

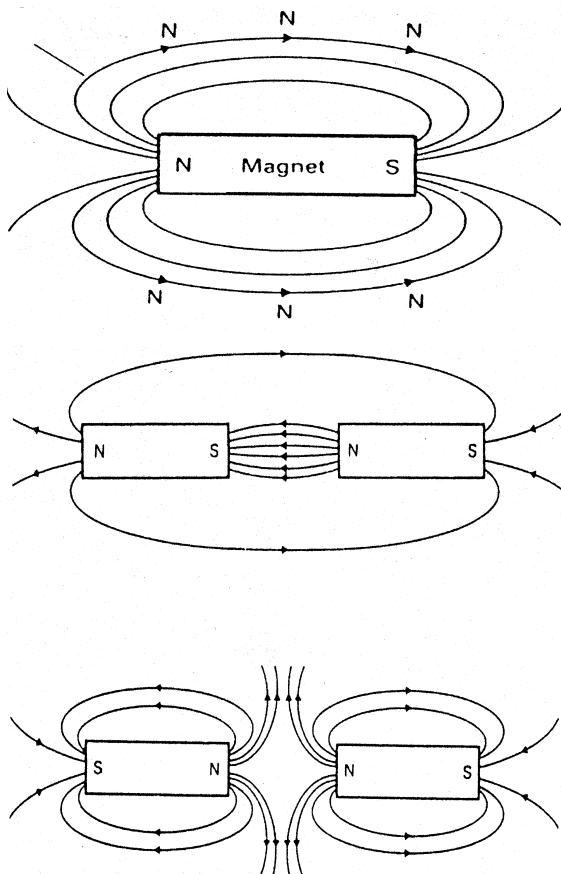
## 3. Elektromagnetism

### 3.1 Koolifüüsikast pärit põhiteadmisi

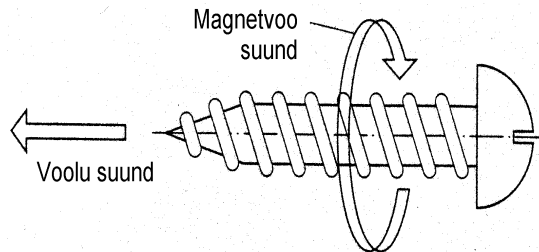
**Magnetism on nähtuste kogum, mis avaldub kehade magneetumises ja vastastikusel mõjus magnetvälja kaudu.** Magnetväli on suuremal või väiksemal määral omane kõigile kehadele.

Vardakujulisele magneetunud kehale välises magnetväljas mõjuvad jõud püüavad keha orienteerida piki välja. Seetõttu pöörduvad magneetunud varras – püsिमagnet – Maa magnetväljas ühe otsaga põhja- ja teisega lõuna poole. Esimest nimetatakse põhja- (**N**, saksa keeles *Nord*, inglise keeles *North* – põhi) ja teist lõunapooluseks (**S**, saksa keeles *Süd*, inglise keeles *South* – lõuna). Ühenimelised poolused tõukuvad, erinimelised tõmbuvad. Kui niisugune püsिमagnet poolitada, tekib alati kaks uut poolust: kummalgi poolel on oma põhja- ja lõunapoolus.

Magnetvälja kujutatakse jõujoontega. Magnetvälja saab nähtavaks teha magnetnõela või rauapuru abil, sest magneetunud rauaosakesed asetuvad piki jõujooni. Jõujoon on suunatud põhjapooluselt lõunapoolusele. Jõujoonte tihedusega iseloomustatakse magnetvälja tugevust.



Vooluga juhtme ümber tekib kontsentriliste ringidena magnetväli, mille suund on leitav **kruvireegli** abil: kui paremkeermega kruvi liigub voolu  $I$  suunas, siis kruvi pöörlemissund ühtib juhete ümbritseva magnetvälja jõujoonte suunaga. Või: kui vaadata voolu suunas, siis magnetvälja jõujoonte suund ühtib kruvi pöörlemise suunaga.



