

## ZGODOVINA MAGNETIKE

Imena za naravni magnet:

FR: aimant (ljubeč)

KIT: tzhu shih (ljubezenski kamen)

GB: lodestone (leading, guiding stone)

### PPT PREZENTACIJA ZGODOVINE

**KITAJSKA - KOMPAS.** Kitajci poznajo magnetni učinek. Kos magnetita z močno magnetizacijo tvori železov magnet, ki na plavajoči podlagi vedno kaže v isto smer. Iz tega spoznanja Kitajci izumijo kompas. Prvi dokumentiran zapis o kompasu izvira iz leta 1297, verjetno pa je bil znan že več stoletij pred tem datumom. Ta pomembni izum, ki omogoča ladjam navigacijo tudi daleč od kopnega, se hitro razširi v Arabijo in v Evropo.

**GRKI – MAGNETIT.** Grki poznajo magnet, saj izvira ime magnet iz pokrajine Magnesia (sedaj v Turčiji), kjer so našli primerke kamnov (magnetita) z magnetnimi lastnostmi. Že Thales iz Mileta trdi, da ima magnet dušo. Lucretius je predstavnik atomistov in v delu *De Rerum Natura* opisuje, da magnet privlači železo tako, da odganja atome v njegovi okolici. V resnici povzema učenje Epicurusa (342 – 270 BC), ki je naslednik učenja Demokrita. Po njihovem učenju naj bi bila vsa snov sestavljena iz atomov, ki pa so ob smrti razpadli (ni bilo življenja po smrti). Iz tistega časa izvira tudi prepričanje, da česen zmanjša moč magneta. To prepričanje se je vleklo vse do leta 1600, še posebno so se česna izogibali morjeplovci.

**GILBERT – PRVI ZNANSTVEN PRISTOP.** Prve resnejše in obsežne poskuse iz magnetike opravi W. Gilbert in jih objavi v knjigi »De Magnete« leta 1600. Znan je bil kot osebni doktor kraljice Elizabete. Gilbert je bil trden zagovornik Kopernika, kar je bilo v drugih bolj dogmatičnih državah življensko nevarno. Istega leta, kot je izšla njegova knjiga, so Giordano Bruno v Italiji zakurili na grmadi. Gilbert je delal mnogo poskusov iz elektrike, pri čemer je uporabljal elektroskop. Naredil je obsežen seznam materialov, ki se bolj ali manj naelektrijo – dandanes to imenujemo triboelektrična lestvica.



Knjiga W. Gilberta De Magnete.

Ugotovil je tudi, da je električna sila različna od magnetne, da naelektren objekt nima polov, kot jih ima magnet in da je mogoče električno silo zmanjšati s kosom papirja, magnetno pa ni mogoče. (Ena pomembnejših stvari, ki se jih lahko naučimo od Gilberta, je spoznanje, kako je pomembno proučiti in preverjati dejstva in ne le povzemanje pisanje drugih. Še posebno, če ne temelji na znanstvenem delu. To vodilo bi lahko bilo v veljavi še danes. Čeprav je vrsta pojavov že zelo natančno pojasnjena, je za pravo razumevanje najboljše lastno preverjanje. Če je le mogoče, naj to velja za vse, ki se učijo.)

Gilbert je proučeval tako naravne magnetne iz magnetita (loadstone), kot tudi umetno namagnetene materiale – železo. V popolnosti je tudi razumel inducirano magnetno polje, kjer nenamagnetni vendar (fero)magnetni material prevzame magnetne lastnosti ob stiku.

Ugotovil je, da ne le, da kaže magnetna igla (kompas) proti severu, pač pa tudi pod določenim kotom na površino zemlje. Predlagal je uporabo naprave, s katero bi lahko določali ne le smer severa, pač pa tudi geografsko višino iz tega kota. Gilbert je naredil model zemlje, ki ga je poimenoval terella (majhna zemlja) v katerega je vgradil trajni magnet. S tem modelom prikazuje delovanje kompasa na zemlji in ugotavlja, da je sama zemlja en velik magnet. Kdor raziskuje se lahko tudi moti: Gilbert v zadnjem delu knjige predvideva (pod vplivom Kopernikove teorije), da je magnetno polje tisto, ki prispeva k gibanju teles v vesolju.

Po Gilbertovih dognanjih se je dve desetletji na področju raziskav magnetike dogajalo bolj malo.

