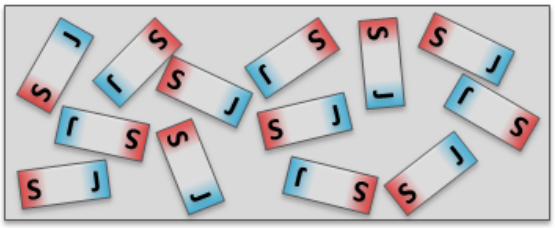
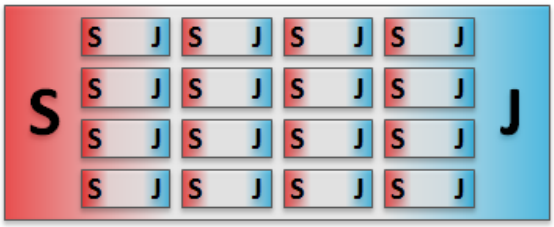
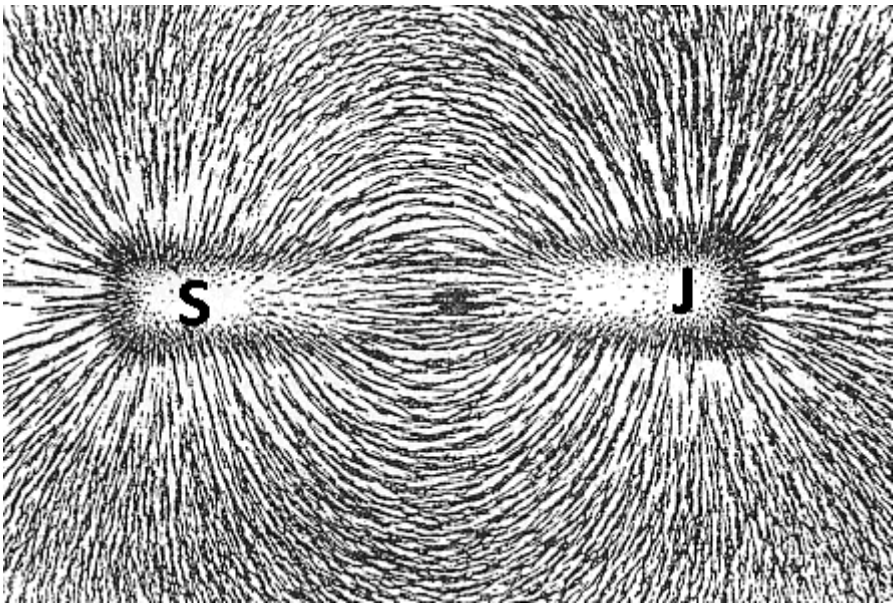
Magnetické pole

Vznik a zobrazení magnetického pole

Magnetické pole vzniká kolem pohybujících se **elektrických nábojů**. V případě **elektromagnetů** jde o **pohyb volných elektronů** (nosičů elektrického náboje) tvořený **elektrickým proudem**.
U **permanentních magnetů** je magnetické pole vytvářeno **pohybem elektronů** kolem jádra atomu. Pokud jsou směry těchto miniaturních (elementárních) magnetů náhodné, magnetická pole jednotlivých atomů se vyruší a materiál nevykazuje magnetické vlastnosti. Pokud jsou všechny uspořádané v jednom směru, **navzájem se sčítají** a materiál **trvale** (permanentně) vytváří **magnetické pole**.



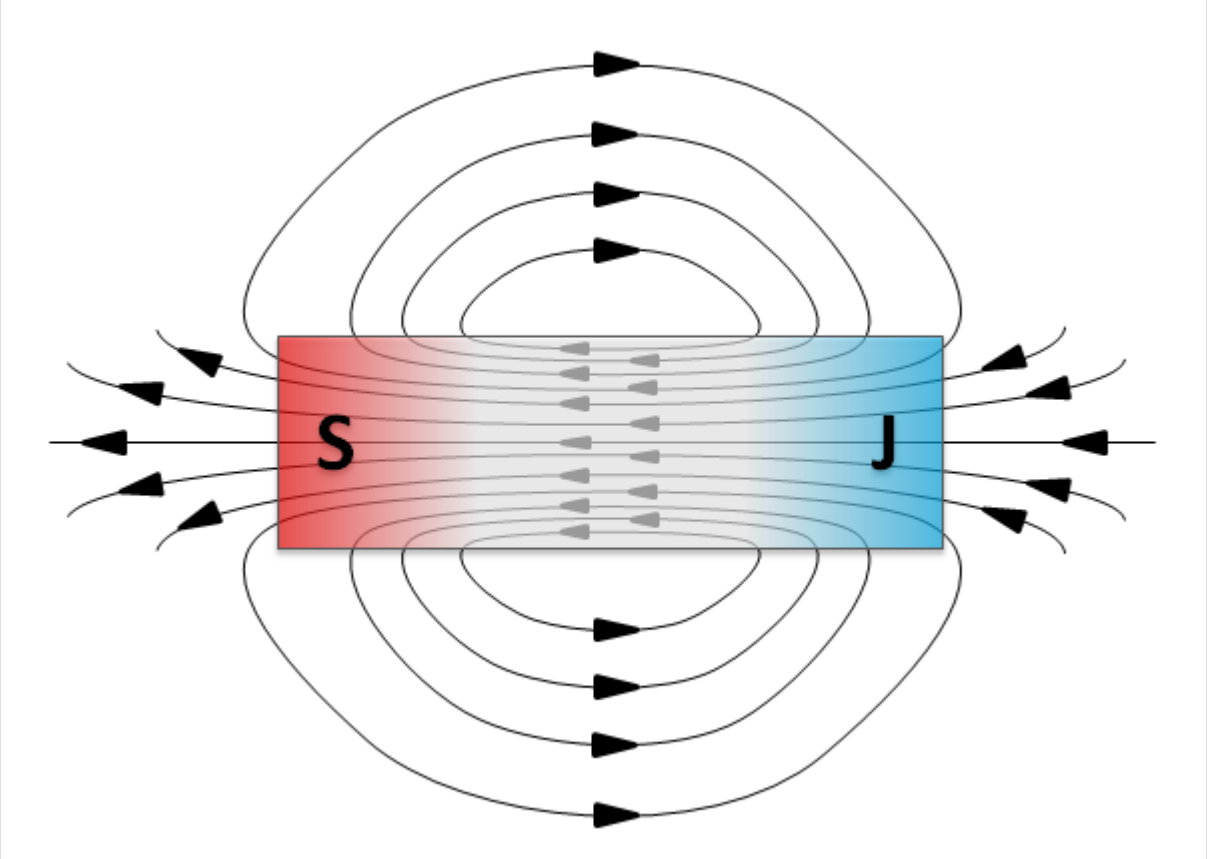




Magnetické pole se projevuje silovými účinky - magnety **přitahují železné kovy**.

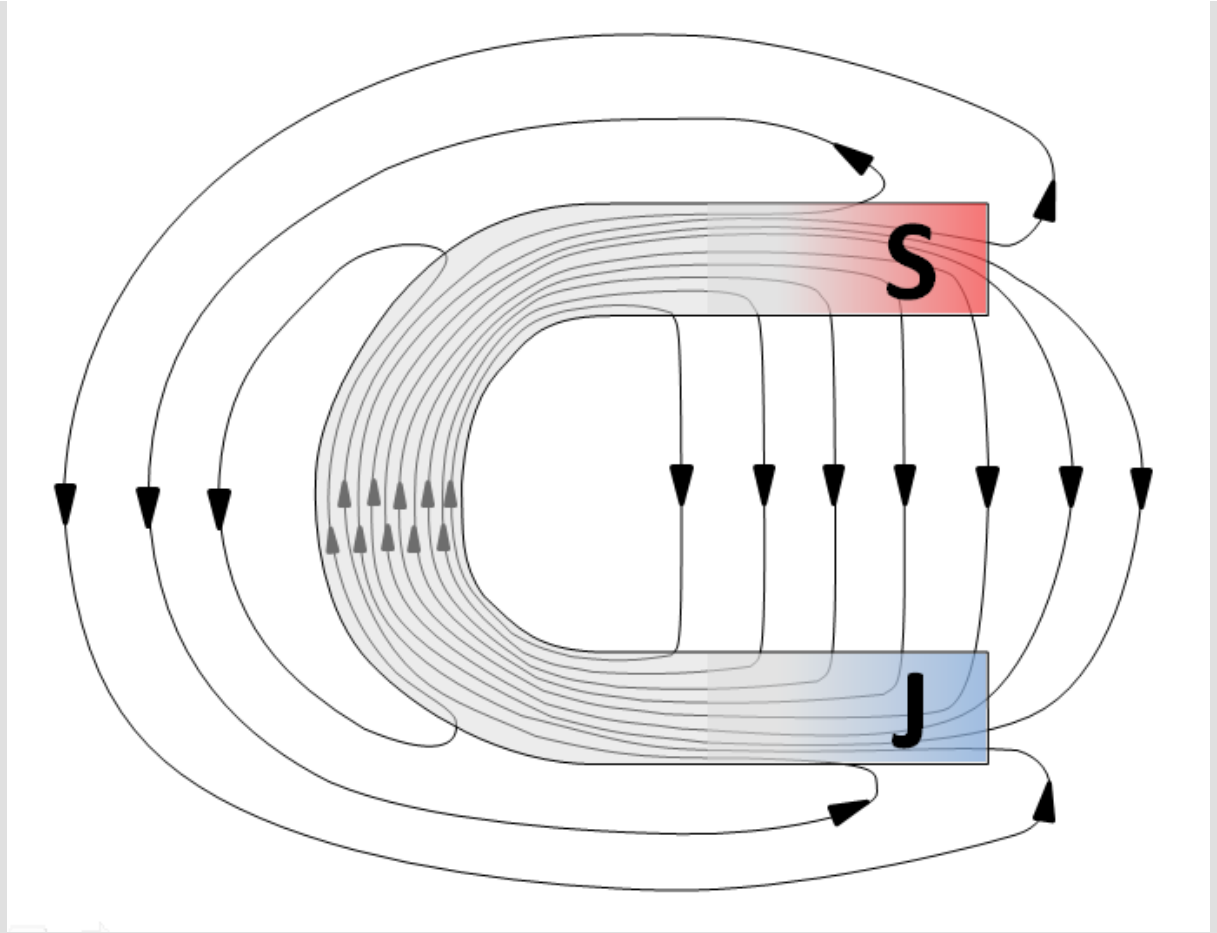
Magnetické pole zobrazujeme pomocí **magnetických indukčních čar** - které lze i skutečně vidět s pomocí železných pilin.

