prsty ukazovali dohodnutý smer prúdu a indukčné čiary magnetu vstupovali do dlane, ukazuje odtiahnutý palec smer sily, ktorou pôsobí magnetické pole na vodič s prúdom.

Elektrické pole kvantitatívne charakterizujeme elektrickou intenzitou odvodenou zo sily, ktorou pole pôsobí na časticu s nábojom v pokoji. Magnetické pole pôsobí iba na pohybujúce sa častice s nábojom, preto v magnetickom poli ako skúšobné teleso použijeme časticu s nábojom Q pohybujúcu sa rýchlosťou $\vec{v}$.

Magnetická indukcia

- slúži na kvantitatívny opis magnetického poľa každom jeho bode,
- pre homogénne magnetické pole môžeme magnetickú indukciu definovať na základe silových účinkov magnetického poľa na vodič s prúdom
 - o uvažujeme o priamom vodiči s prúdom I , ktorého časť s dĺžkou l (aktívna dĺžka vodiča) je v homogénnom magnetickom poli
 - o veľkosť sily F_m pôsobiacej v homogénnom poli na priamy vodič s prúdom je priamo úmerná jeho aktívnej dĺžke l , prúdu I a závisí aj od magnetického poľa a od polohy vodiča v ňom (keď je vodič rovnobežný s indukčnými čiarami magnetického poľa, je sila F_m nulová, kým v polohe kolmej na indukčné čiary dosahuje maximum)
- pre veľkosť magnetickej sily platí:

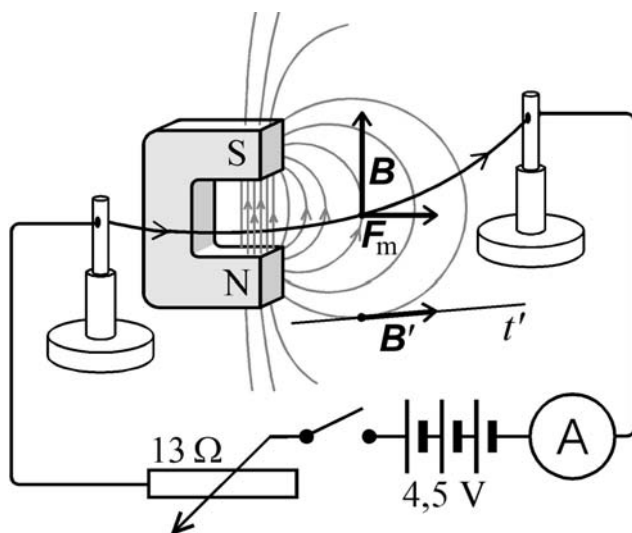
- o $F_m = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha$, kde $\vec{B}$ je **magnetická indukcia** a charakterizuje silové pôsobenie magnetického poľa
- o tento vzťah sa volá aj **Ampérov zákon**
- pre magnetickú indukciu platí:
 - o $B = \frac{F_m}{I \cdot l \cdot \sin \alpha}$, $B = \left[\frac{N}{A \cdot m} \right] = [T]$, jednotkou magnetickej indukcie je **tesla**
 - o magnetická indukcia v blízkosti permanentných magnetov má veľkosť približne 0,001T až 0,5T
- magnetická indukcia závisí od tvaru telesa a od prostredia:
 - o závislosť magnetickej indukcie od prostredia vyjadruje **permeabilita prostredia μ** ; zavádza sa **relatívna permeabilita μ_r** , pre ktorú platí:
 - $\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0}$, kde μ_0 je **permeabilita vákua** $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$
 - o **dlhý priamy vodič**:
 - $B = \frac{\mu}{2\pi} \frac{I}{d}$, kde d je vzdialenosť od priameho vodiča s prúdom I
 - o **v strede kruhovej slučky**:
 - $B = \mu \frac{I}{2r}$, kde r je polomer slučky
 - o **v strede dlhej valcovej cievky**:
 - $B = \mu \frac{NI}{l}$, kde l je dĺžka cievky a N je počet závitov. Podiel $\frac{N}{l}$ je tzv. hustota závitov, ktorá vyjadruje počet závitov pripadajúcich na jednotku dĺžky cievky
- magnetická indukcia je vektorová veličina; smer vektora magnetickej indukcie v istom bode poľa je zhodný so smerom súhlasne orientovanej dotýčnice k indukčnej čiare v tomto bode
- sila $\vec{F}_m$, ktorá pôsobí na priamy vodič s prúdom v homogénnom magnetickom poli s magneticou indukciou $\vec{B}$, je kolmá na vodič aj na magneticú indukciu
 - o smer pôsobiacej sily môžeme určiť pomocou **Flemingovho pravidla ľavej ruky**: Keď položíme otvorenú ľavú ruku na vodič tak, aby prsty ukazovali smer prúdu a indukčné čiary vstupovali do dlane, natiahnutý palec ukazuje smer sily, ktorou pôsobí magnetické pole na vodič s prúdom



V predošlej kapitole sme uviedli príklady experimentov, pri ktorých sa ukázalo, že magnetické pole je aj v okolí elektrického vodiča, ktorým prechádza prúd. Mohli by sme vysloviť domnienku: Ak magnetické pole pôsobí na magnety, prečo by nepôsobilo aj na vodiče s prúdom?

Experiment - Magnetické pole pôsobí na vodiče, ktorými prechádza elektrický prúd.