**Magnetvoo** tähiseks on  $\Phi$  (kreeka suurtäht *fi*), ühikuks veeber (Wb).

Magnetvoo tiheduse ehk **vootiheduse** ehk **induktsiooni** tähiseks on  $B$ , ühikuks veeber ruutmeetri kohta (Wb/m<sup>2</sup>) ehk tesla (T).

$$B = \frac{\Phi}{S}$$

$B$  vootihedus ehk induktsioon teslades (T),

$\Phi$  magnetvoog veebrites (Wb)

$S$  pind ruutmeetrites (m<sup>2</sup>)

**Magnetvälja tugevuse** e. väljatugevuse tähiseks on  $H$ , ühikuks amper meetri kohta (A/m).

Väljatugevus

$$H = \frac{B}{\mu_a}$$

$H$  magnetvälja tugevus (A/m),

$B$  vootihedus ehk induktsioon teslades (T),

$\mu_a$  magnetiline läbitavus (H/m)

kus  $\mu_a$  (kreeka väiketäht *müü*) iseloomustab keskkonna magnetilist läbitavust, ühikuks on henri meetri kohta (H/m).

$$\mu_a = \mu \cdot \mu_0$$

$\mu$  keskkonna suhteline magnetiline läbitavus, mis näitab mitu korda on magnetvälja tihedus selles keskkonnas suurem kui vaakumis

$\mu_0$  **vaakumi magnetiline läbitavus.**

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

Magnetilise läbitavuse järgi liigitatakse ained dia-, para- ja ferromagnetilisteks.

Ühikutevaheline seos:

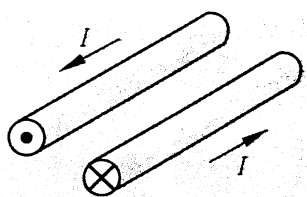
$$\mu_a = \frac{B}{H} = \frac{\frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}}{\frac{\text{A}}{\text{m}}} = \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} \cdot \frac{\text{m}}{\text{A}} = \frac{\Omega \text{s}}{\text{m}} = \frac{\text{H}}{\text{m}}$$

### 3.2 Elektrivoolu magnetväli. Vooluga juhtmele mõjuv jõud

Elektrivooluga kaasneb alati magnetväli.

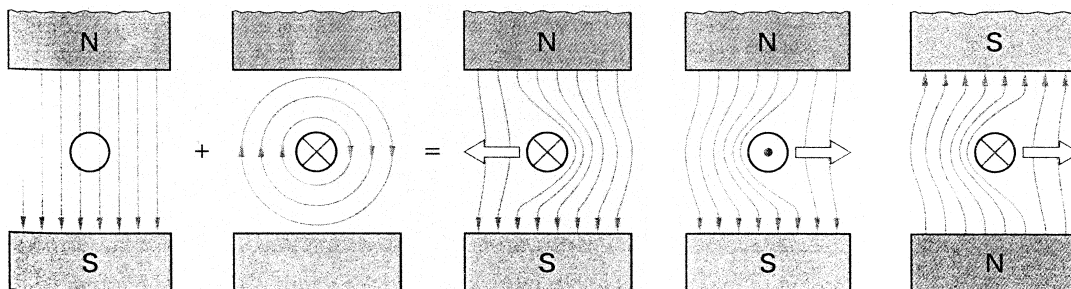
Kui sirgjuhet läbib vool, siis tekib juhtme ümber magnetväli, mille jõujooned on kontsentriselt ümber juhtme. Mida kaugemal juhtmest, seda nõrgem on väli. Magnetvälja suund oleneb voolu suunast juhtmes ja, nagu eespool öeldud, määratakse kruvireeglga.

Kui juhet kujutatakse joonise tasapinnaga risti, siis tähistatakse voolu suunda juhtmes ristiga kui vool on suunatud joonise taha ja punktiga, kui vastupidi. Meelespidamiseks sobib võrdlus noolesabaga, mis on ristikujuuline või nooleotsaga, mis on punktikujuuline, kui vaadata piki noolt.



Sirgjuhtme magnetväljal konkreetseid pooluseid ei teki.

Vaatleme juhtumit kui vooluga juhe on magnetväljas.



Joonisel on kujutatud magnetväli magnetpooluste vahel, juhtme ümber tekkiv magnetväli, ning näidatud kuidas nad liituvad sõltuvalt voolu suunast juhtmes ja magnetvoo suunast (viimane parempoolne).

Elektrivooluga juhtmele magnetväljas mõjuva jõu  $F$  suuruse määrab voolutugevus, juhtme pikkus ja **magnetvoo tihedus e. magnetiline induktsioon  $B$**

$$F = BIl$$

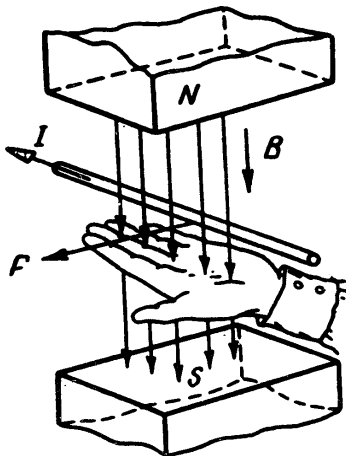
- $F$  juhtmele mõjuv jõud njuutonites (N)
- $B$  vootihedus ehk induktsioon teslades (T),
- $I$  voolutugevus amprites (A)
- $l$  juhtme pikkus magnetväljas meetrites (m)

Kontrollime, kas ühik on õige!