Permanentní magnety

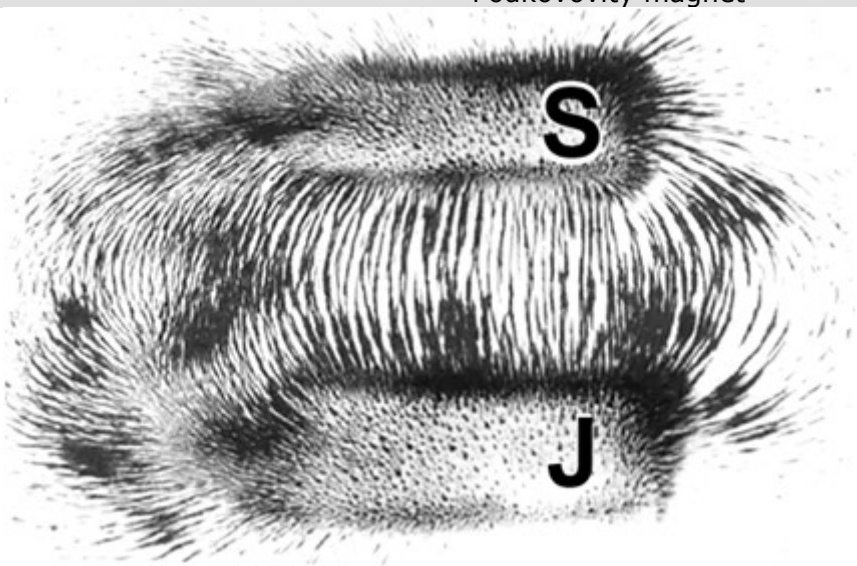


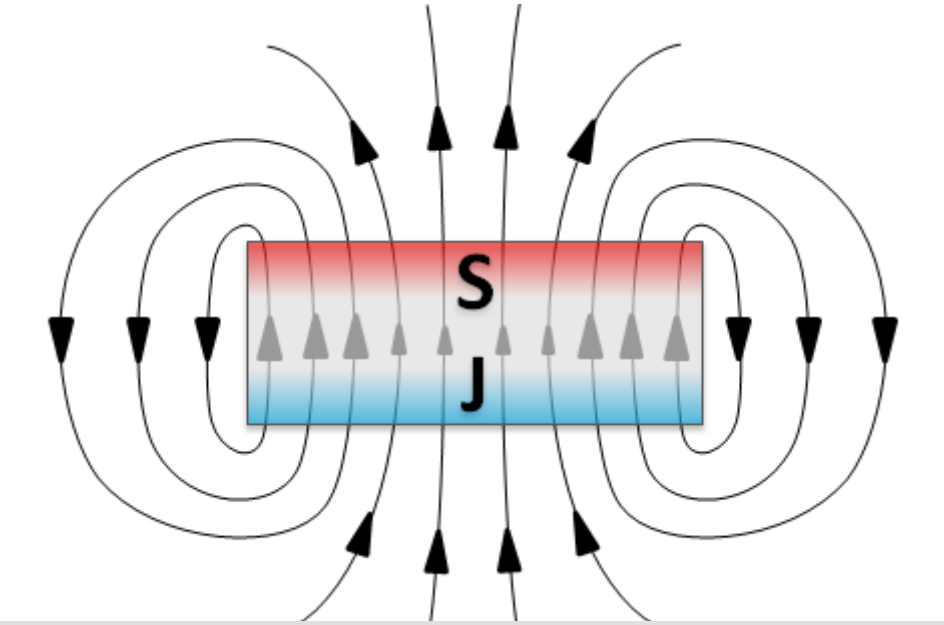
Tyčový magnet

Permanentní magnety mohou mít nejrůznější tvary. Silové účinky se projevují nejvíce na tzv. **pólech magnetu** - označovaných jako **Severní** a **Jižní** (anglicky North a South). **Rozpůlením** tyčového magnetu vzniknou dva nové magnety s **novými póly**. **Spojením** více magnetů vznikne nový magnet se **dvěma póly**, přičemž **silové účinky** jednotlivých magnetů se **sčítají.**
Magnetické indukční čáry vždy tvoří **uzavřené křivky**, procházející magnetem a vystupující u severního pólu do prostoru kolem magnetu, aby se do něj vrátily u jeho jižního pólu. Směr indukčních čar vyznačujeme **vně magnetu od severního k jižnímu pólu** (uvnitř magnetu od jižního k severnímu).



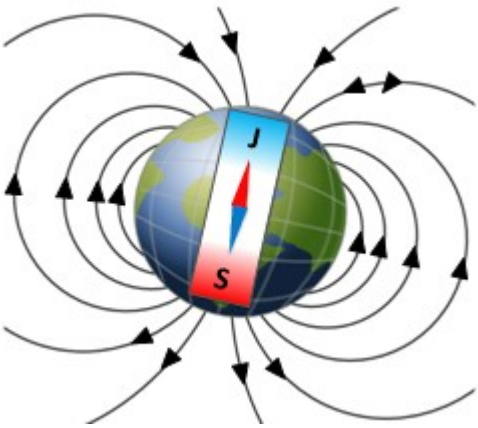
Podkovovitý magnet





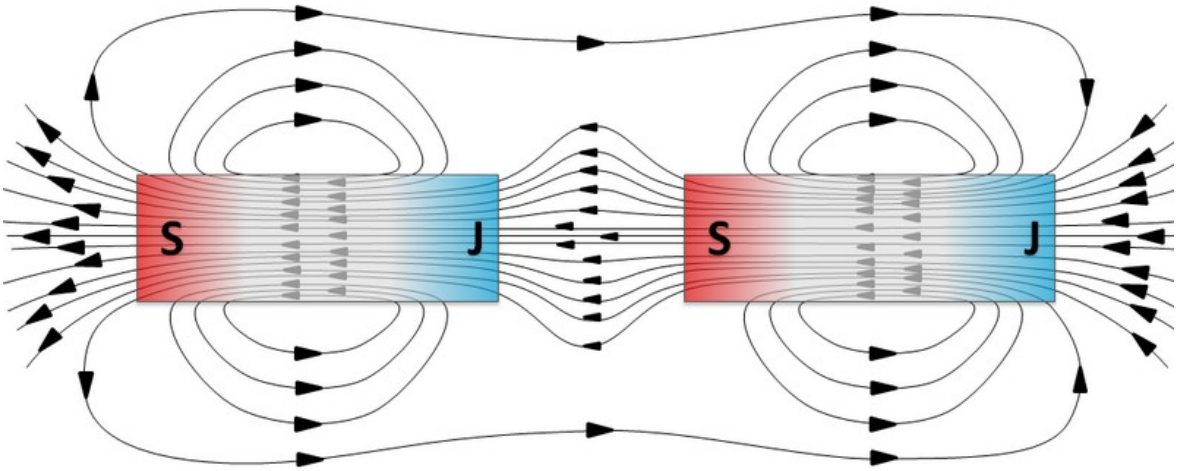
Knoflíkový magnet

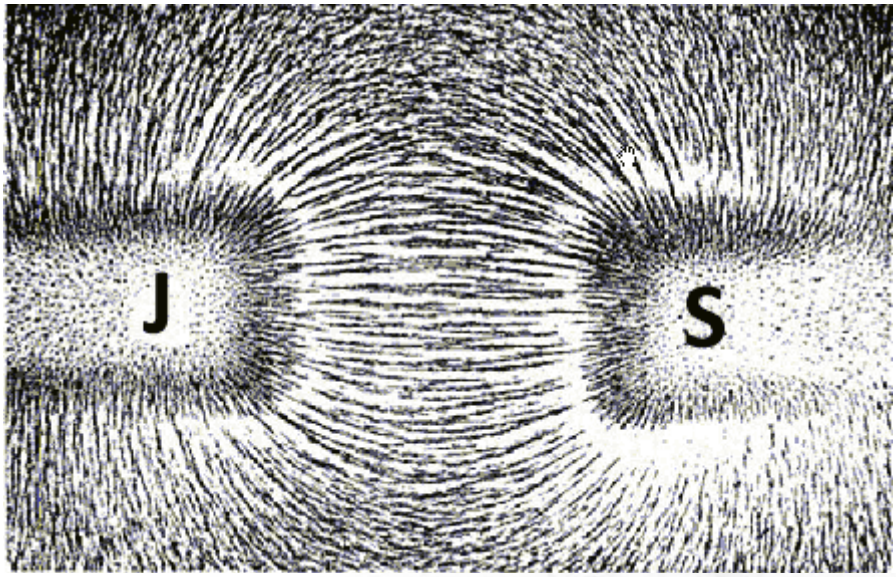
Označení pólů magnetů bylo odvozeno od **pólů zeměkoule**, která má také své **magnetické pole** (vytvářené otáčejícím se roztaveným železným jádrem země). Volně uchycené magnety (magnetické střelky kompasů) se ustálí tak, že jejich **severní pól** směřuje k **severu zeměkoule** (kde se nachází její jižní magnetický pól).

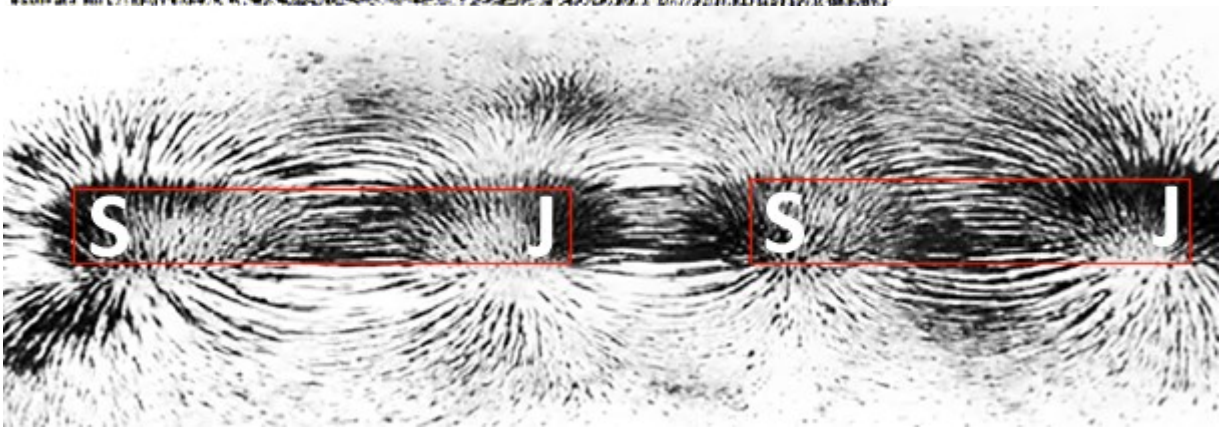


Dva magnety na sebe silově působí tak, že **souhlasné póly se odpuzují** a **opačné póly se přitahují**.

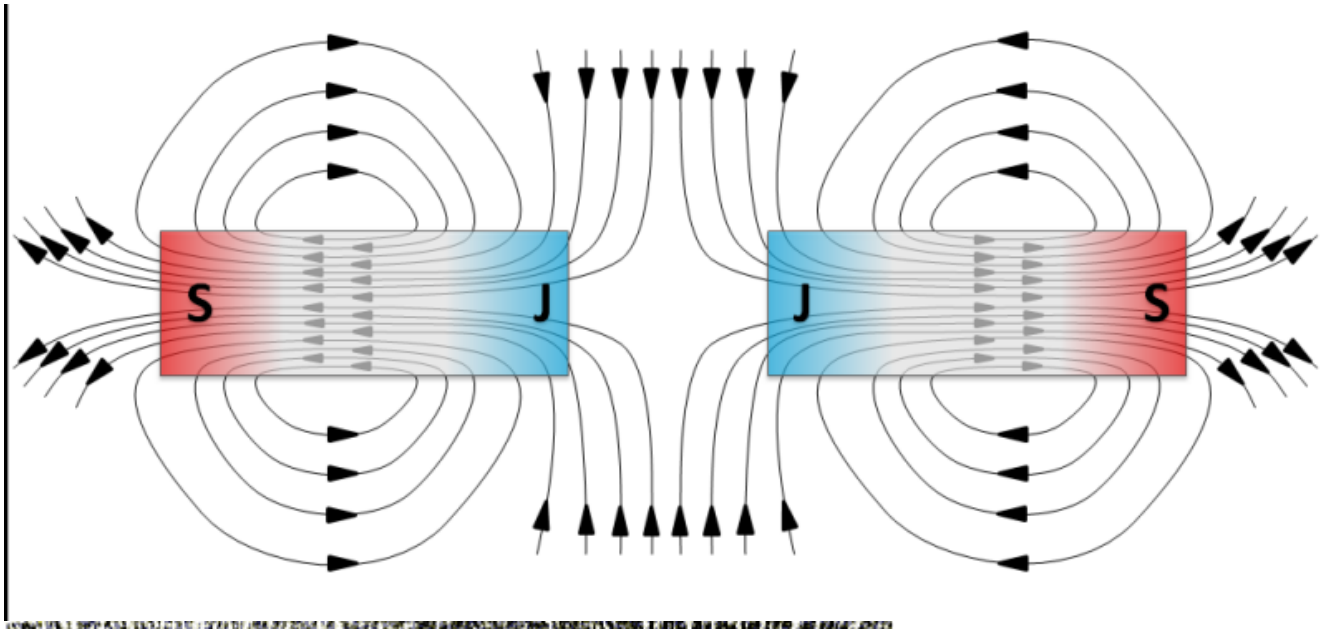
Dva tyčové magnety otočené k sobě opačnými póly se přitahují