Najprv pripravme jednoduchý experiment, ktorého schéma je na nasledujúcom obrázku. Na experiment potrebujeme magnet tvaru U, dva stojany, batériu 4,5 V, reostat a ampérmetr. Medzi stojany napneme ľahký vodič (napr. tenký hliníkový pásik – lametu, aká sa používa na vianočný stromček).



Obr. Vodič s prúdom I , voľne zavesený medzi dvoma stojanmi, v magnetickom poli stáleho magnetu tvaru U. Ak vodičom prechádza prúd, na vodič pôsobí sila F_m . Smer pôsobiacej sily určujeme podľa **Flemingovho pravidla ľavej ruky**.

Ešte predtým ako experiment vykonáme, pokúsime sa predpovedať, aký bude jeho výsledok:

1. Sila F_m môže závisieť napr. od prúdu I , ktorý prechádza vodičom. Ak prúd regulujeme reostatom, mali by sme pozorovať zmenu vo výchylke vodiča.
2. Sila F_m by mala závisieť aj od aktívnej dĺžky vodiča – od dĺžky l , ktorou vodič zasahuje do magnetického poľa.
3. Ak dôkladne preskúmame obrázok, mali by sme si všimnúť, že výsledok experimentu – pôsobenie magnetickej sily F_m – môže závisieť aj od miesta, do ktorého vodič zavesíme. Pravdepodobne tam, kde sú indukčné čiary hustejšie, budú aj silové účinky poľa na vodič väčšie.
4. Veličina, ktorá tieto vlastnosti magnetického poľa opisuje, je na obrázku označená vektorom B , ktorý nazývame *magnetická indukcia*.
5. Veľkosť B magnetickej indukcie zodpovedá dĺžke vektora B . Magnetickej indukcii poľa v miestach s menšou hustotou indukčných čiar zodpovedá vektor B s menšou dĺžkou, ako v miestach s väčšou hustotou indukčných čiar.
6. Smer vektora B v určitom bode magnetického poľa závisí od smeru indukčnej čiary v tomto bode. Vektor B leží preto na priamke t , ktorá je dotyčnicou indukčnej čiary v tomto bode (pozri na obrázku napr. vektor B').

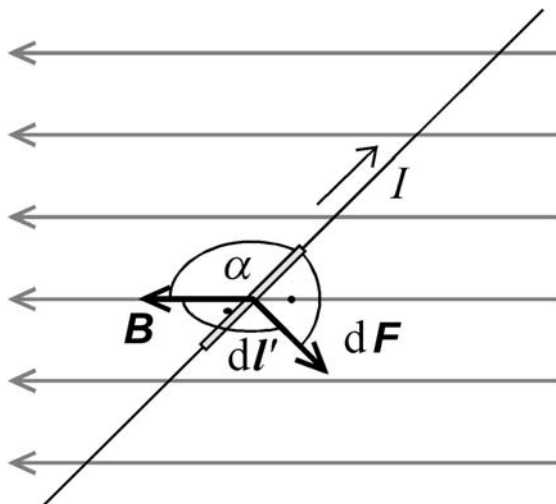
Pri praktickom vykonaní experimentu by sme sa mali presvedčiť či napr. výchylka vodiča v magnetickom poli bude väčšia ak vodič vložíme do miesta s väčšou magneticou indukciou alebo či výchylku vodiča ovplyvní zmena prúdu prechádzajúceho vodičom.

Pri experimente by sme tiež mali zisťovať ako sa zmení smer pôsobiacej magnetickej sily:

- a) pri zmene smeru prúdu,
- b) pri zmene smeru magnetického poľa.

Smer magnetickej sily pôsobiacej na vodič s prúdom sa určuje pravidlom, ktoré pochádza od anglického fyzika J. A. FLEMINGA (1849 – 1945) a nazýva sa podľa neho Flemingovo pravidlo ľavej ruky:

Ak položíme otvorenú dlaň ľavej ruky na vodič v magnetickom poli tak, aby prsty ukazovali smer prúdu a indukčné čiary vstupovali do dlane, magnetická sila pôsobí na vodič v smere palca.



Obr. Podľa Ampérovho zákona na element dl' vodiča s prúdom I pôsobí v magnetickom poli s magnetickou indukciou B magnetická sila s veľkosťou $F_m = B.I.l.\sin \alpha$.

Fyzika obvykle zaujíma nielen kvalitatívny opis javu, ale snaží sa aj o jeho kvantitatívne preskúmanie a nakoniec aj o matematické vyjadrenie fyzikálnej závislosti. Nebolo to inak ani v histórii skúmania vzájomného pôsobenia vodičov. Javom sa zaoberal už v devätnástom storočí, ešte pred Flemingom, francúzsky fyzik A. M. AMPÈRE. Ampère v r. 1826 vykonal a publikoval výsledky merania síl, ktorými na seba pôsobia vodiče, ktorými prechádza prúd. Jeho merania mu umožnili vysloviť zákon, podľa ktorého na každý veľmi krátky úsek vodiča (presnejšie – nekonečne malý element dl'), pôsobí v magnetickom poli s magnetickou indukciou B elementárna magnetická sila. Teda (pre homogénne pole, vodič s dĺžkou l v poli):

$$F_m = B.I.l.\sin \alpha$$

kde α je uhol zovretý medzi smerom indukčných čiar a vodičom. Podľa objaviteľa sa tento vzťah nazýva **Ampérov zákon**.