Kui võrd 1 tesla on 1 veeber ruutmeetrile ehk 1 voltsekund ruutmeetrile ( $T = \text{Wb}/\text{m}^2 = \text{Vs}/\text{m}^2$ ), siis

$$\text{Vs}/\text{m}^2 \cdot \text{A} \cdot \text{m} = \text{VAs}/\text{m} = \text{Ws}/\text{m} = \text{Nm}/\text{m} = \text{N}$$

Selle jõu suund määratakse vasaku käe reeglga (mootori käsi!): kui magnetjõujooned on suunatud peopesa ja neli sõrme ühtivad voolu suunaga, siis väljasirutatud põial näitab juhile mõjuva jõu suunda [Nero järgi].



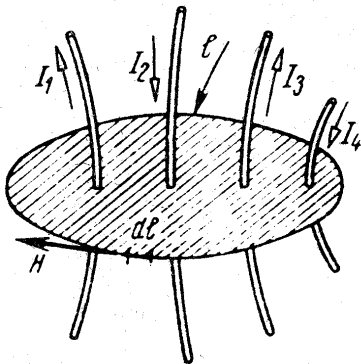
See valem on õige siis, kui juhe on **magnetvälja suunaga risti**. Kui juhe on magnetvälja jõujoonte suhtes nurga  $\alpha$  (kreeka väiketäht *alfa*) all, on jõud

$$F = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha ,$$

Siit nähtub, et kui vooluga juhe on magnetväljaga rööpne, siis  $\sin \alpha = 0$  ja  $F = 0$ , see tähendab, et mingit jõudu ei teki.

### 3.3 Koguvoolu seadus

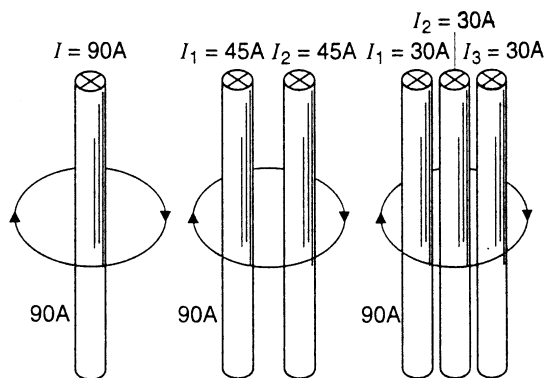
Vooluga juhtme(te) ümber tekkiva magnetvälja tugevuse  $H$  ja teda põhjustava elektrivoolu  $I$  vahelise seose määrab koguvooluseadus.



Kui on mitu vooluga juhet, mis läbivad suletud kontuuriga (magnetjõujoonega!) pinda, siis seda pinda läbivate voolude algebralist summat nimetatakse koguvooluks. Magnetvälja tugevuse  $H$  ja suletud kontuuri pikkuse (võetuna mööda magnetjõujoont)  $l$  korrutist  $H \cdot l$ , või üldjuhul  $\sum H \cdot \Delta l$ , nimetatakse magneetimisergutuseks. (Kreeka suurtäht *sigma* on matemaatilise summa märk).

Koguvoolu seadus ütleb, et *magneetimisergutus mööda kinnist kontuuri on võrdne koguvooluga, mis läbib kontuuriga piiratud pinda*

$$\sum I = \sum H \cdot \Delta l$$



Magnetvälja tugevus oleneb voolu kaugusest. Igas punktis on erinev kaugus ja erinev väljatugevus. Mida väiksem on  $d\Delta l$ , seda täpsemini on määratud magnetvälja tugevus antud punktis.

Lihtsam on vaadelda konkreetset juhtumit – sirgjuhtme magnetvälja.