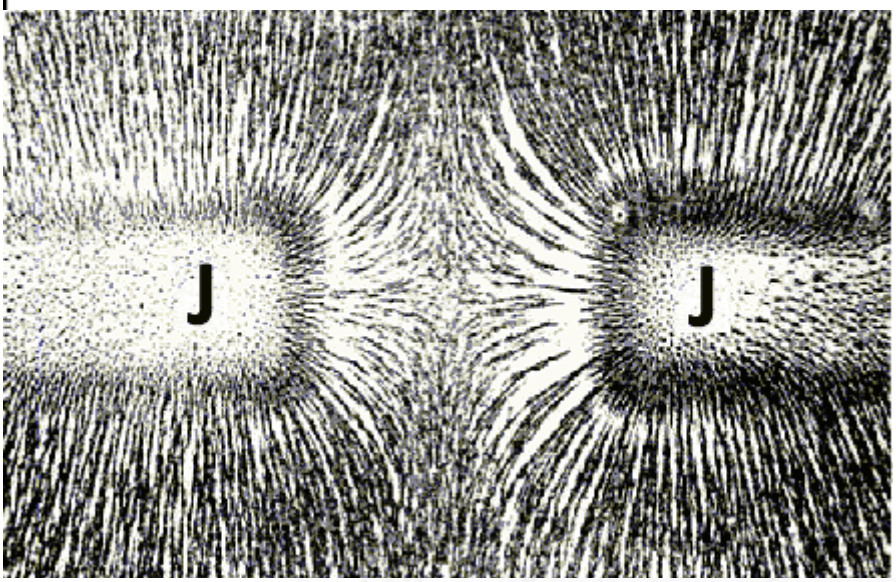


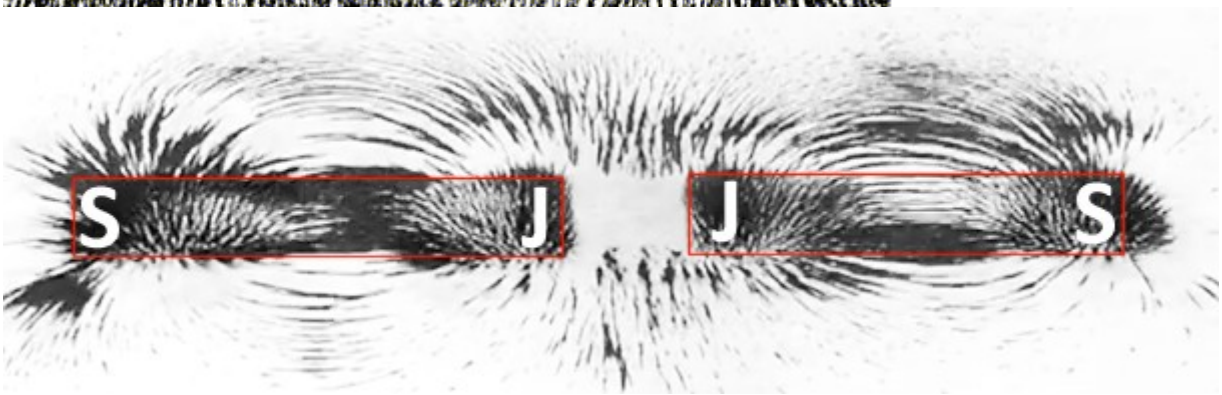




Dva tyčové magnety otočené k sobě souhlasnými póly se odpuzují



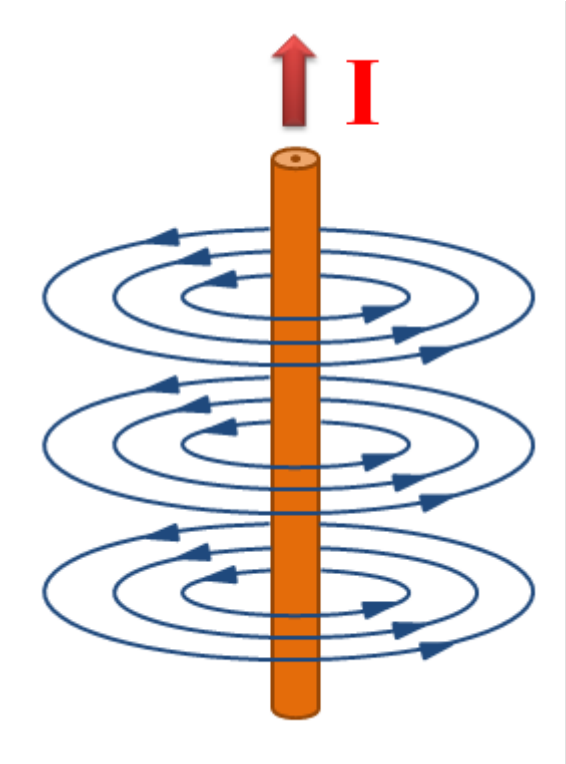




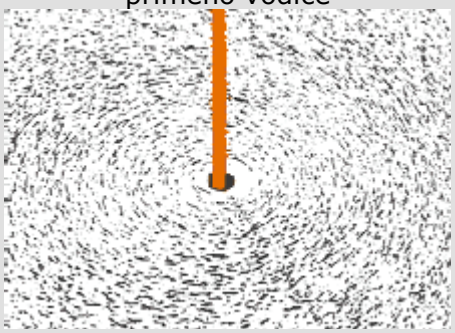
Magnetické pole tvořené elektrickým proudem

V okolí pohybujících se nosičů elektrického náboje ve vodiči vzniká **magnetické pole**. Jinými slovy, ve vodiči a v prostoru kolem vodiče protékaného proudem vzniká magnetické pole.

Magnetické pole v okolí přímého vodiče

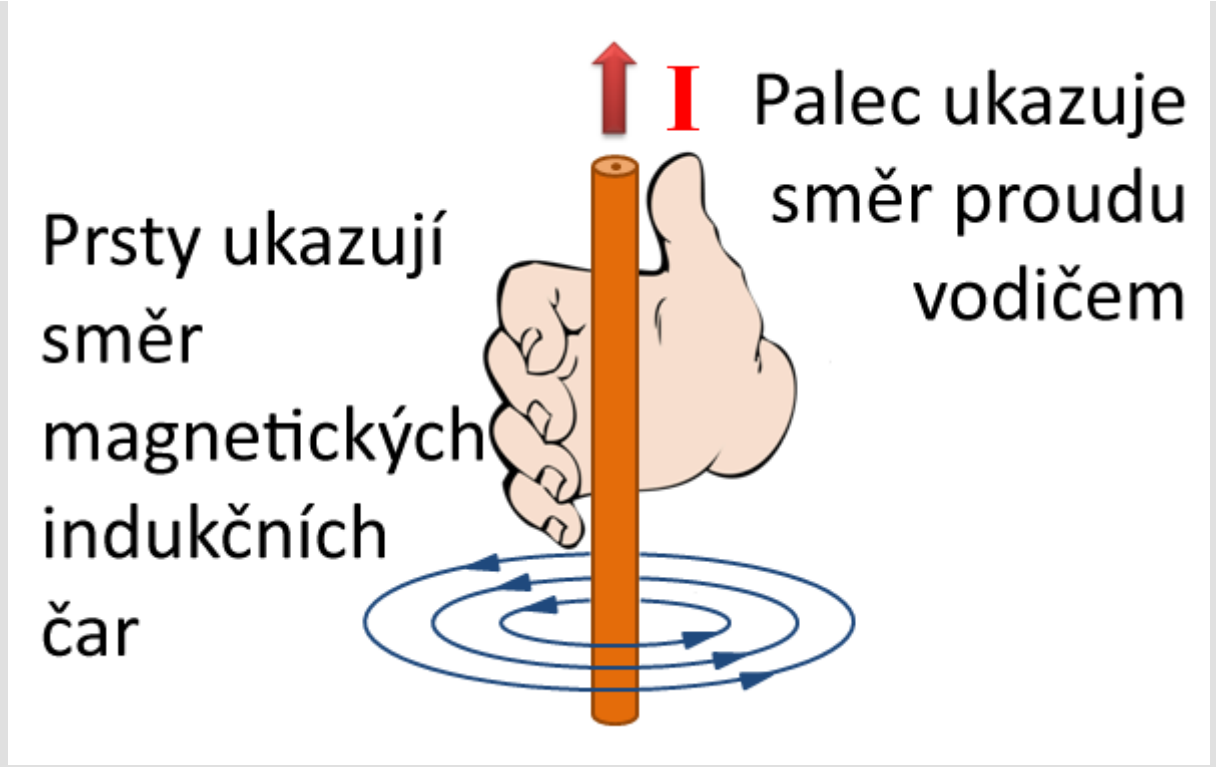


Magnetické pole přímého vodiče



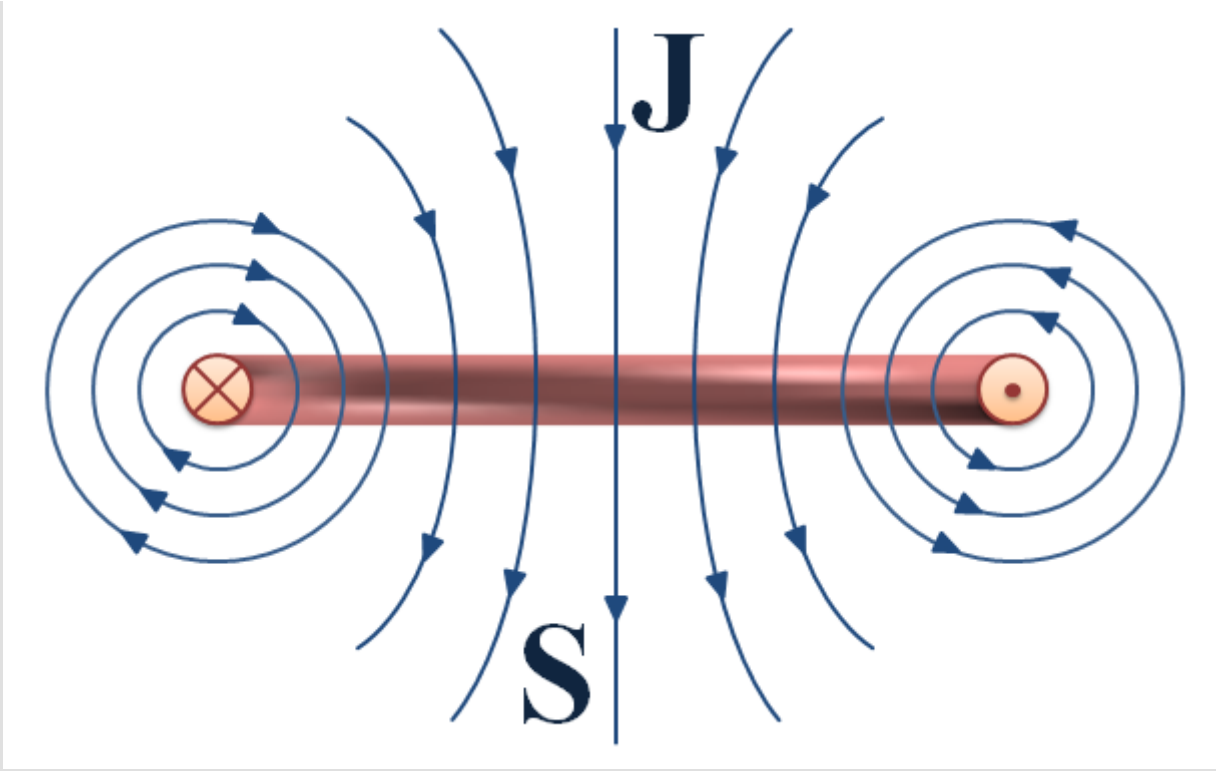
Zobrazení indukčních čar magnetického pole přímého vodiče pomocí pilin

Průchodem proudu vodičem vzniká magnetické pole, jehož magnetické indukční čáry mají tvar soustředných kružnic, které jsou orientovány dle **pravidla pravé ruky**.