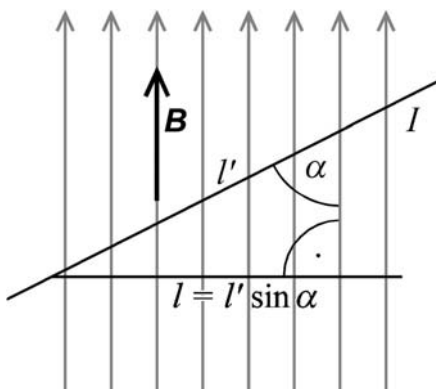
Ak je pole homogénne a vodič doň zasahuje dĺžkou l , potom celkovú magnetickú silu F_m , ktorou magnetické pole pôsobí na vodič, môžeme vyjadriť vzťahom

$$F_m = B.I.l.\sin \alpha$$

Dĺžku $l.\sin \alpha$ nazývame aktívna dĺžka vodiča. Pre vodič, ktorý má aktívnu dĺžku l alebo pre vodič s dĺžkou l , ktorý je kolmý na indukčné čiary, teda platí vzťah

$$F_m = B.I.l$$

V školských podmienkach je praktické a dostatočne presné meranie veľkosti F_m magnetickej sily ťažko realizovateľné. Preto ani nenavrhujeme spôsob, ako sa meraním presvedčiť o platnosti vzťahu, ktorý vyjadruje závislosť magnetickej sily F_m od veličín B , I , l . Môžeme však použiť dôsledky Ampérovho objavu, aby sme definovali veličinu B , ktorú sme nazvali magnetická indukcia.



Obr. Aktívna dĺžka l vodiča v homogénnom magnetickom poli je jeho priemet do smeru kolmého na indukčné čiary.

Veľkosť B magnetickej indukcie homogénneho magnetického poľa definujeme vzťahom

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

Veličina F_m vo vzťahu je magnetická sila pôsobiaca v homogénnom magnetickom poli s magnetickou indukciou B na vodič s aktívnou dĺžkou l a s prúdom I , ktorý je kolmý na indukčné čiary poľa.

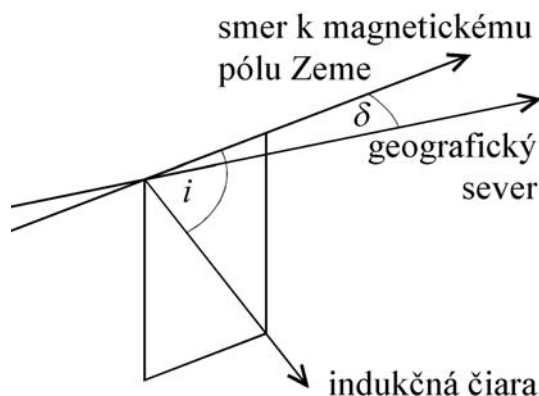
Jednotkou magnetickej indukcie je tesla (značka T). Zo vzťahu (2) vychádza

$$[B] = \frac{[F_m]}{[I][l]} = \frac{N}{A \cdot m} = N \cdot A^{-1} \cdot m^{-1} = T$$

Poznámky

- Určiť aktívnu dĺžku l vodiča nebýva jednoduché a v niektorých prípadoch to dokonca nie je ani možné. Nie je to možné ani pri našom pokuse, kde by sme ťažko našli dostatočne dlhý úsek magnetického poľa, ktoré by malo vlastnosti homogénneho poľa, t. j. malo by rovnobežné indukčné čiary rozložené s rovnakou hustotou na celej aktívnej dĺžke l vodiča.
- V magnetických poliach, s ktorými prichádzame do styku v okolí bežných stálych magnetov, možno spravidla odmerať magnetickú indukciu s veľkosťou od 0,01 T do 0,5 T. Veľkosť magnetickej indukcie B v magnetickom poli Zeme, meraná v smere indukčnej čiary, je na väčšine nášho územia približne 0,000 05 T. Veľkosť horizontálnej zložky B_z a vertikálnej zložky B_v magnetickej indukcie B nájdeme potom podľa obrázku ako

$$B_z = B \cos i \quad B_v = B \sin i$$

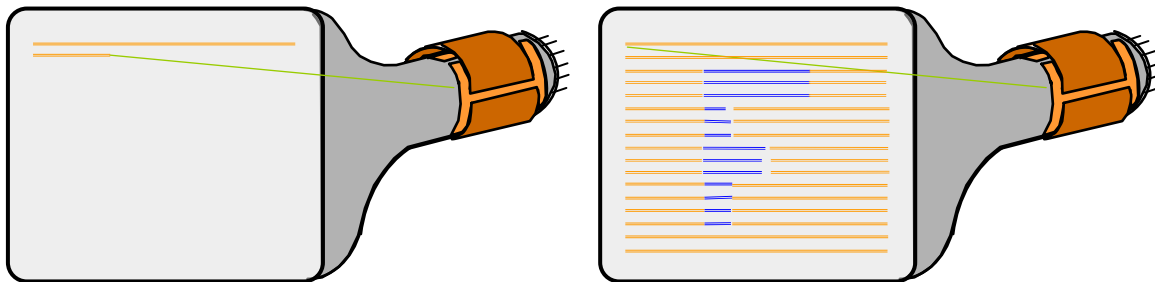


- S pojmom *homogénne pole* sme sa vo fyzike už stretli niekoľkokrát, napr. v súvislosti s elektrickým poľom alebo gravitačným poľom. Pripomeňme si jeho dôležité znaky: Čiary, ktorými homogénne pole znázorňujeme (tu sú to indukčné čiary), by mali byť rovnobežné a všade by mali mať rovnakú hustotu. V tej časti magnetického poľa, ktorú môžeme považovať za homogénne pole, má vektor magnetickej indukcie konštantný smer a konštantnú veľkosť.