### 3.4 Sirgjuhtme ja pooli magnetväli

Koguvoolu seaduse põhjal

$$I = \sum H \cdot \Delta l.$$

Ringjoone kaugus keskpunktist on igas punktis  $R$ . Seal on konstantne magnetvälja tugevus  $H$ , mille matemaatika lubab võtta summamärgi ette. Siis

$$I = H \sum \Delta l$$

Ja kui võrd ringjoone pikkus  $\sum \Delta l = 2\pi R$ , siis

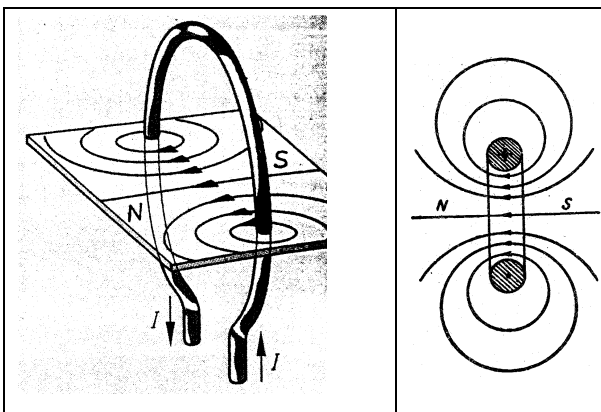
$$I = H \cdot 2\pi R.$$

Siit magnetvälja tugevus kaugusel  $R$

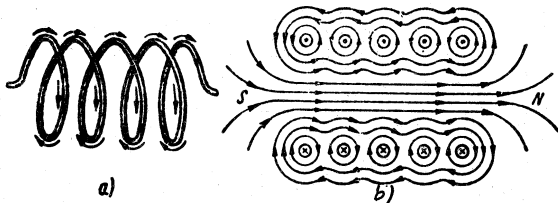
$$H = \frac{I}{2\pi R}.$$

### Silinderpooli magnetväli

Ringikujulist juhtmekeerdu ümbritseva magnetvälja kõik jõujooned suubuvad juhtmega ümbritsetud tasapinda ühelt poolt ja väljuvad teiselt poolt. Keeru sees on magnetväli tugevam, seetõttu on seal jõujooni tihedamini kui väljaspool keerdu.



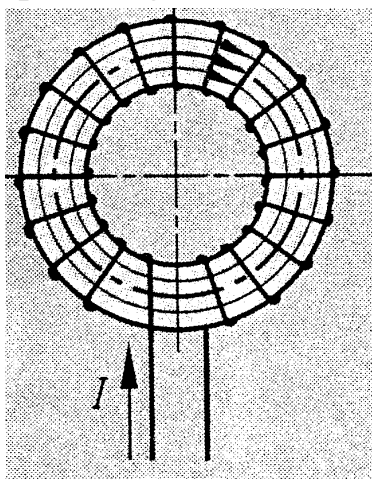
Elektrivoolust põhjustatud magnetväli muutub voolu viiekordistamisel viis korda tugevamaks. Sama tulemuse saab, kui keerata juhe viieks teineteise lähedal olevaks keeruks nii, et vool oleks igas keerus samasuunaline. Siis on iga juhtmekeeru magnetvälja jõujooned samuti samasuunalised ja liituvad juhtmeid ümbritsevaks ühiseks magnetväljaks.



Nii saadud silinderpooli ehk solenoidi ümber tekib voolu toimetel magnetväli, mis on täiesti sarnane püsिमagnetit ümbritseva magnetväljaga.

Magnetjõujoonte suunda aga samuti ka pooluseid pooli otstes saab määrata kruvireegli abil. Kui kruvi pöörlemis-suund ühtib voolu suunaga poolis, siis kruvi kulgeva liikumise suund ühtib magnetjõujoonte suunaga.

### Rõngaspooli magnetväli



Rõngaspool ehk toroid moodustub sõrmusekujulisest südamikust, millele on ühtlaselt mähitud  $w$  keerdu. Kui toroidi mähist läbib vool  $I$ , siis koguvoolu seaduse põhjal

$$I w = H l,$$

millest

$$H = \frac{I w}{l}.$$

Magnetiline induksioon toroidi telgjoonel

$$B = \mu_a H = \mu_a \frac{I w}{l}.$$

Eeldades, et magnetvoo tihedus kogu rõngassüdamikus on sama suur kui telgjoonel, on magnetvoog

$$\Phi = BS = \mu_a \frac{IwS}{l},$$

$S$  südamiku ristlõikepindala ruutmeetrises  
 $l$  magnetahela keskmine pikkus.

Rõngaspooli omapäraks on asjaolu, et magnetväli tekib ainult rõngassüdamikus. Väljaspool rõngaspooli magnetvälja ei teki.