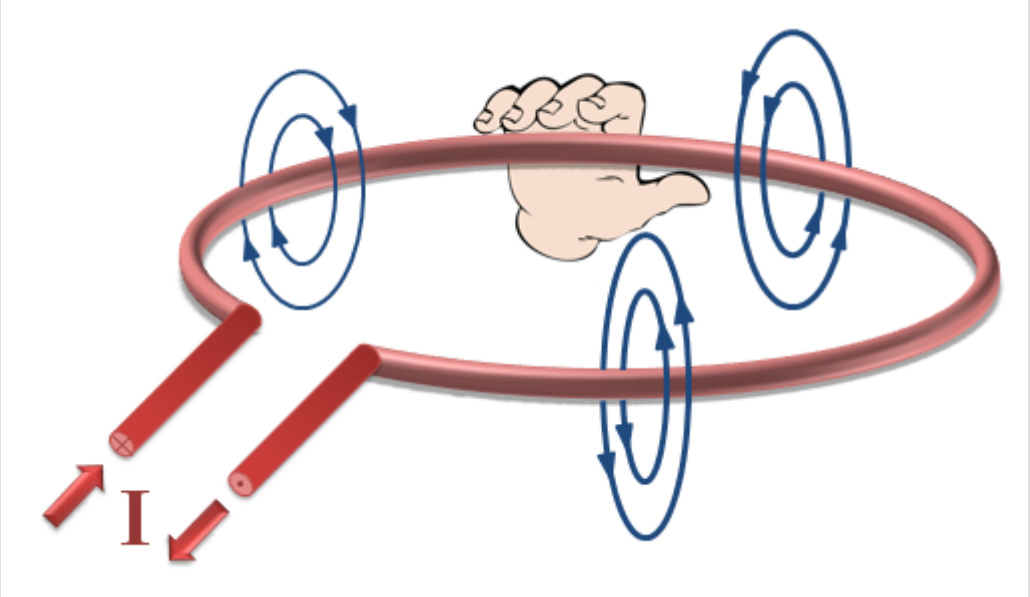
Pravidlo pravé ruky

Magnetické pole v okolí závitu

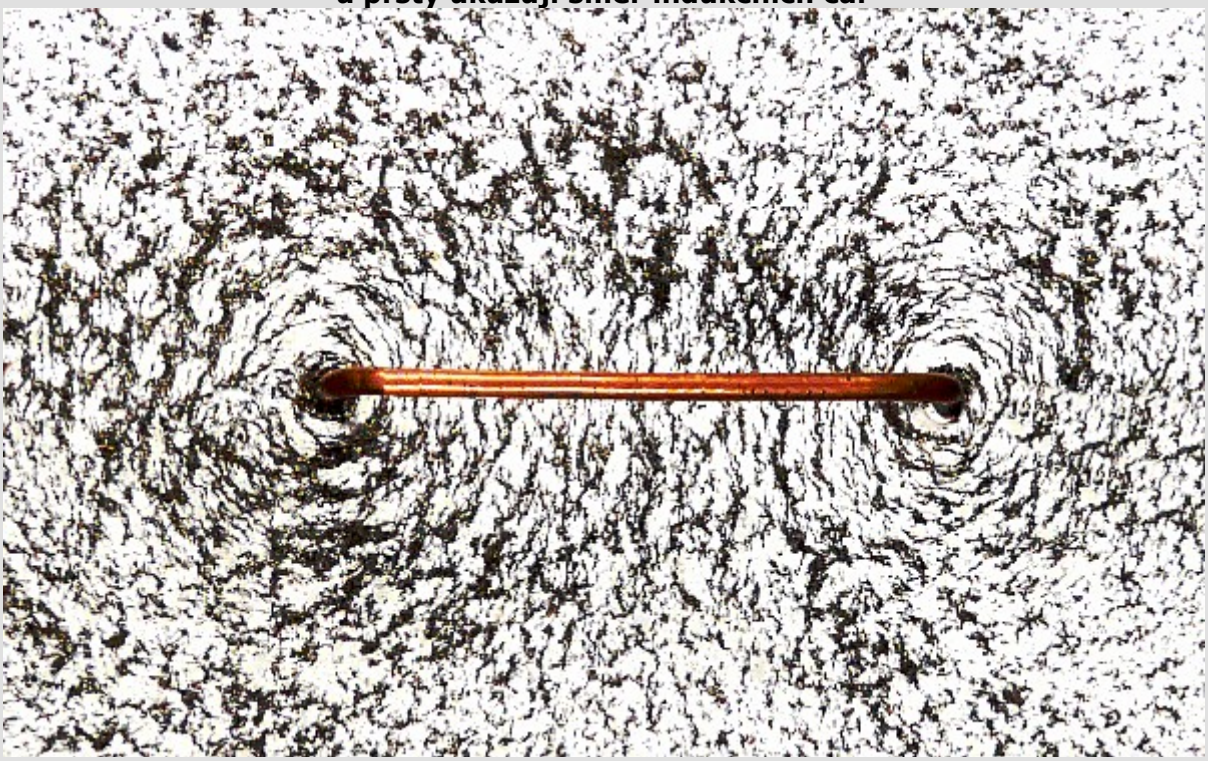


Magnetické pole v okolí závitu

Magnetické pole v okolí závitu je tvořeno sčítáním jednotlivých magnetických polí ve vnitřní části stočeného vodiče a podobá se magnetickému poli knoflíkového magnetu.

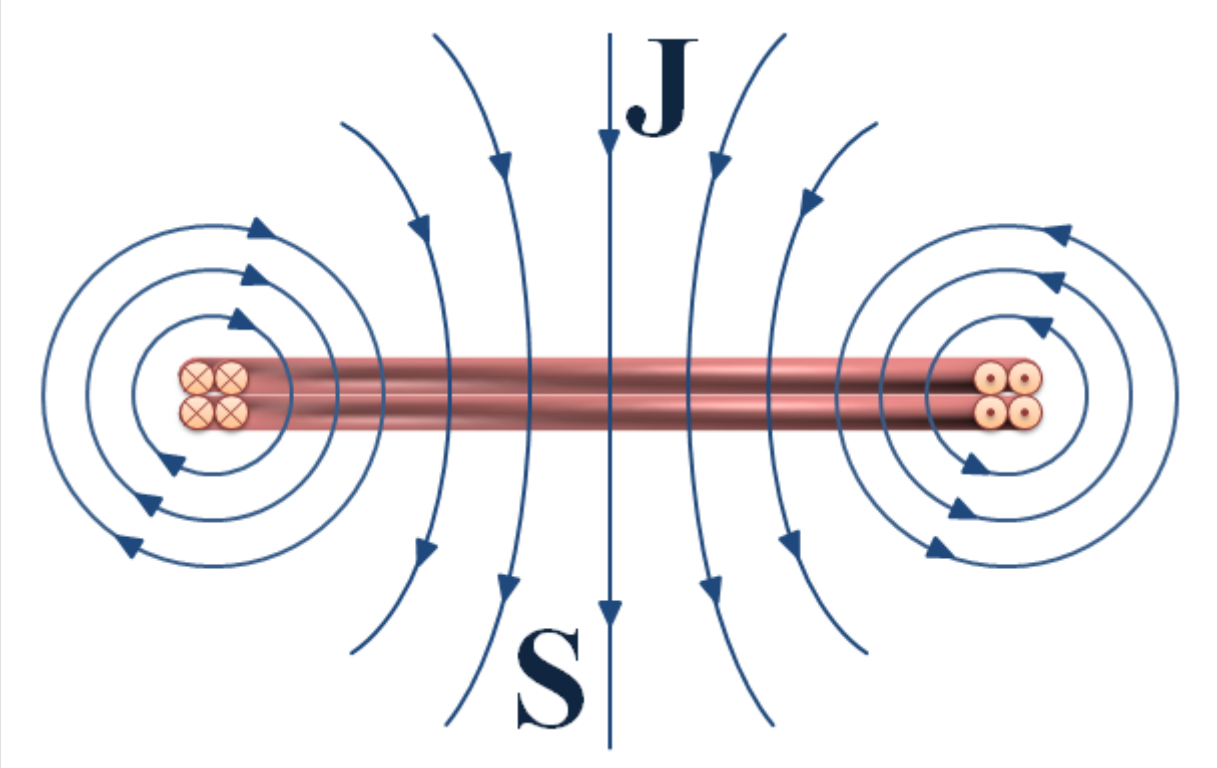


Určení směru magnetických indukčních čar
kolem stočeného vodiče (závitu)
Palec ukazuje směr proudu v závitu
a prsty ukazují směr indukčních čar



Zobrazení indukčních čar závitu pomocí pilin

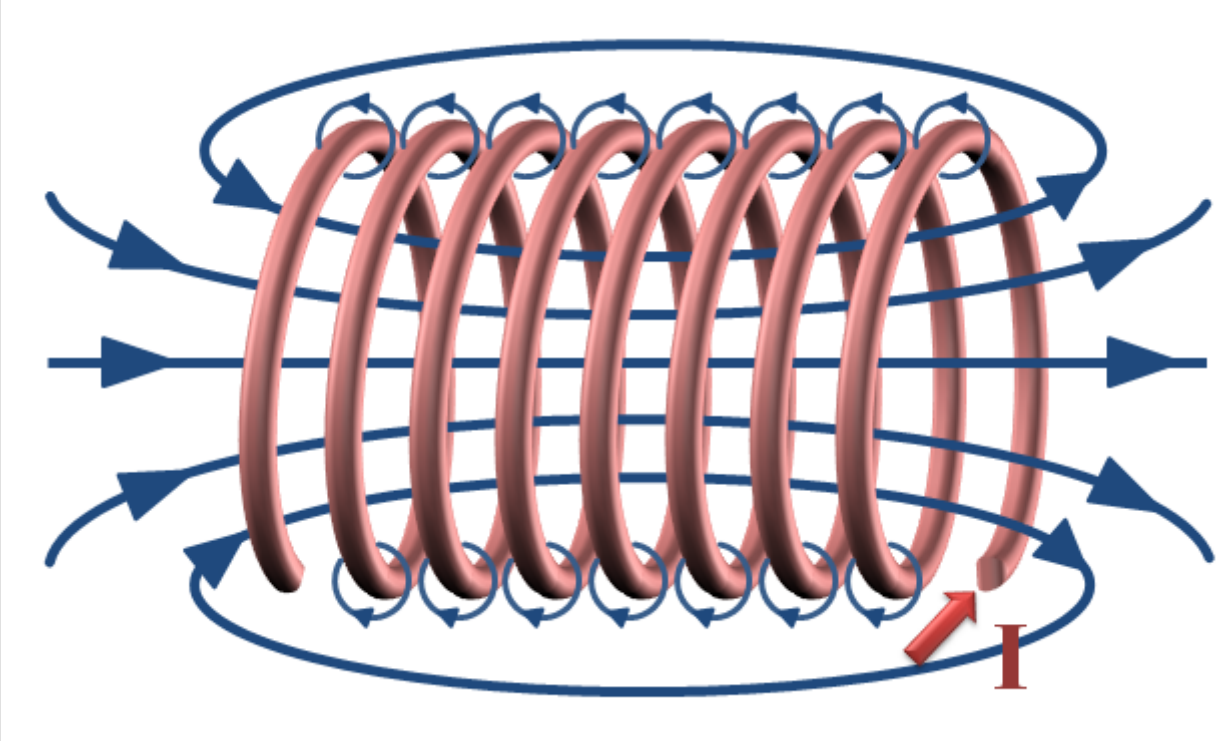
Magnetické pole v okolí tenké cívky



Magnetické pole v okolí tenké cívky

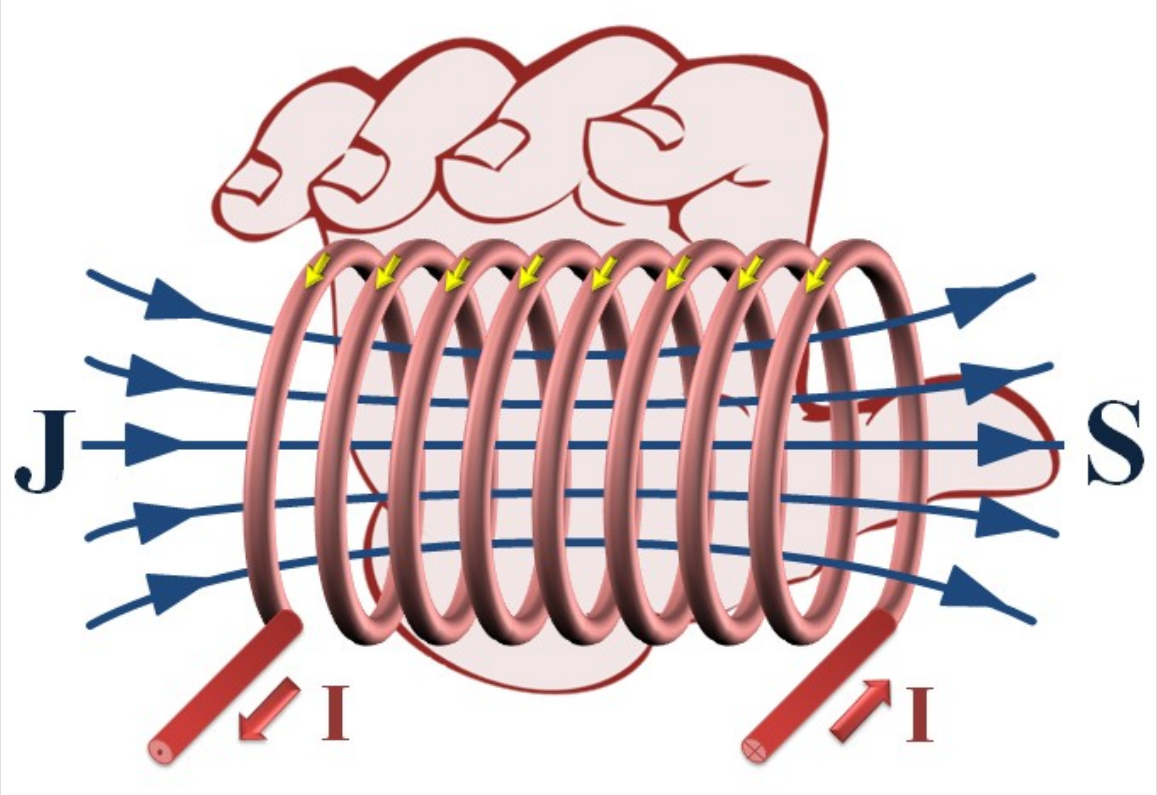
Magnetické pole v okolí tenké cívky je přibližně stejné jako v okolí jednoho závitu a odpovídá poli knoflíkového magnetu.