Príklad použitia poznatkov

Na inej snímke je znázornená aplikácia pohybu častice s nábojom v homogénnom magnetickom poli – televízna obrazovka s vychyľovacími cievkami:

- dopadu elektrónového lúča do ľavého horného rohu obrazovky a rozsvietenia bodu dopadu lúča na obrazovke,
- postupného vytvárania obrazu na obrazovke vykresľovaním jednotlivých riadkov,
- opakovania pohybu elektrónového lúča.



1.1.5 Magnetické indukčné čiary

Je možné zviditeľniť magnetické pole?

Experiment: Pilinový obrazec magnetického poľa permanentného magnetu.

Na priesvitnú fóliu položíme magnet a posypeme železnými pilinami.

Vysvetlite, prečo sa piliny usporiadajú do takéhoto obrazca. (Návod: piliny sú z feromagnetického materiálu.)

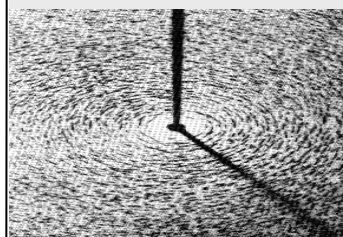
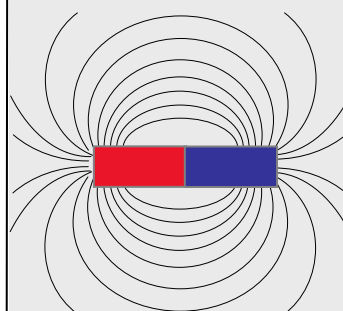
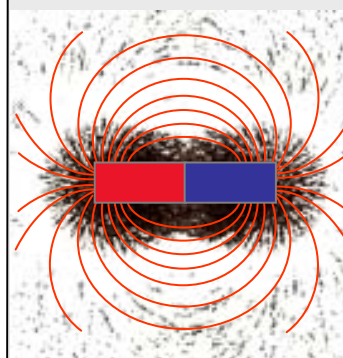
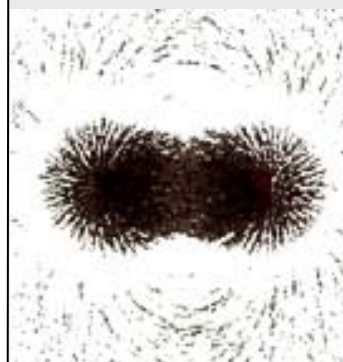
Ak reťazcami pilín preložíme čiary...

Čiary preložené reťazcami pilín sú magnetické indukčné čiary (definícia magnetickej indukčnej čiary).

Čiary preložené reťazcami pilín v okolí permanentného tyčového magnetu.

Experiment: Pilinový obrazec v okolí priameho vodiča s prúdom v rovine kolmej na os vodiča.

Pilinový obrazec v okolí priameho vodiča s prúdom. Popíšte tvar čiar preložených reťazcami pilín.



Čiary preložené reťazcami pilín v okolí priameho vodiča s prúdom.
Sú sústredné kružnice so spoločným stredom na osi vodiča.

Pilinový obrazec v okolí závitov s prúdom.
Popíšte tvar čiar preložených reťazcami pilín.

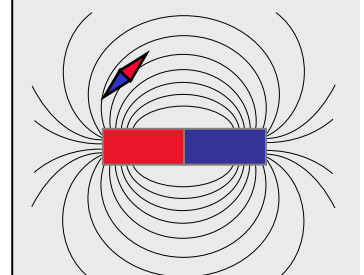
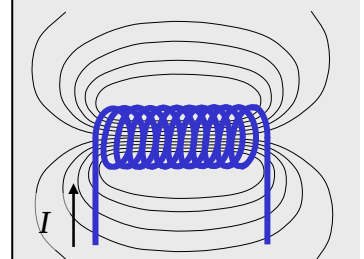
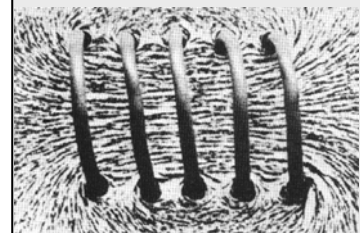
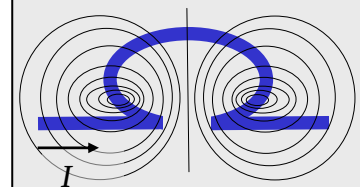
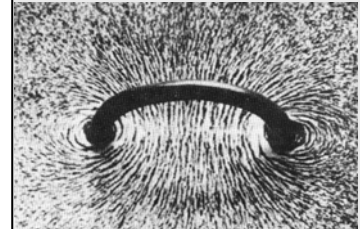
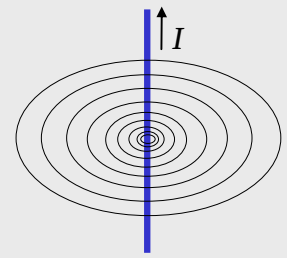
Čiary preložené reťazcami pilín v okolí závitov s prúdom.
Porovnajte tento tvar čiar s čiarami preloženými reťazcami pilín v okolí priameho vodiča s prúdom.