### 3.5 Rööpvoolude vastastikune mõju

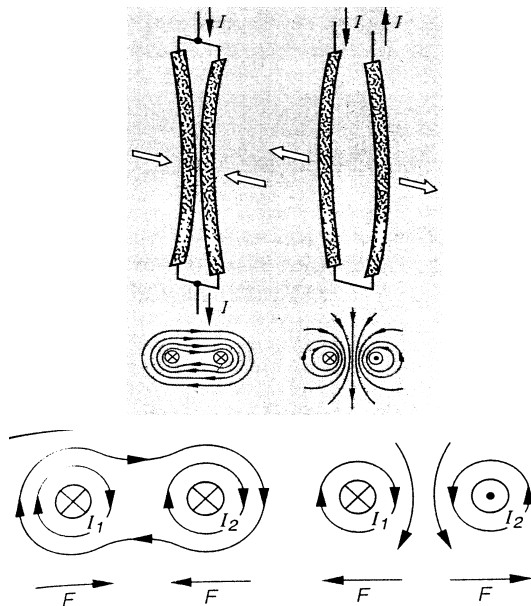
Vaatleme juhtumit, kui on kaks juhet rööbiti ja voolud samasuunalised. Juhtmetevaheline kaugus on  $a$ .

Vasakpoolne (esimene) juhe tekitab magnetvälja. Teine juhe on selle magnetväljas. Juhtmete vahel tekib jõud

$$F = B \cdot I \cdot l.$$

Vasaku käe reegli järgi tekib jõud sissepoole – tõmbejõud. Samamoodi ka esimeses juhtmes. Siit järeldus: samasuunalised voolud tekitavad tõmbejõu.

Vastasuunalised voolud tekitavad tõukejõu. Jõud on võrdsed.



Selle jõu arvutamiseks on teada magnetvälja tugevus

$$H = \frac{I}{2\pi R}.$$

Valemist

$$B = \mu_a \cdot H.$$

Juhtmele mõjuv jõud sõltub juhtmeid läbivast voolust, juhtmetevahelisest kaugusest ja juhtme pikkusest:

$$F = B_1 \cdot I_2 \cdot l = \mu_a \cdot H_1 \cdot I_2 \cdot l = \mu_a \cdot \frac{I_1}{2\pi R} \cdot I_2 \cdot l = \mu_a \cdot \frac{I_1 \cdot I_2 \cdot l}{2\pi R}$$

Kus see meid huvitab?

- Elektriliini lühiste korral
- Trafomähise keerdudes on samasuunaline vool. Lühise korral juhtmed tõmbuvad – välised keerud vajutavad sisemistele.

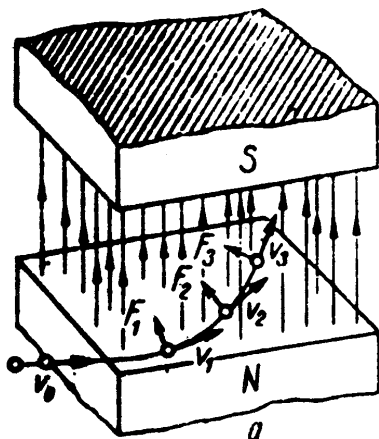
**Konkreetne näide.** Kui painduvas juhtmes tekib lühis, siis tagasilülitamise järel on see tavaliselt kadunud, sest oli tõukejõud. Samamoodi tõukuvad läbipaindunud õhuliinijuhtmed kui tuul on nad kokku lükanud.

### 3.6 Magnetvälja mõju liikuvale elektronile

Magnetväli püüab muuta sinna sattunud liikuva elektroni liikumisteed. Elektronile avalduv jõud on suunatud magnetvälja jõujoontega risti. Seda jõudu nimetatakse ka **Lorentzi jõuks** selle avastanud hollandi füüsiku Hendrik Antoon Lorentzi (1853—1928) auks.

Liikuvale elektronile mõjuva jõu suund on vastupidine jõu suunaga, mis mõjub vooluga juhtmele, sest voolu suunaks loetakse positiivselt laetud osakeste liikumise suunda.

Elektron kaldub oma esialgsest liikumissuunast kõrvale ja hakkab liikuma ringjoont mööda. Liikumissuuna võib määrata kruvireegli: kui kruvi liikumissuund ühtib magnetvälja jõujoonte suunaga, siis kruvipea pööramise suund ühtib elektroni liikumise suunaga.