Magnetické pole v okolí dlouhé cívky (solenoidu)



Magnetické pole v okolí dlouhé cívky

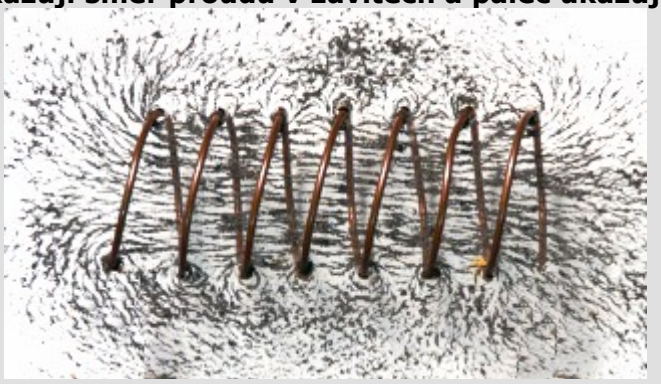
Magnetické pole v okolí cívky je tvořeno součtem magnetických polí jednotlivých závitů a podobá se magnetickému poli tyčového magnetu.



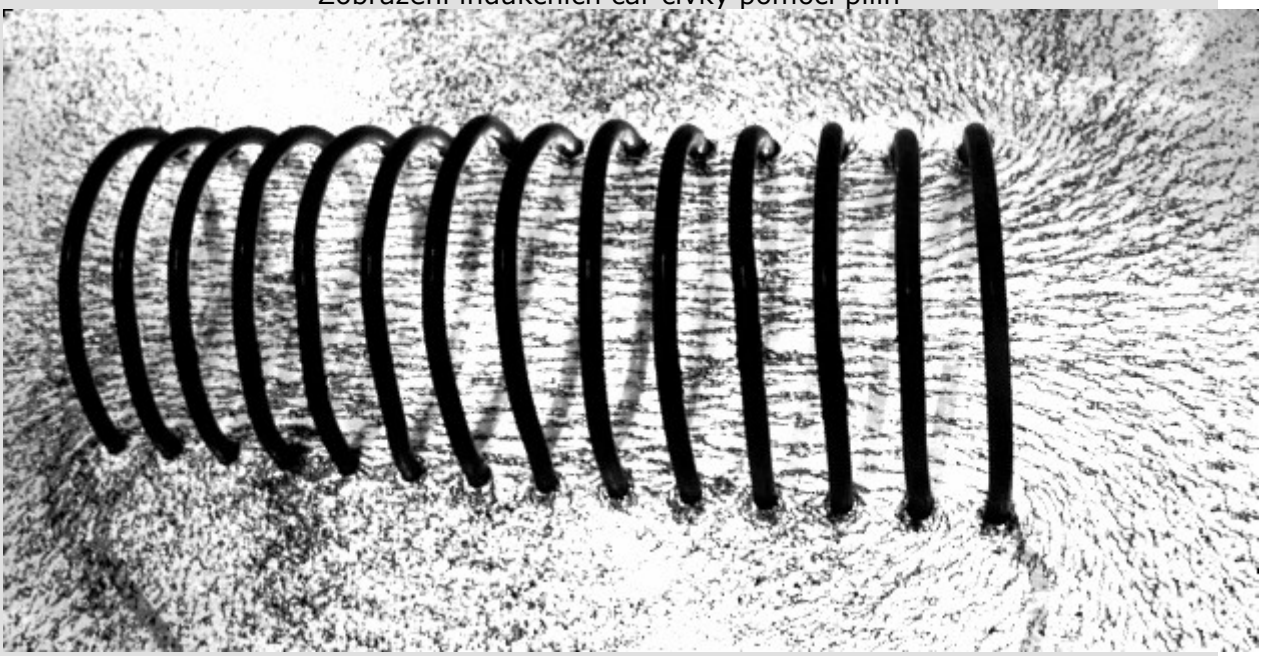
Pravidlo pravé ruky

Určení směru magnetických indukčních čar středem cívky

Prsty ukazují směr proudu v závitech a palec ukazuje Sever

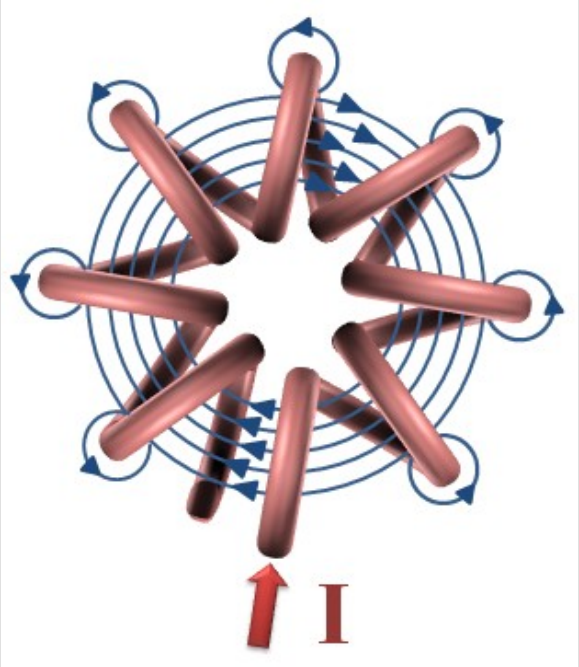


Zobrazení indukčních čar cívky pomocí pilin



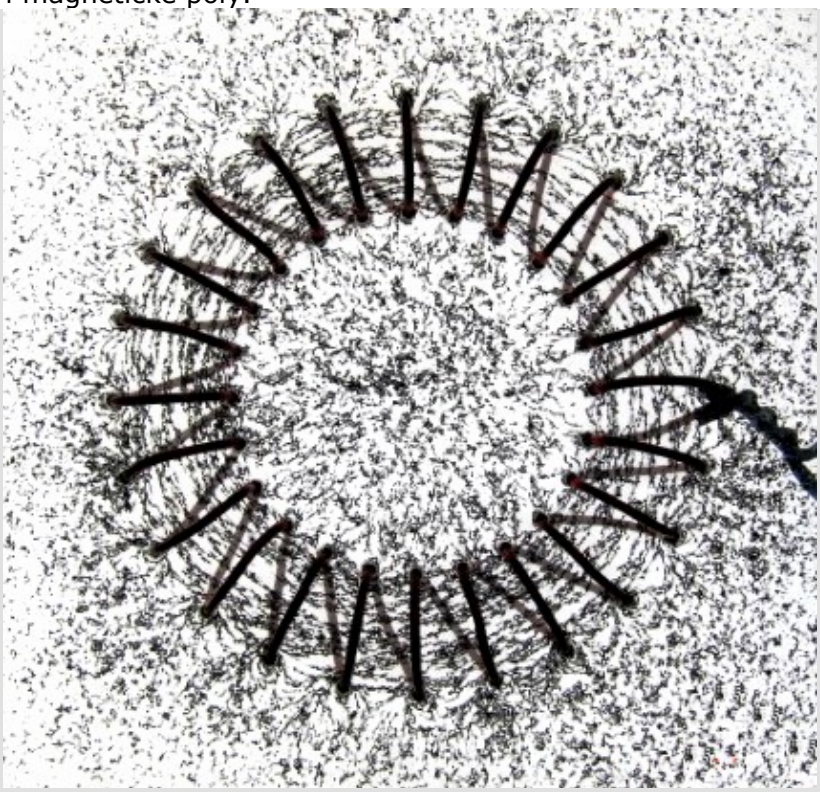
Zobrazení indukčních čar cívky pomocí pilin

Magnetické pole toroidní cívky



Magnetické pole toroidní cívky

Magnetické pole se vytváří především uvnitř cívky, do okolí se rozptýlí jen minimální část. Cívka nevytváří magnetické póly.



Zobrazení indukčních čar toroidní cívky pomocí pilin

Intenzita magnetického pole

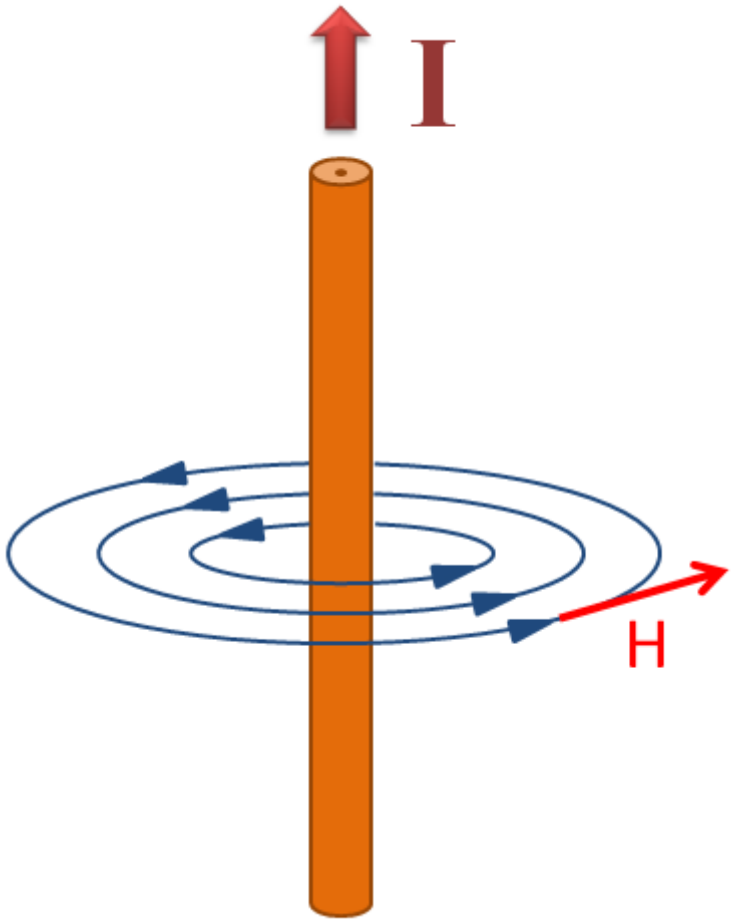
Magnetické pole se projevuje **silovými účinky**. Permanentní magnety se přitahují nebo odpuzují, taktéž vodiče a cívky, kterými protéká elektrický proud, vykazují silové účinky jak navzájem, tak na permanentní magnety nebo železné kovy. Tato síla se mění podle vzdálenosti magnetů.
Míru silového působení magnetického pole na myšlený kousek železa popisuje veličina **Intenzita magnetického pole** H. Pokud vodičem protéká proud I, v okolí vodiče vznikne magnetické pole vybuzené tímto protékajícím proudem zobrazované pomocí siločar, což můžeme popsat veličinou **Magnetické napětí** $U_m = I$.
Magnetické napětí se rozloží **po celé délce siločáry**, přičemž intenzita magnetického pole v určitém konkrétním místě je pak dána velikostí magnetického napětí na jednotku délky siločáry. Čím je **siločára delší**, tím **menší** bude **intenzita** a také **menší silové působení**.
Jednotkou pro magnetické napětí je A a pro intenzitu magnetického pole $A \cdot m^{-1}$.

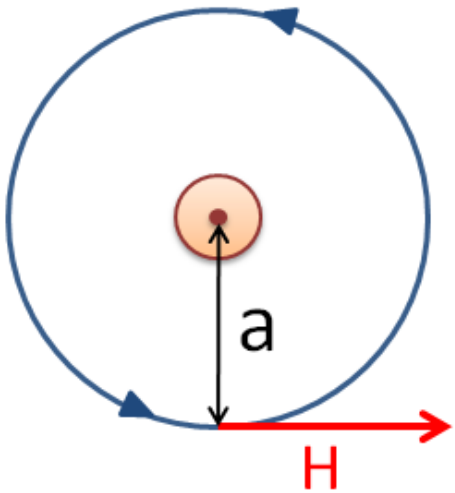
Intenzita magnetického pole je **vektor** a v daném místě má **směr** daný **tečnou k siločáře** a **směr** podle **orientace siločáry**.