**1700 – 1800.** Do leta 1800 velja omeniti nekaj pomembnejših dognanj pri razumevanju elektrike. Otto von Guericke (1672) izumi naelektritveno sfero in prvo vakumsko steklenico. Sledi odkritje t.i. Leidenske flaše oziroma prvega kondenzatorja, ki omogoča začasno hranjenje večje količine električnega naboja oziroma doseganje višjih napetosti. Benjamin Franklin predlaga koncept le enega naboja, pozitivnega ali negativnega. Luigi Galvani eksperimentira z živalsko elektriko, kar nadaljuje Alessandro Volta, ki je med drugim zaslužen za izum elektroskopa in baterije. Ta omogoča bolj konstanten in trajnejši tok kot elektrostatični generatorji. Charles Coulomb v Franciji s pomočjo magnetne igle, ki ji visela na tanki nitki zazna šibke odklone pri bližanju drugega magneta. Coulomb je ugotovil, da sila pada s kvadratom razdalje, kot pri električni ali gravitacijski sili. Instrument, kot ga je zasnoval Coulomb, je bil osnova magnetnih detektorjev za nadaljnjih 170 let. Silo odboja uporabi Jonathan Swift v Guliverjevih potovanjih, kjer otok lebdi v prostoru zaradi »anti-gravitacije«. Kljub vsem raziskavam, v tem času še ni bila znana povezava med elektriko in magnetiko. Coulomb celo trdi, da te povezave ni.

**OERSTEAD – eksperiment s tokom in kompasom** . Leta 1820 profesor Hans Christian Oersted v Kopenhagnu (Danska) pripravlja eksperiment iz segrevanja prevodnika in tudi iz magnetike. Presenečeno ugotovi, da se igla kompasa premakne vsakič, ko sklene tokokrog. Ugotovi, da se kompas ne usmeri v smeri električnega toka pač pa prečno na smer toka in da



**Oersteadov eksperiment in kompas, na katerem je opazil premik ob toku v vodniku.**

magnetno polje obkroža tok. Svoje delo objavi julija 1820 in s tem naredi pomemben korak pri razumevanju elektrike in magnetike. Da sta elektrika in magnetika pravzaprav povezana, saj električni tok povzroča magnetno polje.

## SILA NA (TOKO)VODNIK V MAGNETNEM POLJU (1)

Andre-Marie Ampere v Franciji takoj preveri ugotovitve Oersteda in jih tudi razdela. Pravilno predvideva, da če električni tok povzroča magnetno polje in s tem odklon magnetne igle, mora obstajati tudi sila med dvema vodnikoma s tokom. Pokaže, da obstaja tudi sila med tokovodnikoma, ki je proporcionalna produktu toka v obeh vodnikih in njune dolžine in nasprotno proporcionalna razdalji med vodnikoma. To bi matematično zapisali kot

$$F = k \cdot \frac{I_1 I_2 l}{r}. \quad (1.1)$$

Ugotovi tudi, da je sila privlačna, če toka tečeta v isto smer in odbojna, če toka tečeta v nasprotno smer.

**SLIKA: Vzporedno ležeča vodnika s tokom v isto smer se privlačita, s tokom v nasprotno smer pa se odbijata.**

Konstanta  $k$  je enaka  $\frac{\mu_0}{2\pi}$ , kjer je  $\mu_0$  permeabilnost vakuumu in ima vrednost  $4\pi 10^{-7}$ . Torej je enačba za silo med dvema ravnima vzporednima vodnikoma iz (1.1) enaka:

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi r}. \quad (1.2)$$

**Permeabilnost vakuumu.** Poglejmo, kakšno enoto mora imeti  $\mu_0$ , da bo ustrezalo enačbi

(1.1):  $[N] = [\mu_0] \frac{[A] \cdot [A] \cdot [m]}{[m]}$  oziroma  $[\mu_0] = \frac{[N]}{[A^2]}$ . Kasneje bomo ugotovili, da lahko

zapišemo z osnovnimi ali izpeljanimi električnimi enotami (H je enota za induktivnost):

$$[\mu_0] = \left[ \frac{N}{A^2} \right] = \left[ \frac{V \cdot s}{A \cdot m} \right] = \left[ \frac{H}{m} \right].$$

**Primer 1:** Določimo velikost sile med dvema ravnima vzporednima (neskončno dolgima) vodnikoma s tokom 1 A na dolžini enega metra, ki sta med sabo razmahnjena za 1 m.

Izračun: Ta sila je enaka  $F = \frac{4\pi 10^{-7} \text{ N/A}^2 \cdot 1\text{A} \cdot 1\text{A} \cdot 1\text{m}}{2\pi \cdot 1\text{m}} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ N}$ , kar je tudi osnova za enoto

amper [A], ki si jo je Ampere prislužil za svoja pomembna odkritja na področju raziskovanja električnih pojavov. To je tudi edina električna enota, ki jo potrebujemo za povezavo med elektriko in mehaniko.

**Enota za električni tok.** Amper je enota za električni tok, ki pri prehodu skozi dva neskončna ravna vodnika zanemarljivega prereza na razdalji med vodnikoma 1 m v vakuumu povzroči silo  $2 \cdot 10^{-7} \text{ N/m}$ .