### 3.7 Materjalide magneetumine

Magneetumuse seisukohalt liigitatakse materjale sõltuvalt suhtelisest magnetilisest läbitavusest  $\mu$ , mis näitab mitu korda on magnetvälja tihedus selles keskkonnas suurem kui vaakumis:

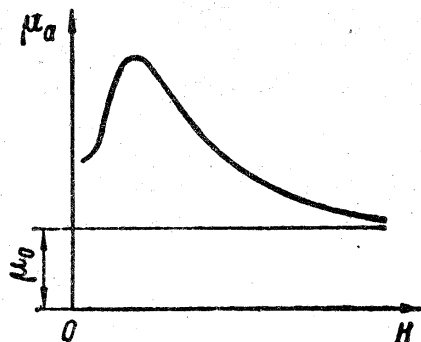
- diamagneetikud ( $\mu < 1$ ), näiteks vask ( $\mu = 0,999995$ )
- paramagneetikud ( $\mu > 1$ ), näiteks õhk ( $\mu = 1,000003$ )
- ferromagneetikud ( $\mu \gg 1$ )

Välises magnetväljas orienteeruvad aine elementaarmagnetid ümber, nad korrastuvad; ferromagnetid võtavad välise välja suuna.



Kui on ferromagnetilisest materjalist südamik, mille ümber on mähis, siis vool tekitab südamikus magnetvälja. Mida suurem on vool, seda tugevam on väli, seda suurem on magnetvoo tihedus ja magnetvoog.

Ferromagneetikute suhteline magnetiline läbitavus  $\mu$  pole jääv suurus, vaid sõltub väljatugevusest  $H$ . Seepärast pole mõtet  $\mu$  väärtust otsida käsiraamatutest. See on põhjus, miks kasutatakse magneetimiskõverat.

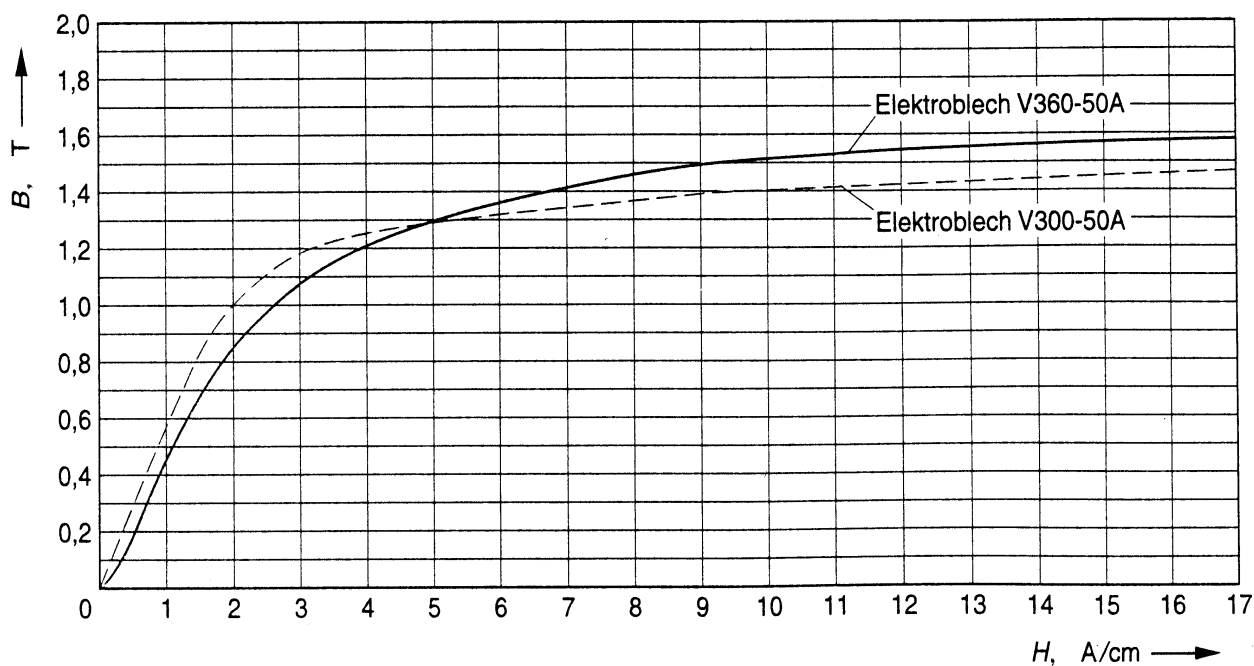


Mõned suhtelise magnetilise läbitavuse  $\mu$  näited

|                        |             |
|------------------------|-------------|
| Õhk                    | 1           |
| Malm                   | 100...250   |
| Valuteras              | 300...900   |
| Elektrotehniline teras | 1000...5000 |

Materjalide magneetumist iseloomustab **magneetimiskõver**  $B = f(H)$ . Vootihedus e. induksioon  $B$  kasvab väga väikese väljatugevuse  $H$  korral aeglaselt, siis võrdeliselt väljatugevusega, kuni küllastuse tekkel vootiheduse ehk induksiooni juurdekasv väljatugevuse suurenemisel muutub ikka väiksemaks ja väiksemaks.