Obecný vztah pro intenzitu magnetického pole tvořeného proudem I na siločáře o délce l:

$$H = \frac{U_m}{l} = \frac{I}{l} \quad (A \cdot m^{-1};\ A, m)$$

Magnetické pole v okolí přímého vodiče

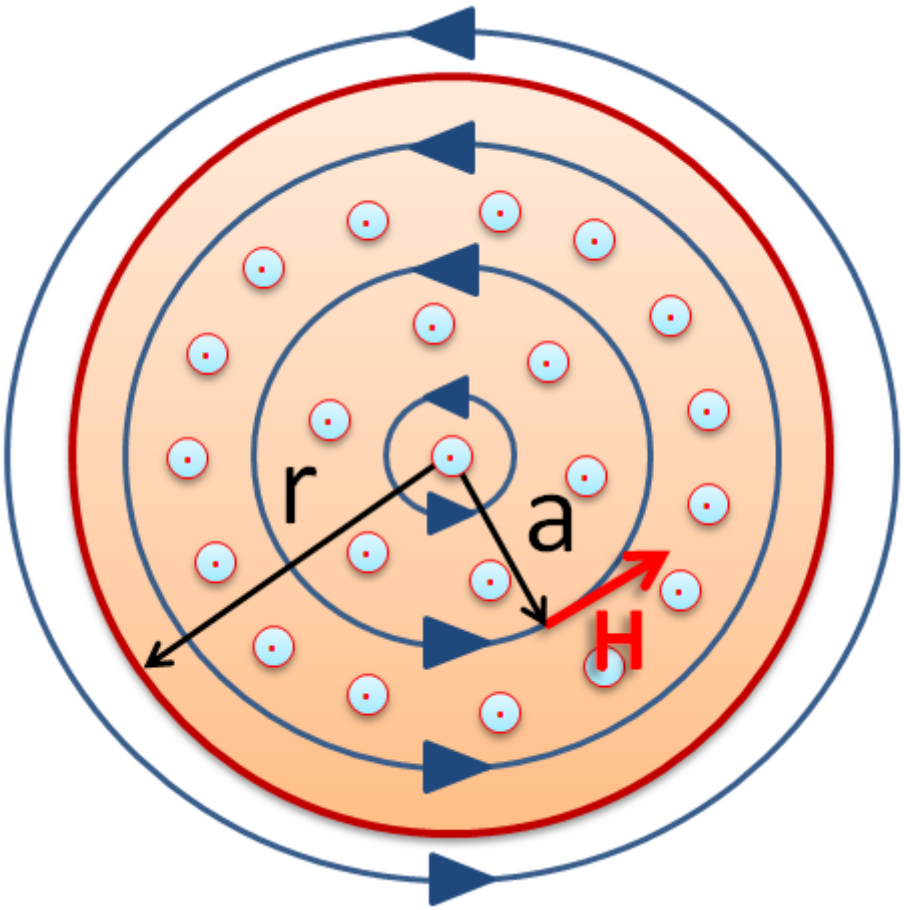




Siločáry magnetického pole kolem přímého vodiče mají tvar kružnice, takže délka siločáry ve vzdálenosti a od vodiče je $l=2\cdot\pi\cdot a$.

$$H = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot a} \; (A \cdot m^{-1};\; A, m)$$

Magnetické pole uvnitř vodiče



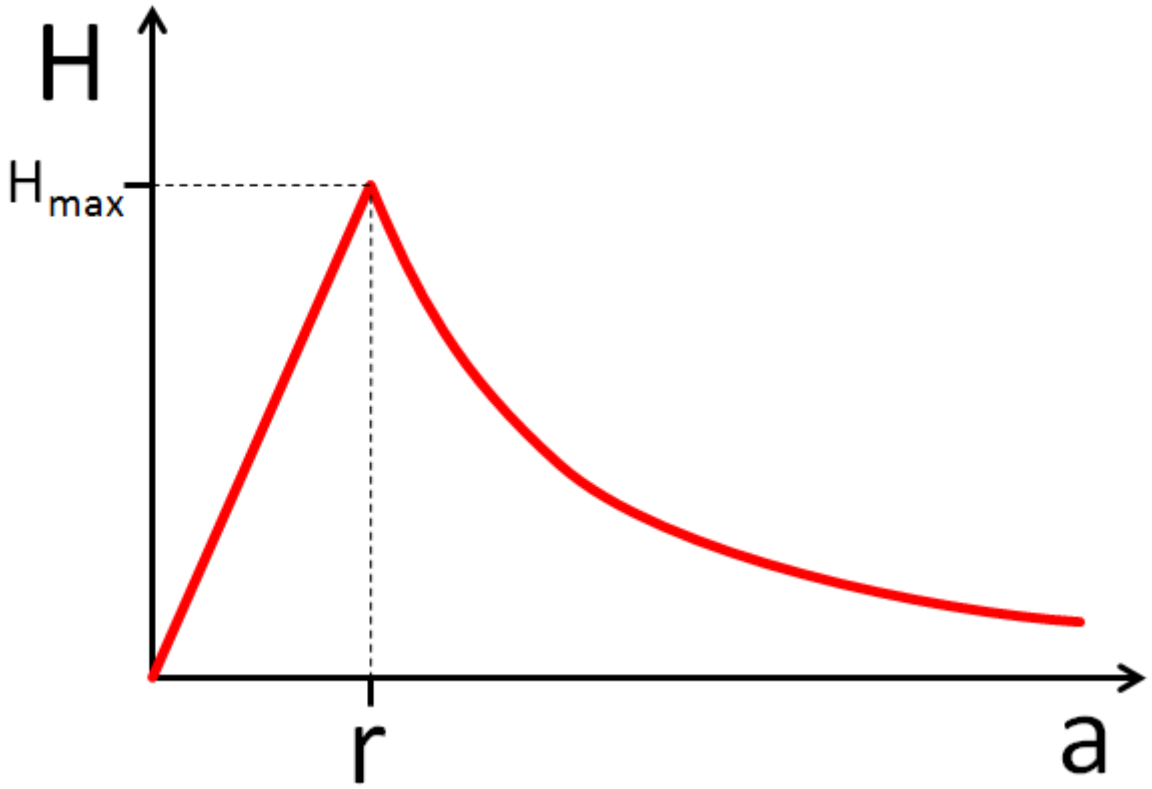
Uvnitř vodiče vzniká také magnetické pole a siločáry. Můžeme si představit, že magnetické pole na dané siločáře je tvořeno poměrným množstvím proudu protékajícího částí vodiče uvnitř této siločáry. Elektrický proud ve vodiči je rovnoměrně rozložen na ploše vodiče, což popisuje veličina proudová hustota J a poměrné množství proudu I_a uvnitř siločáry o poloměru a lze tedy spočítat $I_a = J \cdot S_a = J \cdot \pi \cdot a^2$

$$H = \frac{I_a}{2 \cdot \pi \cdot a} = \frac{J \cdot \pi \cdot a^2}{2 \cdot \pi \cdot a} = \frac{J \cdot a}{2} =$$

$$= \frac{\frac{I}{\pi \cdot r^2} \cdot a}{2} = \frac{I \cdot a}{2 \cdot \pi \cdot r^2}$$

$$H = \frac{I \cdot a}{2 \cdot \pi \cdot r^2} \; (A \cdot m^{-1};\; A, m)$$

Intenzita magnetického pole ve vodiči a kolem něho má takovýto průběh:

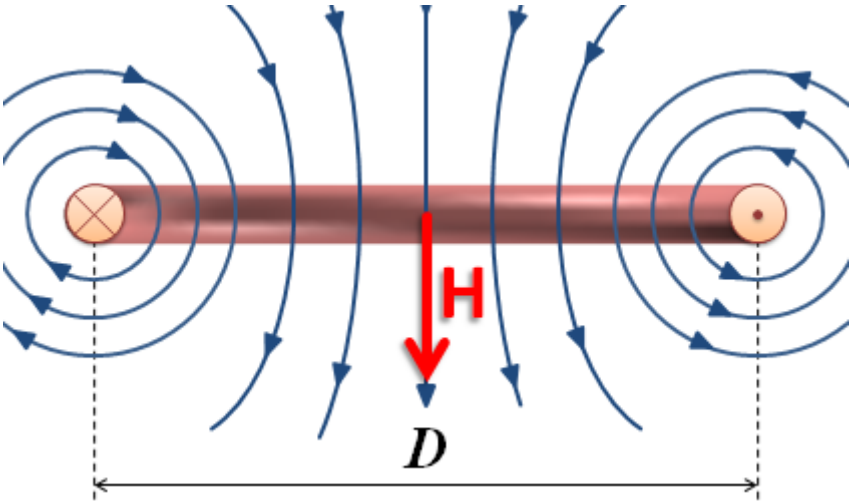


Uvnitř vodiče roste intenzita lineárně.

Maximální hodnota intenzity je na povrchu vodiče:

$$H_{max} = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

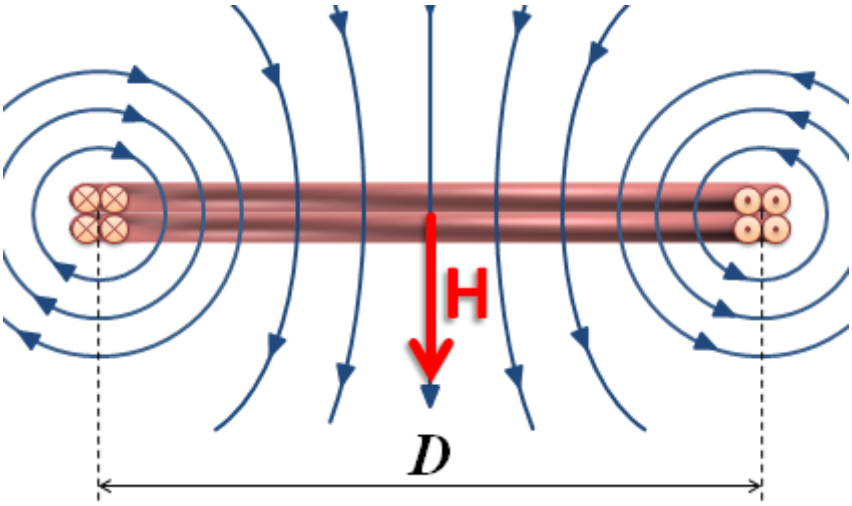
Magnetické pole uvnitř závitu



Výsledné magnetické pole je tvořeno součtem magnetických polí jednotlivých kousků vodiče. Nejsilnější pole je uprostřed závitu a hodnotu intenzity lze spočítat z odvozeného vzorce:

$$H = \frac{I}{D} \; (A \cdot m^{-1};\; A, m)$$

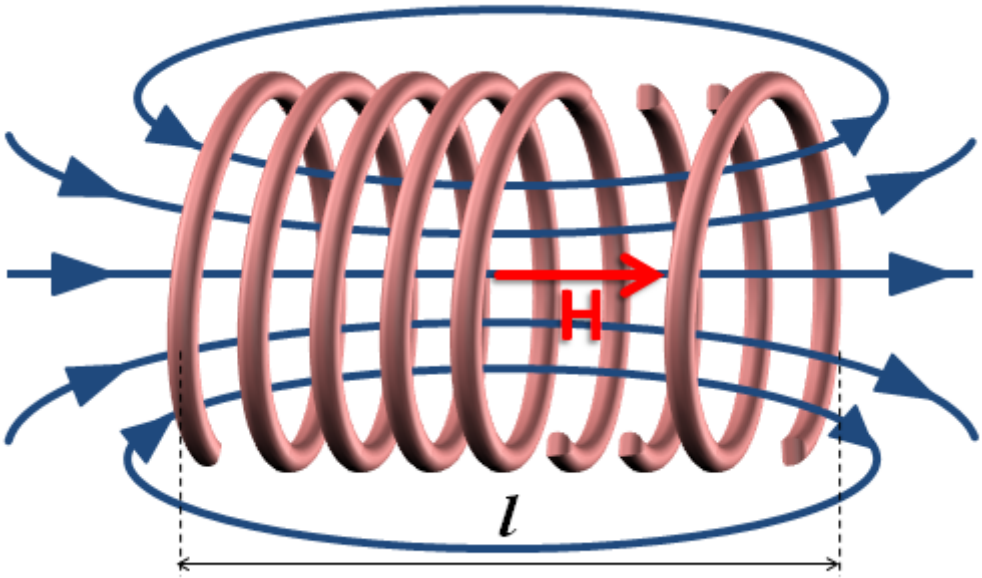
Magnetické pole uvnitř tenké cívky



Výsledné magnetické pole je opět tvořeno součtem magnetických polí jednotlivých kousků vodiče, přičemž pokud má **cívka N závitů**, takže uvnitř každé siločáry protéká proud I **N-krát**. Nejsilnější pole je uprostřed cívky a hodnotu intenzity lze spočítat z odvozeného vzorce:

$$H = \frac{N \cdot I}{D} \; (A \cdot m^{-1};\; A, m)$$

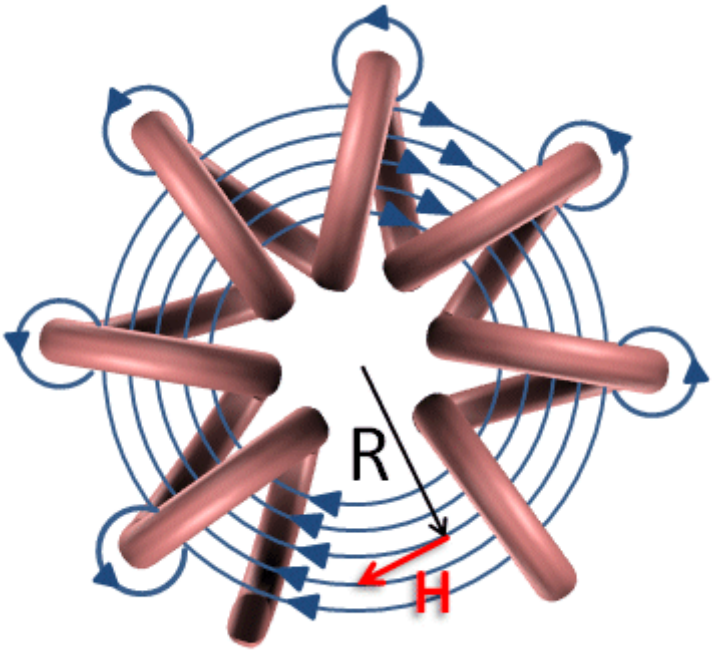
Magnetické pole uvnitř dlouhé cívky



Magnetické siločáry prochází vnitřkem cívky a uzavírají se ve volném prostoru kolem cívky. Pro přibližný výpočet intenzity magnetického pole uvnitř cívky, která má **N závitů**, stačí uvažovat délku části siločáry v **délce cívky** l, přičemž výsledné pole je dáno součtem polí tvořených jednotlivými závity.

$$H = \frac{N \cdot I}{l} \; (A \cdot m^{-1};\; A, m)$$

Magnetické pole uvnitř toroidní cívky



Toroidní cívka nemá sever a jih, většina magnetického pole je uzavřena uvnitř cívky a pro výpočet délky kruhové siločáry můžeme použít střední poloměr toroidu.

$$H = \frac{N \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot R} \; (A \cdot m^{-1};\; A, m)$$

Magnetická indukce

Intenzita magnetického pole je **nezávislá na prostředí**, ve kterém se magnetické pole nachází. Silové účinky se ale podle prostředí mění. **Vliv prostředí** se liší podle **typu látky**. Některé látky magnetické pole ovlivňují velmi málo, jiné (například železné kovy) ho **zesilují** - tím že se samy zmagnetují, zesilují výsledné pole a **zvětšují hustotu siločar**.