Pilinový obrazec v okolí viacerých závitov s prúdom.
Popíšte tvar čiar preložených reťazcami pilín vo vnútri závitov.

Čiary preložené reťazcami pilín v okolí viacerých závitov s prúdom.

Experiment: Pohyb magnetky v okolí permanentného magnetu.
Na snímke je zobrazenie magnetických indukčných čiar v okolí permanentného magnetu.

Pozorujte polohu magnetky voči magnetickým indukčným čiarám. Opíšte túto polohu.



Poloha magnetky a jej osi k čiarom preloženým reťazcami pilín v okolí priameho vodiča s prúdom v rôznych miestach poľa.

Aká je poloha osi magnetky v danom mieste k magnetickej indukčnej čiare?

Dotyčnica k magnetickým indukčným čiarom.

Pohyb magnetky v okolí priameho vodiča s prúdom. Pozorujte a popíšte polohu magnetky voči magnetickým indukčným čiarom.

Poloha magnetky a jej osi k čiarom preloženým reťazcami pilín v okolí priameho vodiča s prúdom v rôznych miestach poľa.

Aká je poloha osi magnetky v danom mieste k magnetickej indukčnej čiare?

Dotyčnica k magnetickým indukčným čiarom.

Definícia magnetickej indukčnej čiary:

Magnetická indukčná čiara je priestorovo orientovaná krivka, ktorej dotyčnica v danom bode má smer osi veľmi malej magnetky umiestnenej v tomto bode.

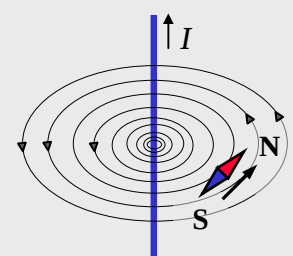
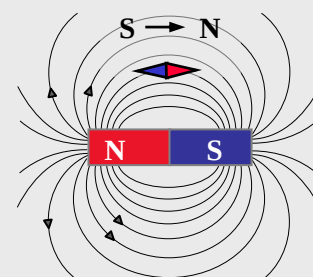
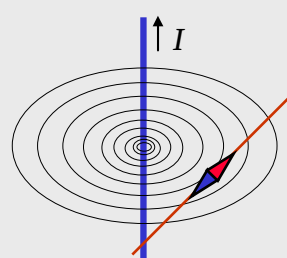
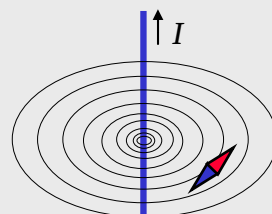
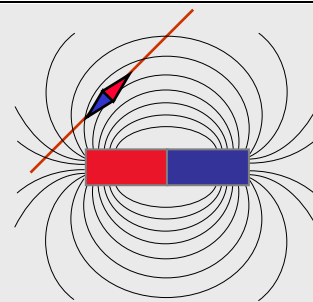
Orientácia magnetických indukčných čiar pomocou magnetky v okolí permanentného magnetu.

Ak umiestnime magnetku v magnetickom poli, smer od južného k severnému pólu magnetky určuje orientáciu magnetických indukčných čiar.

Ako sú orientované magnetické indukčné čiary voči pólom permanentného magnetu?

Orientácia magnetických indukčných čiar pomocou magnetky v okolí priameho vodiča s prúdom. Na snímke sú magnetické indukčné čiary v okolí priameho vodiča s prúdom a magnetka.

Zorientujte indukčné čiary magnetického poľa.



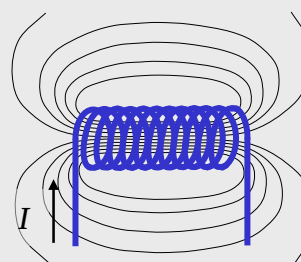
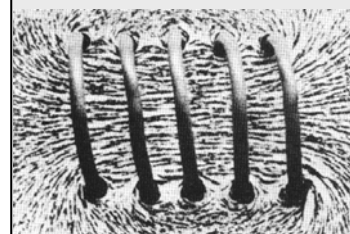
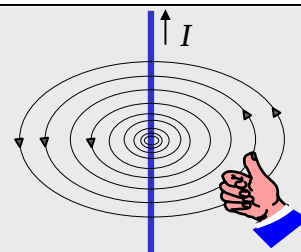
Ampérovo pravidlo pravej ruky:
 Naznačíme uchopenie vodiča do pravej ruky tak, aby palec ukazoval dohodnutý smer prúdu vo vodiči, potom prsty ukazujú orientáciu magnetických indukčných čiar.

André Marie Ampère,
 francúzsky fyzik a matematik (1775-1836)

Pilinový obrazec v okolí závitov s prúdom – cievky.
 Upozorníme na uloženie pilín vo vnútri cievky.
 Ako sme nazvali pole, ktoré je zobrazené rovnobežnými čiarami (gravitačné, elektrické)?

Magnetické pole, ktorého indukčné čiarly sú rovnobežné priamky, nazývame homogénne magnetické pole.

Homogénne magnetické pole je v cievke v blízkosti jej osi.