**Osnovne SI enote:** Katere so torej osnovne enote po mednarodnem sistemu SI (Systeme International – SI po konvenciji iz leta 1875)? Meter (m), kilogram (kg), sekunda (s), Ampere (A), Kelvin (K), mol (mol) in kandela (cd). Izpeljane enote pa so na primer newton, joule, watt, coulomb, volt, ...)

Ampere je skonstruiral več t.i. tokovnih tehtnic, s pomočjo katerih je ugotavljal sile med tokovodniki. Da bi povečal sile med vodniki je večkrat navil vodnike okoli iste osi in tako dobil prve primere tuljav....

**Tokovni element.** Enačba (1.1) za silo med vodnikoma velja le za dva vzporedna vodnika. Za izračun sile na (toko)vodnik poljubne oblike, je Ampere vpeljal koncept tokovnega elementa  $I \cdot d\vec{l}$ . Tokovni element imenujemo produkt toka v vodniku z vektorjem majhne (diferencialne) razdalje v smeri vodnika.

**SLIKA:** Tokovni element je predstavljen kot (diferencialen) del dolžine vodnika pomnožen s tokom v vodniku:  $I \cdot d\vec{l}$ .

Ampere določi silo med tokovnima elementoma. Silo na tokovni element  $I_1 d\vec{l}_1$  lahko zapišemo kot

$dF_{12} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_1 d\vec{l}_1 \cdot I_2 d\vec{l}_2 \cdot \sin \theta}{r_{12}^2}$ , kjer je  $\vec{r}_{12}$  vektor od tokovnega elementa 2 do tokovnega elementa 1 in  $\theta$  kot med tem vektorjem in smerjo tokovnega elementa 2.

#### SLIKA: Dva tokovna elementa in sila med njima.

**Magnetna sila na tokovni element izražena z gostoto magnetnega pretoka.** Da bi določili celotno silo na tokovni element 1, moramo sešteti vse prispevke tokovnih elementov na tem mestu. Če to upoštevamo, lahko enačbo zapišemo tudi kot

$$dF_{12} = I_1 d\vec{l}_1 \cdot \vec{B},$$

kjer imenujemo  $\vec{B}$  magnetno polje<sup>1</sup> oziroma bolj natančno **gostota magnetnega pretoka** na mestu tokovnega elementa  $I_1 d\vec{l}_1$ . Pomembna je tudi smer gostote pretoka. Sila na tokovni element je pravokotna tako na tokovni element, kot na magnetno polje. Sila je največja, ko je polje pravokotno na tok(ovni element). To lahko zapišemo z vektorskim produktom  $d\vec{F}_{12} = I_1 d\vec{l}_1 \times \vec{B}$ , ki jo v končni obliki lahko pišemo brez indeksov:

$$d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B} \quad (1.3)$$

Poenostavljene enačbe:

Če na ravni vodnik deluje homogeno polje  $\vec{B}$ , ki je pravokotno na vodnik, je sila nanj enaka

$$F = I l B, \quad (1.4)$$

---

<sup>1</sup> Pogosto za (vektor) gostote magnetnega pretoka uporabljamo bolj poljuden izraz magnetno polje ali kar kratko polje.

kar je znana enačba iz srednje šole (BIL). Če pa med smerjo vodnika in poljem ni pravi kot, potrebno upoštevati vektorski produkt  $\vec{A} \times \vec{B} = \vec{e}_n A \cdot B \cdot \sin(\theta)$ . Torej bo velikost sile

$F = IlB \sin(\theta)$ , smer sile pa bo pravokotna na ravnino, ki jo določata smer vodnika in polja.

Gostota magnetnega pretoka je posledica delovanja električnega toka (tokov). Obstajajo pa tudi snovi, ki povzročajo v svoji okolici magnetno polje brez dodatnega tokovnega vzbujanja. To so trajni magneti, ki pa jih bomo podrobneje obravnavali kasneje.

**SLIKA: Magnetna sila na tokovni element deluje v smeri, ki je pravokotna tako na tokovni element kot na vektor gostote pretoka. Theta je kót med  $d\vec{l}$  in  $\vec{B}$ .**

**Definicija gostote magnetnega pretoka.** Iz enačbe (1.4) tudi izhaja definicija za gostoto magnetnega pretoka, ki jo lahko zapišemo kot silo na tokovni element:

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

Poišči analogijo z definicijo električne poljske jakosti: sila na enoto naboja.

Poglejmo si najprej nekaj primerov računanja sile po enačbi (1.3):

**Primer:** V ravnem bakrenem vodniku je tok 28 A. Kolikšna mora biti velikost in smer gostote magnetnega pretoka, da bo sila na vodnik dolžine 1 m enako velika a nasprotne smeri kot sila gravitacije? Žica ima linearno gostoto snovi 46,6 g/m.