Míru silových účinků magnetického pole v různých prostředích popisuje veličina **Magnetická Indukce B**. Jednotkou magnetické indukce je T (Tesla). **Magnetická indukce** je opět **vektor** a má stejný směr i orientaci jako intenzita magnetického pole. Magnetickou indukci je možné také chápat jako **hustotu siločar magnetického pole** v ploše kolmé na siločáry v daném prostředí.

$$B = \mu \cdot H \ (T;\ H \cdot m^{-1}, A \cdot m^{-1})$$

Vliv prostředí reprezentuje veličina **Permeabilita** μ, kterou můžeme chápat jako měrnou magnetickou vodivost látek (jak snadno magnetické pole prostupuje daným prostředím). **Absolutní permeabilita** se skládá z **permeability vakua** a bezrozměrné **relativní permeability** prostředí.

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad (H \cdot m^{-1})$$

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \ (H \cdot m^{-1})$$

Dělení látek podle vlivu na magnetické pole

Většina látek magnetické pole neovlivňují, nebo jen velmi málo.

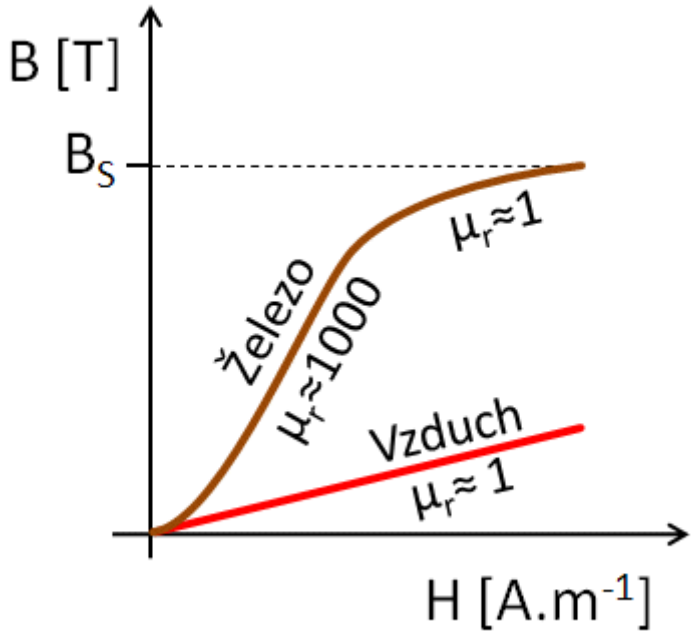
Diamagnetické látky mají relativní permeabilitu jen o něco málo menší než 1 a vnější magnetické pole **mírně zeslabují**, jako například voda nebo měď.

Paramagnetické látky mají relativní permeabilitu o něco málo větší jak 1 a magnetické pole **mírně zesilují**, jako například kyslík nebo hliník, ale bez vnějšího pole neudrží vlastní magnetismus.

Feromagnetické látky mají relativní permeabilitu mnohem větší jak 1 a magnetické pole **hodně zesilují**, jako například železo nebo kobalt. Tylo látky lze více či méně zmagnetovat, neboli po odstranění vnějšího magnetického pole vykazují **permanentní magnetické vlastnosti**.

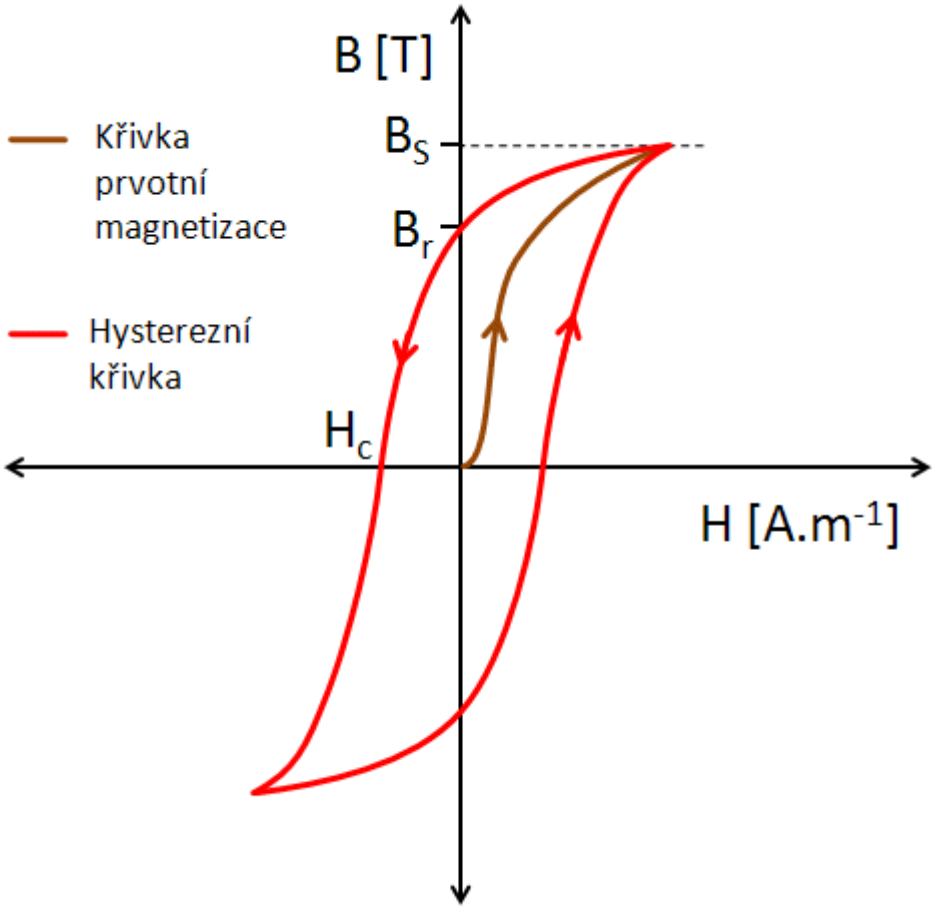
Typ látky	Látka	μ_r Relativní permeabilita
Diamagnetická	Voda	0,999 991
	Měď	0,999 990
Paramagnetická	Kyslík	1,000 001 86
	Hliník	1,000 023
Feromagnetická	Železo	300 - 10 000
	Kobalt	80 - 200

Hysterezní křivka

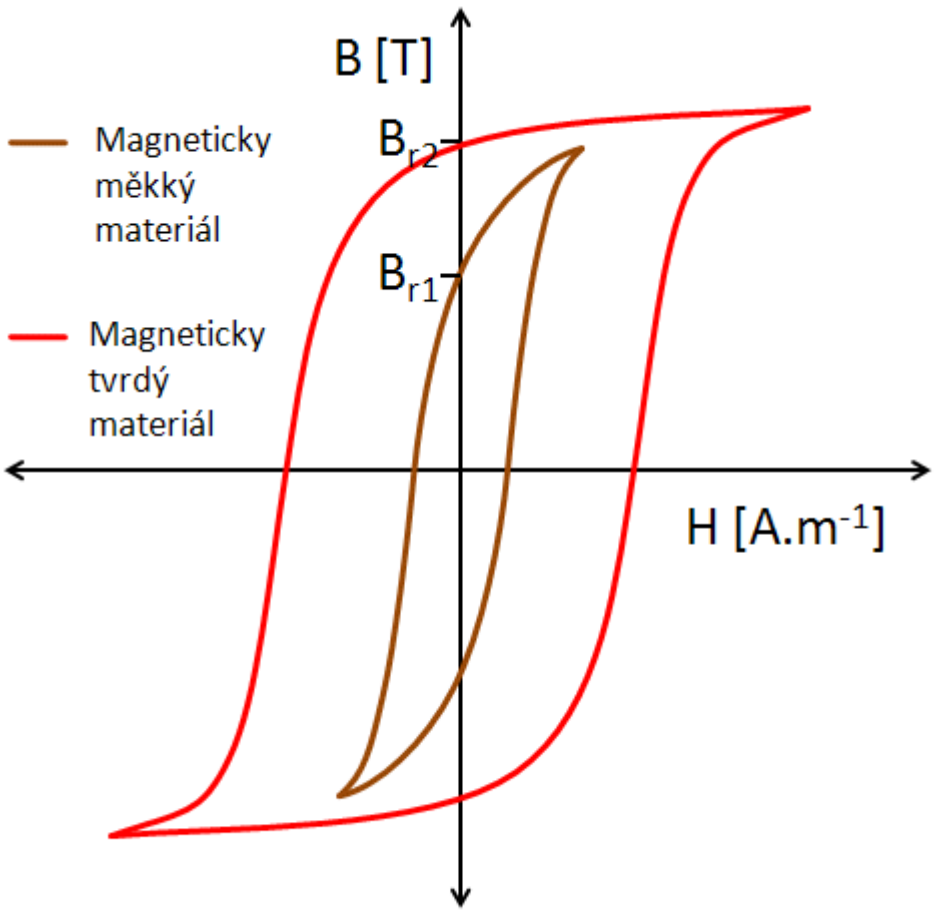


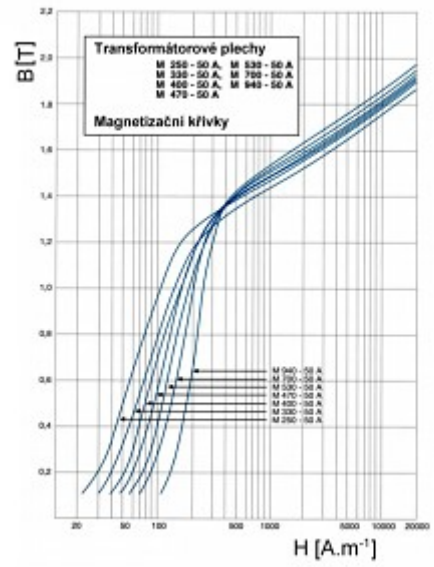
Feromagnetické materiály se ve vnějším magnetickém poli chovají tak, že nízké intenzity vnějšího pole nezvládnou natočit vnitřní magnety a materiál se chová spíše jako paramagnetický $\mu_r \approx 1$. Pokud intenzita vzroste natolik, že se vnitřní magnety začnou natáčet, materiál bude zesilovat vnější magnetické pole $\mu_r >> 1$.
Pokud intenzita bude dále růst, při maximální hodnotě už se všechny vnitřní magnety natočí - dojde k magnetickému nasycení při indukci $\mathbf{B_S}$ - materiál se opět jeví jako paramagnetický a dále už magnetické pole nezesiluje. To znamená, že **permeabilita feromagnetických materiálů není konstanta**, ale mění se **podle intenzity vnějšího magnetického pole**.
Grafické vyjádření této závislosti se nazývá **křivka prvotní magnetizace**.