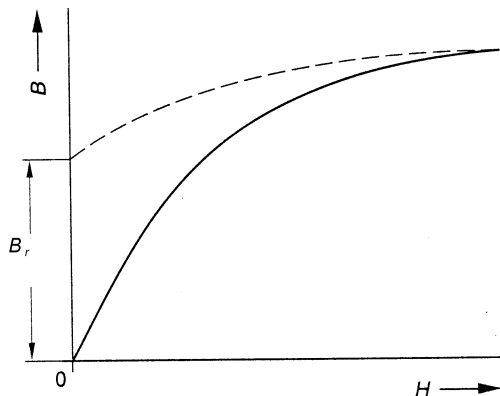
Elektrotehnilise lehtterase magneetimiskõverad:



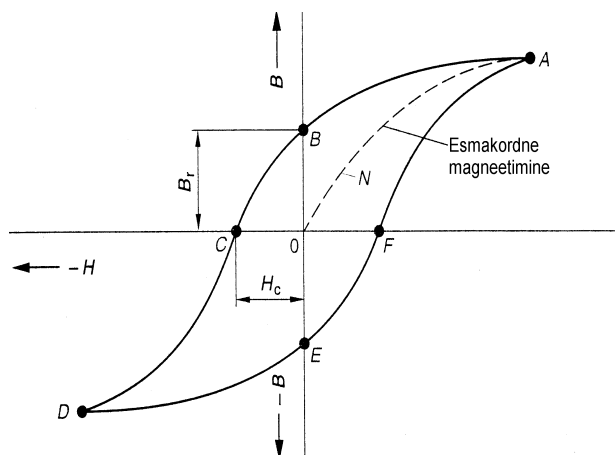
Üleminekukohta vootiheduse võrdeliselt juurdekasvult küllastuse tsooni nimetatakse magneetimiskõvera **põlveks**.

### 3.8 Magnetiline hüsterees

Kui magneeditud materjali magneetimisvoolu vähendada, hakkab vootihedus vähenema, kuid samade vooluväärtuste korral on vootihedus nüüd veidi suurem kui voolu suurendamisel. Muutes voolutugevuse nulliks jääb vootihedusele mingi väärtus, mida nimetatakse **jääkvootiheduseks** ehk **remanentsiks**  $B_r$ .

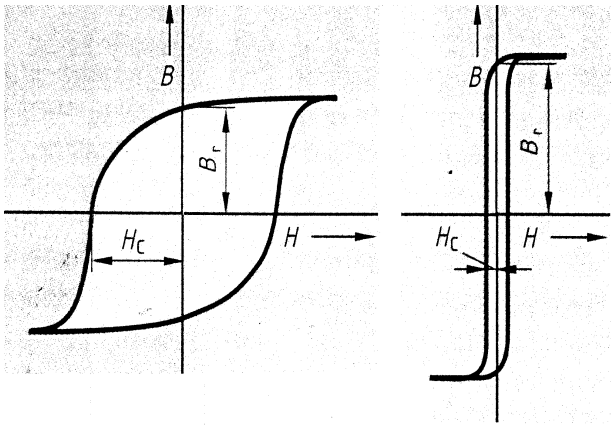


Kui nüüd muuta poolis voolu suunda ja hakata voolu vastassuunas suurendama, muutub vootihedus nulliks. Seda (negatiivset) väljatugevust, mille toimeel see juhtub, nimetatakse **koertsitiivjõuks**  $H_c$ . Voolu edasisel suurendamisel tekib esialgses võrreldes peaaegu punktsümmeetriline pilt ning jõutakse jälle küllastuseni. Nüüd voolu vähendades nullini jääb jälle jääkvootihedus. See kaob kui minna tagasi esialgsesle voolusuunale. Tekkinud silmust nimetatakse **hüstereesisilmuseks**.