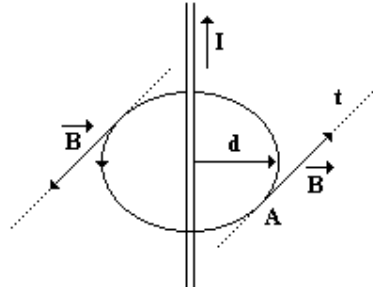
1.1.6 Magnetické pole dvoch rovnobežných vodičov s prúdom

K javom, ktorými sme sa doteraz zaoberali, sme urobili aj experimenty, ktoré nás presvedčili o tom, že jav existuje aj v skutočnosti – teda nielen na obrázku v učebnici alebo v matematickom vyjadrení. Skúmali sme preto napr. rozloženie magnetického poľa okolo vodičov pomocou železných pilín alebo magnetky. Ukázali sme si, ako sa dá merať magnetická indukcia. Presvedčili sme sa, že na vodiče s prúdom pôsobia v magnetickom poli magnetické sily. Experimenty, ktoré sme vykonali, spravidla nevyžadovali zložité zariadenia, často pri nich nebolo treba ani nič merať a viaceré z nich sme si mohli urobiť hoci aj doma.

Ak chceme vyšetrovať **magnetické pole dvoch vodičov s prúdom**, musíme najskôr detailnejšie preskúmať magnetické pole, ktoré vzniká v okolí osamoteného priameho dostatočne dlhého vodiča.

Ideálne by bolo vyšetrovať magnetické pole v okolí nekonečne dlhého vodiča, pretože by sme sa nemuseli zaoberať javmi, ktoré nastávajú na koncoch vodiča. Takýto vodič však neexistuje.

Magnetické indukčné čiarly sú sústredné kružnice so stredom v ose vodiča a ležia v kolmej rovine k vodiču. **Vektor magnetickej indukcie $\vec{B}$ leží v rovine kolmej k vodiču a má smer dotyčnice k magnetickej indukčnej čiare.**



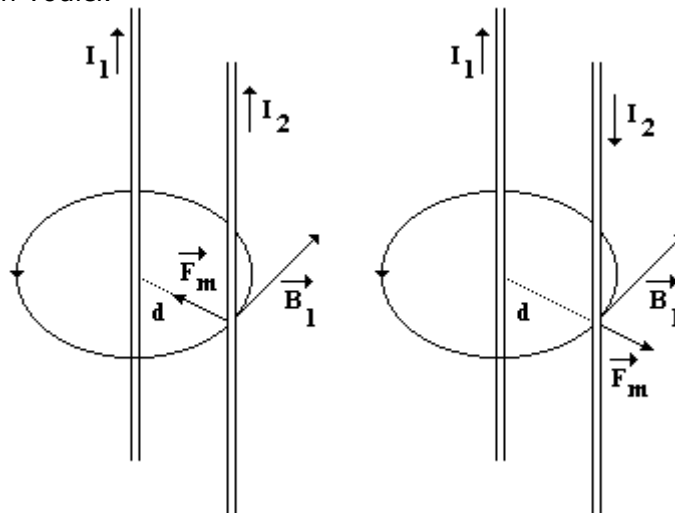
Pre veľkosť magnetickej indukcie v bode A platí vzťah:

$$B = \mu \frac{I}{2\pi \cdot d}$$

kde I je prúd prechádzajúci vodičom, d vzdialenosť bodu od vodiča (tj. polomer magnetickej indukčnej čiary) a μ **permeabilita prostredia** (napríklad jadra cievky, ...). Pre vákuum (a pre naše potreby približne aj pre vzduch) má **permeabilita vákua** hodnotu $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$. Permeabilita prostredia súvisí s permeabilitou vákua vzťahom $\mu = \mu_0 \mu_r$, kde μ_r je **relatívna permeabilita prostredia**.

Relatívna permeabilita výrazným spôsobom ovplyvňuje magnetické vlastnosti látok.

Skúsme uvážiť novú situáciu, keď je **v magnetickom poli priameho vodiča umiestnený rovnobežne ďalší veľmi dlhý tenký vodič**, ktorým tečie prúd. Vodiče na seba budú pôsobiť magneticou silou, pretože každý z nich sa nachádza v magnetickom poli druhého vodiča. Smer magnetickej sily, ktorá pôsobí na jeden z rovnobežných vodičov s prúdom, závisí od smeru prúdu v druhom vodiči.



1. Prúdy vo vodičoch majú súhlasný smer – vodiče sa priťahujú.
2. Prúdy vo vodičoch majú opačný smer – vodiče sa odpudzujú.

Táto interakcia je „opačná“ ako interakcia dvoch nábojov resp. dvoch magnetov.