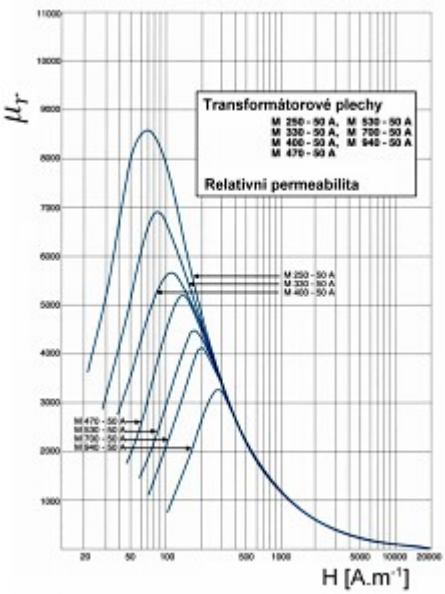
Když bude intenzita vnějšího pole klesat, podle typu materiálu se některé vnitřní magnety opět natočí náhodně, ale některé zůstanou ve směru vnějšího magnetického pole a materiál vykazuje **zbytkový (remanentní) magnetismus $\mathbf{B_r}$**. Pro vynulování zbytkového magnetismu je zapotřebí intenzita $\mathbf{H_C}$.
Pokud se orientace vnějšího magnetického pole otočí, vnitřní magnety se musí také obrátit, což způsobí, že bude zapotřebí větší hodnota intenzity vnějšího pole, než u prvotní magnetizace.
Grafické vyjádření tohoto chování feromagnetického materiálu se nazývá **hysterezní křivka**



Čím víc je materiál zmagnetovatelný (magneticky tvrdší), tím širší je jeho hysterezní křivka a tím také větší hodnota $\mathbf{B_r}$.







Výrobci udávají v katalogových listech magnetizační charakteristiky, ze kterých se při výpočtech odečítají skutečné hodnoty intenzity, nebo indukce. Viz například magnetizační charakteristiky transformátorových plechů. Případně mohou být uvedeny i závislosti permeability na intenzitě magnetického pole.

Magnetický tok

Magnetické pole můžeme chápat jako obdobu elektrického pole. **Magnetické napětí** tvořené průchodem proudu vodičem vybudí v okolním prostředí **magnetický tok** ve formě siločar. **Celkové množství siločar** procházejících danou plochou kolmou na siločáry (neboli magnetický tok touto plochou) můžeme určit z hustoty siločar, neboli z magnetické indukce.

$$\phi = B \cdot S \ (Wb;\ T, m^2)$$

Magnetické obvody a jejich řešení

Pokud do předchozího vztahu dosadíme veličiny magnetického pole, můžeme odvodit tzv. **Hopkinsonův zákon**, což je obdoba Ohmova zákona pro magnetické obvody:

$$\phi = B \cdot S = \mu \cdot H \cdot S = \mu \cdot \frac{U_m}{l} \cdot S$$

$$U_m = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{S} \cdot \phi = R_m \cdot \phi$$

$$U_m = R_m \cdot \phi \ (A;\ H^{-1}, Wb)$$

Veličina **Magnetický odpor** $\mathbf{R_m}$ udává, jak se dané prostředí o měrné magnetické vodivosti **μ** brání průchodu magnetického pole plochou **S** a délkou siločáry **l**.

$$R_m = \frac{1}{\mu} \cdot \frac{l}{S} (H^{-1}; H \cdot m^{-1}, m, m^2)$$

Výpočet magnetického obvodu

Pokud magnetický tok prostupuje více prostředími, pro výpočty můžeme použít náhradu pomocí elektrického obvodu složeného z magnetických zdrojů napětí (vodičů a cívek protékaných proudem) a magnetických rezistorů (prostředí kladoucí větší či menší odpor magnetickému poli). Pokud magnetický tok protéká feromagnetickými materiály, při řešení se musí uvažovat s proměnnou hodnotou permeability a odečítat hodnoty indukce nebo intenzity z magnetizačních charakteristik.

Energie MP

Elektrický proud po zapnutí během vytváření magnetického pole kolem vodiče vykonává práci. Do prostoru kolem vodiče se tak nahromadí energie:

$$W_m = \frac{1}{2} \cdot \phi \cdot U_m (J; Wb, A)$$

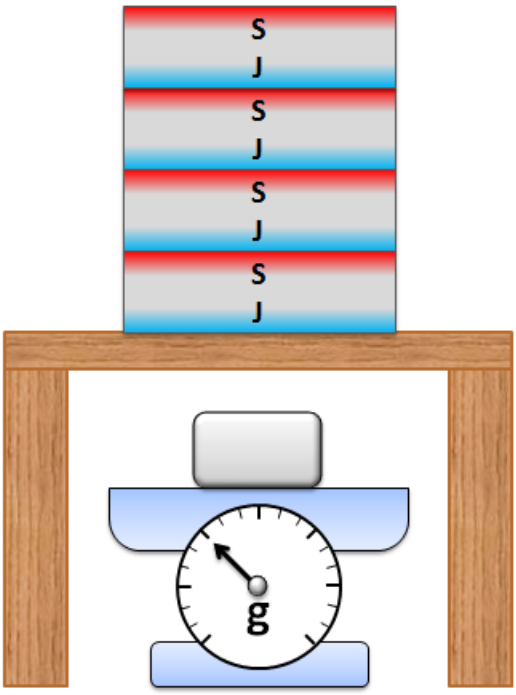
Na udržování magnetického pole už se další práce nevykonává, energie je v prostoru akumulována a lze ji zase odebrat (podobně jako z nabitého kondenzátoru).

Pokud do vzorce dosadíme z předchozích vztahů, získáme tvar udávající množství energie nahromaděné v magnetickém poli v určitém prostoru (objemu).

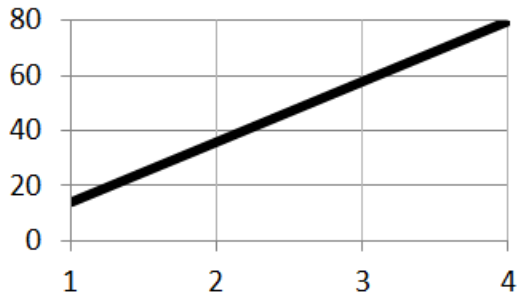
$$W_m = \frac{1}{2} \cdot B \cdot H \cdot S \cdot l \; (J; T, A \cdot m^{-1}, m^2, m)$$

Silové účinky MP

Silové účinky kolem permanentních magnetů nebo vodičů a cívek lze experimentálně ověřit.

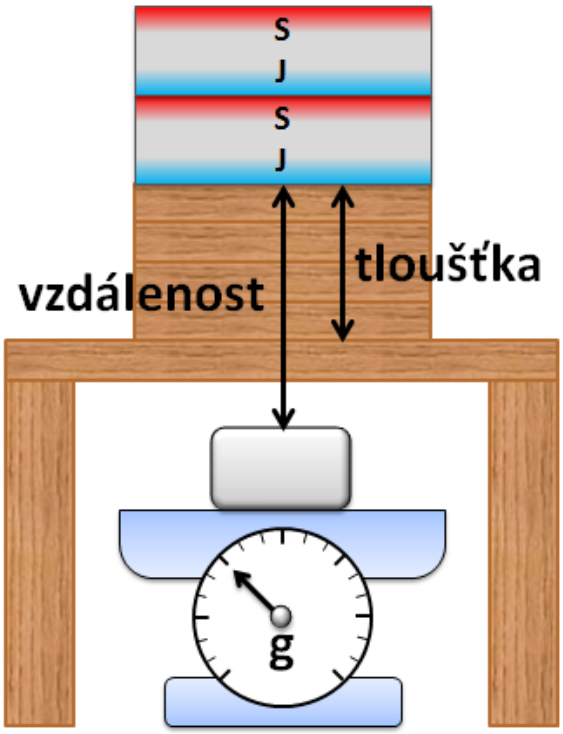


výchozí váha		90	
magnetů	váha	přírustek	síla
1	76	14	14
2	54	22	36
3	32	22	58
4	10	22	80



Pokusné ověření závislosti
přitažlivé síly magnetů na jejich počtu

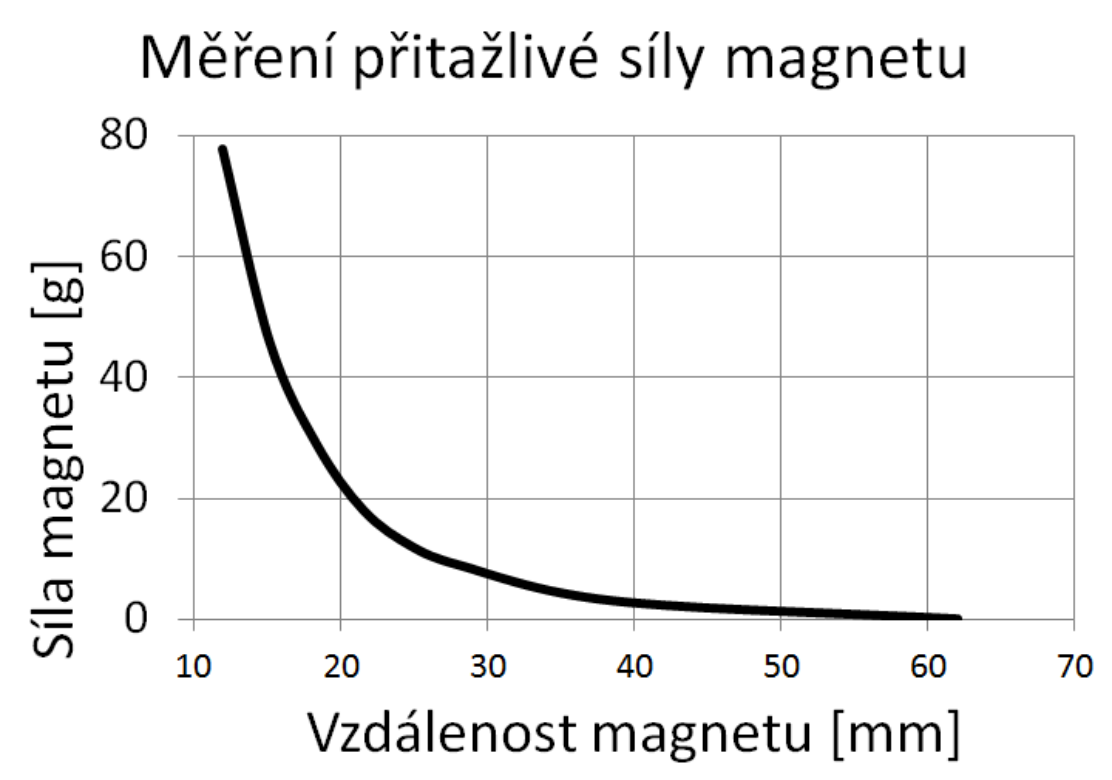
Jednoduchým pokusem prozkoumáme, že přitažlivá síla stejných magnetů se jejich přidáváním lineárně sčítá.



výchozí váha		90	
tloušťka	váha	vzdálenost	síla
0	12	12	78
3,2	44	15,2	46
6,4	61	18,4	29
9,6	72	21,6	18
12,9	78	24,9	12
16	81	28	9
26,6	87	38,6	3
50	90	62	0

Pokusné ověření závislosti
přitažlivé síly magnetu na vzdálenosti

Dalším pokusem zjistíme, že se vzdáleností klesá nadlehčování železného tělesa nelineárně (hyperbolicky).



Graf závislosti přitažlivé síly magnetu na vzdálenosti

Stejné pokusy můžeme provést i s pomocí vodičů a cívek a zjistíme, že přitažlivá síla jednotlivých závitů v cívkách se sčítá a síla roste s počtem závitů lineárně. Dalším pokusem si můžeme ověřit, že přitažlivá síla cívky závisí na velikosti proudu také lineárně.

Výpočet síly působící na vodič v MP

Pokud je vodič protékaný proudem umístěný ve vnějším magnetickém poli, působí na něj síla. (obecně tato síla působí na jakékoliv pohybující se náboje). Velikost síly působící na vodič o délce l v homogenním magnetickém poli za předpokladu, že siločáry vnějšího magnetického pole jsou kolmé na siločáry magnetického pole vybuzené vodičem, lze určit ze vztahu:

$$F = B \cdot I \cdot l \ (N;\ T, A, m)$$

Tento vztah se nazývá **Ampérův silový zákon**. Směr působení síly lze určit **pravidlem levé ruky**.
Umístíme levou ruku tak, aby siločáry vnějšího magnetického pole vstupovaly do dlaně, přičemž prsty budou ukazovat směr proudu vodičem, palec ukáže směr působení síly na vodič.

Pokud chceme zkoumat sílu působící na pohybující se náboj, můžeme odvodit následující vztah.

$$F = B \cdot Q \cdot v \ (N;\ T, C, m \cdot s^{-1})$$

Pro silové působení mezi dvěma rovnoběžnými vodiči protékanými proudy I_1 a I_2, které mají délku l a jsou vzdálené d můžeme odvodit následující vztah:

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

$$(N;\ H \cdot m^{-1}, A, A, m, m)$$

Pro vodiče ve vakuu lze tento vztah zjednodušit na tvar:

$$F = \frac{2 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot l}{d} \cdot 10^{-7} (N;\ A, A, m, m)$$

Pokud budou proudy ve vodičích ve stejném směru, budou se vodiče přitahovat, v opačném případě se budou odpuzovat.