See omab suurt praktilist tähtsust vahelduvvoolu-seadmetes, kus toimub pidev übermagneetimine. Übermagneetimine nõuab energiat. Iga übermagneetimistsükliga kulutatav energia on võrdeline hüstereesisilmuse pindalaga. Übermagneetimisest tingitud energiakadu nimetatakse **hüstereesisikaoks**.

Hüstereesisilmus võib olla erineva kujuga. Eristatakse kõvu magnetilisi materjale, mille hüstereesisilmus on lai ja pehmeid magnetilisi materjale, mille hüstereesisilmus on kitsas.



Kitsas ja suure jääkmagnetismiga on ferritide hüstereesisilmus.

### 3.9 Magnetahel

Magnetahelaks (ka magnetsüsteemiks) nimetatakse kehade kogumikku, mida läbib magnetvoog. Magnetahela abil saab anda magnetvoole soovitava teekonna.

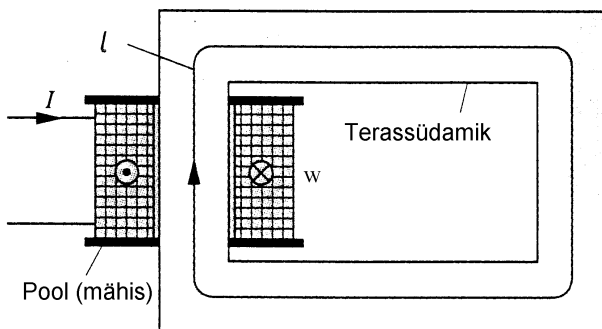
Magnetahela osad võivad olla ühest ja samast või erinevast materjalist, nad võivad olla eri pikkusega ja mitmesuguse ristlõikega.

Magnetahel valmistatakse enamasti võimalikult väikese magnetilise takistusega materjalist, tavaliselt ferromagneetikuist. Magnetahela koostisosaks võib olla magneetismähisega ümbritsetud südamik, mähiseta ike, liikuv ankur, nendevahelised või nendesisesed õhupilu, magnetšunt ja magnetiline puiste (see on magnetahela osa, kus tekib kasutu osavoog). Ferromagneetikud võimaldavad olemasoleva magneetimisergutuse korral suuremat magnetvoogu, mistõttu, kui võimalik, püütakse õhupilud viia miinimumini.

Magnetahelad võivad olla

- mittehargnevad
- hargnevad, seejuures sümmeetrilised või mittedümmeetrilised.

Elektrimootori, generaatori kui ka trafo magnetahela moodustab terassüdamik koos mähisega.

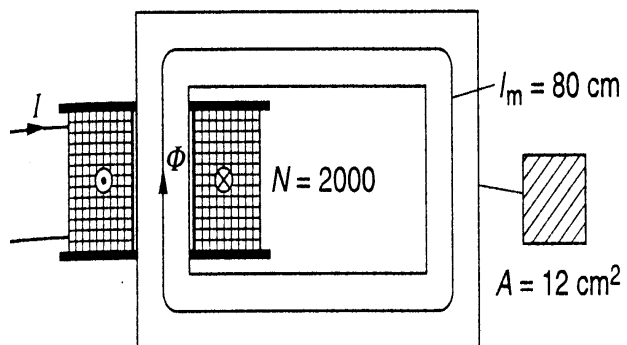


### 3.10 Magnetahelate arvutus

Magnetahela arvutuse aluseks on koguvooluseadus.

$$\sum I = \sum H \cdot \Delta l.$$

#### Magnetahela arvutusnäiteid



$$\Phi = 0,004 \text{ Vs}$$

$$\mu_r = 3000$$

### 3.11 Elektromagneti tõmbejõud

Elektrotehnikas on kasutusel mitmesuguseid terassüdamikuga seadmeid – releesid, piduri-magneteid, kinnitusmagneteid, tõstemagneteid. Nad võivad olla väga erineva kujuga.

Üldiselt on ankrule mõjuv jõud  $F$  võrdeline pooluste ristlõike pindalaga ja õhupilu magnetilise induksiooni ruuduga:

$$F = \frac{B^2 S}{2\mu_0},$$

$F$  jõud njuutonites (N)

$B$  induksioon teslades (T)

$S$  pooluste ristlõikepindala ruutmeetrites (m<sup>2</sup>).

Tõmbejõudu saab reguleerida voolutugevuse muutmisega mähises.

Südamik valmistatakse tavaliselt pehmest terasest, millel on väike jääkinduksioon ja väike koertsitiivjõud.