Určme veľkosť magnetickej sily, ktorá pôsobí na časť jedného vodiča s dĺžkou l , ak je druhý vodič vzdialený od tohoto vodiča d :

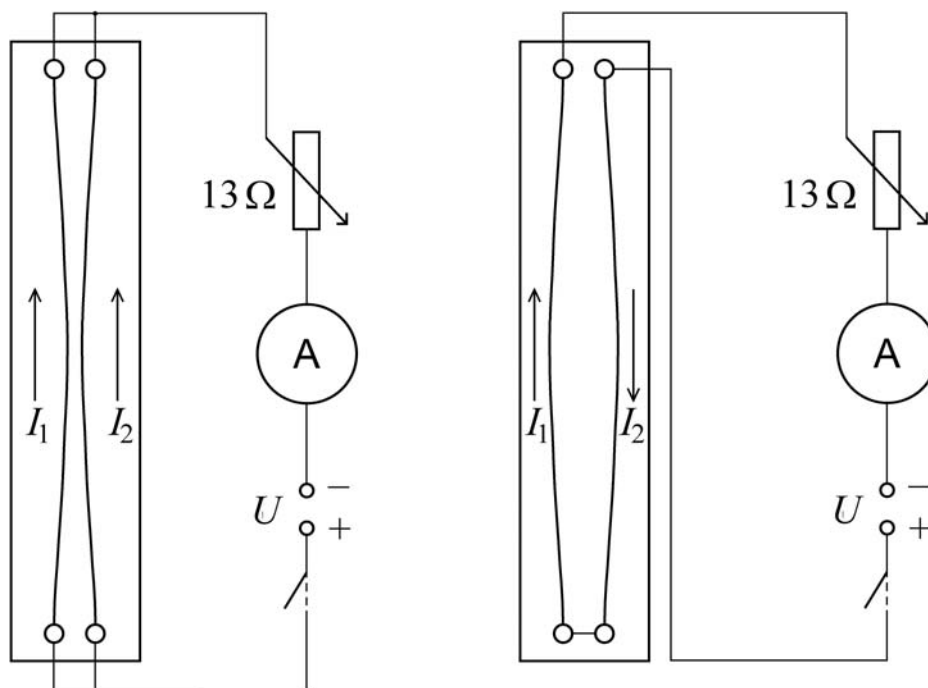
$$F_m = B_1 \cdot I_2 \cdot l = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \frac{I_1 \cdot I_2}{d} \cdot l$$

kde I_1 a I_2 sú prúdy vo vodičoch. Na základe tohoto vzťahu sa definuje jednotka **ampér**, ktorá patrí medzi základné jednotky sústavy SI.

Výraz $\sin \alpha$ sme do vzťahu pre magneticú silu nepísali, pretože magnetické indukčné čiary magnetického pola vytvárané jedným vodičom sú kolmé k druhému vodiču – teda $\sin \alpha = \sin 90^\circ = 1$.

Experiment

Skúsme teraz uvažovať či by sme sa pomocou vhodného overovacieho experimentu mohli presvedčiť o sile, ktorou na seba navzájom pôsobia rovnobežné vodiče. Pokúsme sa vžiť do role fyzika, pred ktorým sa vzájomným pôsobením vodičov s prúdom ešte nikto nezaoberal. Fyzik práve dokončil úvahy, ktoré sme urobili aj my. Teraz sa chystá urobiť overovací experiment.



Obr. Návrh experimentu na overenie vzájomného pôsobenia vodičov s prúdom

Najprv by sme si mali premyslieť plán postupu. Urobme to v postupných krokoch.

1. Na začiatku by sme si mali nakresliť obrázok podobný tomu, ktorý nám poslúžil pri myšlienkovom experimente. Zakreslíme doň aj všetky pomôcky, o ktorých si myslíme, že ich budeme potrebovať: zdroj napätia, vypínač, reostat na reguláciu prúdu

Úloha: Vzťahy, ktoré budeme pri plánovaní nášho experimentu potrebovať: Pre vzájomné silové pôsobenie rovnobežných vodičov 1 a 2, navzájom vzdialených o d , na dĺžke l platí vzťah

$$F_m = \frac{\mu_0 \mu_r I_1 I_2 l}{2\pi d}$$

2. Rovnobežné vodiče s dĺžkou približne 30 cm pripevníme medzi kovové svorky na stojan, ktorý umiestnime do zvislej polohy. Zapojenie plánujeme tak, aby rovnobežnými vodičmi prechádzali prúdy pri jednom experimente rovnakým smerom, pri druhom – navzájom opačnými smermi.

3. Podľa vzťahu sú magnetické sily nepriamo úmerné vzájomnej vzdialenosti vodičov a priamo úmerné prúdom vo vodičoch. Príliš veľké prúdy vo vodičoch sú príčinou ich prehrievania alebo aj prepálenia. Aby sme sa tomu vyhli, plánujeme uložiť vodiče bližšie k sebe, napr. približne do vzájomnej vzdialenosti $d \approx 10$ cm.

4. Zatiaľ ešte nevieme, aký zdroj napätia U by sme mali použiť. Vopred sa pokúsime odhadnúť veľkosť prúdov, ktoré by pri pokuse mali vodičmi prechádzať – najprv predpokladajme napr., že by to mohli byť hodnoty do 1 A (neskôr môžeme náš názor opraviť). Vhodný zdroj, z ktorého by sme mohli odoberať také prúdy je napr. akumulátorová batéria s napätím napr. 6 V alebo 12 V, taká, aká sa používa v automobiloch, alebo pri veľmi krátkom zapojení, aj plochá suchá batéria, s napätím 4,5 V. (Pravdepodobne sa nevyhneme predbežným výpočtom. Urobíme ich v nasledujúcom kroku.)

5. Pokúsme sa teraz, najprv predbežným výpočtom zistiť, akou veľkou silou budú vodiče na seba pôsobiť.

Úloha: Vypočítajme napr. pre pokus na obrázku vľavo, aká bude sila vzájomného pôsobenia vodičov s prúdmi $I_1 = I_2 = 0,5$ A, ich vzájomnú vzdialenosť $d = 0,1$ m a ich dĺžku $l = 0,3$ m.