Izračun:

$$IlB = mg$$

$$B = \frac{(m/l)g}{I} = 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ T.}$$

Preveri še smer (tok v vodniku v tablo, smer Bja na desno)

**ENOTA ZA B:** Tesla,  $1\text{T} = 10^4 \text{ Gauss}$  ali iz enačbe (1.2)  $[\text{T}] = \frac{[\text{N}]}{[\text{Am}]}$ .

**EKSPERIMENT:** Funkcijski generator priključimo na malo tuljavico, znotraj katere damo trajni magnet. Skupaj jih prilepimo z lepilnim trakom. Pri priključitvi izmeničnega signala tuljavica ustvarja izmenično magnetno polje, ki s silo deluje na trajni magnet (in obratno). Lepilni trak deluje kot opna: vibrira in povzroča zvok.

- tuljavica iz firme Iskra Feriti
- trajni magnet, prečno namagnetan, firme RLS doo
- RAZNO: zvočnik deluje podobno, le da se giblje tuljavica v fiksnem magnetu, nariši

**TIPIČNE VELIKOSTI POLJA.** Red velikosti od  $10^8$  do  $10^{-14}$ :

- V magnetno zaščiteni sobi  $10^{-14}$  T
- V medgalaktičnem prostoru  $10^{-10}$  T
- Na površini zemlje  $10^{-4}$  T
- Na površini majhnega trajnega magneta  $10^{-2}$  T
- V bližini velikega elektromagneta 1,5 T
- Na površini nevtronske zvezde  $10^8$  T

Običajno so torej v elektromagnetiki vrednosti Bja od militesla do 1 tesla.

Pokazali smo že dva primera izračuna sile na ravne (toko)vodnike. Kolikšna pa je sila, če vodnik ni raven? Tedaj je potrebno vodnik razdeliti na manjše dele in določiti silo na vsak tak del.

**Primer:** Kolikšna je sila na del vodnika v obliki polkroga s polmerom  $R = 4$  cm in s tokom 6 A, ki je v homogenem polju 0,5 T pravokotno na vodnik?

$$d\vec{F} = Id\vec{l} \times \vec{B}$$

$$dF = IRd\varphi \cdot B$$

$$dF_z = F \sin \varphi$$

$$F_z = \int_0^\pi IRB \sin \varphi d\varphi = 2IRB = 240 \text{ mN}$$

**SLIKA:**



**Primer:** Kolikšna je sila na vodnik s tokom 6 A, ki je postavljen vzdolž X osi, na razdalji od  $x = 0$  m do  $x = 4$  m in nanj deluje nehomogeno magnetno polje  $\vec{B} = (2 \text{ T/m} \cdot x, 2 \text{ T}, 0)$ .  $x$  je v metrih.

$$d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B}$$

$$d\vec{F} = I dx \vec{e}_x \times \vec{B} = I dx (1, 0, 0) \times (2 \frac{\text{T}}{\text{m}} x, 2 \text{ T}, 0)$$

$$d\vec{F} = I dx \vec{e}_x \times \vec{B} = I dx 2 \frac{\text{T}}{\text{m}} (0, 0, 1)$$

$$\vec{F} = I 2 \frac{\text{T}}{\text{m}} (0, 0, 1) \int_0^{4 \text{ m}} dx = \vec{e}_z 48 \text{ N}$$

Dodatno: Kaj če je y komponenta polja enaka x komponenti?

### POVZETEK:

1. Kratka zgodovina magnetike (Kitajci (kompas), Grki (magnet privlači), 1600 Gilbert (zemlja je velik magnet, znanstven pristop, poli), 1820 Oersted (zveza med električnim tokom in magnetom), 1820 Ampere (sila med vodniki)).
2. Velikost magnetne sile med dvema ravnima vodnikoma je  $F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi r}$ .
3. Sila je privlačna, če je smer toka v vzporednih ravnih vodnikih enaka.
4. Definicija enote 1 A: sila med dvema vzporednima vodnikoma s tokom 1 A oddaljena za 1 m je  $2 \cdot 10^{-7} \text{ N/m}$ .
5. Sila na tokovni element je  $d\vec{F} = I d\vec{l} \times \vec{B}$ , kjer  $B$  imenujemo gostota magnetnega pretoka.
6. Smer sile je v smeri, ki je pravokotna tako na vektor  $d\vec{l}$  kot na vektor  $\vec{B}$ .
7. Tokovni element  $I d\vec{l}$  je definiran kot produkt toka v vodniku in diferenciala dolžine vodnika.
8. Definicija za gostoto magnetnega pretoka iz  $B = \frac{F}{l}$  je, da je  $B$  sila na tokovni element.

### Naloge:

izpit, 16. aprila 2002

izpit, 28. junij 2006

19.04.2001

Prvi kolokvij OE II 23.04

2002