6. Pravdepodobne ste zistili, že sila nebude príliš veľká. Ak chceme jav pozorovať, mali by sme použiť veľmi ľahké vodiče, napr. tenké hliníkové pásiky „lamety“, ktoré sa používajú ako ozdoba na vianočný stromček (použili sme ich už aj predtým, kde sme sa presvedčili o pôsobení magnetickej sily na vodič s prúdom). Môžeme pri tom naraziť na problém: pri väčších prúdoch sa pravdepodobne tenký hliníkový vodič prepáli.

7. Pri tak malej sile, aká nám vyšla výpočtom, si musíme dať pozor na ďalšie vplyvy – napr. na prívian v miestnosti, otrasy budovy alebo aj na iné magnetické polia, nepochádzajúce od samotných rovnobežných vodičov.

Zrejme sa nevyhneme tomu, aby sme pokus robili v magnetickom poli Zeme. Skúsme preto uvážiť a odhadnúť, akou (približne) veľkou magnetickou silou F_{mZ} bude na vodič s prúdom 0,5A pôsobiť magnetické pole Zeme. Vieme, že magnetická indukcia B , meraná v smere indukčnej čiary, má v našich zemepisných šírkach približnú veľkosť $B_Z = 0,00005$ T.

Úloha:

a) Naštudujte informácie o magnetickej sile, ktorá pôsobí na vodič s prúdom.

b) Určte maximálnu veľkosť sily F_{mZ} , ktorou by magnetické pole Zeme malo pôsobiť na vodiče pri našom experimente, ktorý plánujeme.

8. Výsledok nie je pre náš experiment veľmi priaznivý. Ak sme počítali správne, z porovnania síl F_m a F_{mZ} vo výpočtoch v úlohách z bodov 5 a 7b vychádza, že magnetické pole Zeme bude pôsobiť na naše vodiče s prúdom 0,5A takmer desaťkrát väčšou silou než vodiče na seba navzájom.

1.1.7 Magnetické pole cievky

Podobne ako je možné znázorniť magnetické pole priameho vodiča s prúdom, je možné znázorniť aj **magnetické pole vodičov s prúdom v tvare závit** alebo **cievky**. (Nekonečne) dlhá valcová cievka s veľkým počtom závitov, ktorých priemer je omnoho menší ako dĺžka cievky, sa nazýva **solenoid**. Ak stočíme solenoid do prstenca, dostaneme **toroid**. Pomocou pokusu s pilinami je možné zistiť, že uprostred solenoidu (v jeho strednej časti), sú magnetické indukčné čiary rovnobežné s jeho osou – je tu homogénne magnetické pole. Orientáciu magnetických indukčných čiar určíme pomocou Ampérovho pravidla pravej ruky:

Pravú ruku položíme na cievku (závit) tak, aby pokrčené prsty ukazovali dohodnutý smer prúdu v závitoch cievky, a palec ukazuje orientáciu magnetických indukčných čiar v dutine cievky.

Magnetické pole cievky je podobné magnetickému polu tyčového magnetu. Magnetické indukčné čiary majú v okolí magnetu orientáciu $N \rightarrow S$. Podľa Ampérovho pravidla je severný pól na strane palca – je to spôsobené tým, že magnetické indukčné čiary sú uzavreté.

Pre veľkosť magnetickej indukcie vo vnútri veľmi dlhého solenoidu navinutého husto tenkým vodičom umiestneného v prostredí s permeabilitou μ platí vzťah (ktorý nie je možné odvodiť pomocou stredoškolskej matematiky):

$$B = \mu \frac{N \cdot I}{l}$$

kde I je prúd v cievke a N počet závitov časti cievky s dĺžkou l . Podiel $\frac{N}{l}$ udáva počet závitov na jednotku dĺžky a označuje sa ako hustota závitov.

1.1.8 „Špeciálne“ cievky

Ak je cievka tvorená jedným závitom (resp. sa jedná o cievku, ktorej dĺžka je vzhľadom k priemeru závitov zanedbateľná), potom pre veľkosť magnetickej indukcie v strede kruhového závitú s polomerom r , ktorým prechádza prúd I , platí:

$$B = \mu \frac{I}{2\pi r}$$

V praxi sa používajú cievky rôznych tvarov a konštrukcií. Výpočet veľkosti magnetickej indukcie týchto cievok nie je jednoduchý, ale vždy závisí od hustoty závitov a na prúde v cievke.

Technickým problémom je vytvorenie homogénneho magnetického pola. Pomerne slabé, skoro homogénne magnetické pole, môžeme získať dvojicou úzkych kruhových cievok so spoločnou osou, ich vzájomná vzdialenosť je rovná polomeru cievok. Nazývajú sa **Helmholtzove cievky** (pomenované podľa nemeckého lekára a fyzika Hermann von Helmholtza – 1821-1894), používajú sa napríklad vo **Wehneltovej trubici**, ktorá umožňuje pozorovať pohyb elektrónov v magnetickom poli.

Ďalej sa v praxi používajú špeciálne prstencové cievky (toroidy). Ak sú ich závit navinuté tesne vedľa seba, je magnetické pole sústredené len v dutine cievky a magnetické indukčné čiary majú tvar kružnice so stredom v ose prstenca. Magnetická indukcia má vo všetkých bodoch rovnakú veľkosť a platí pre ňu rovnaký vzťah ako pre solenoid.