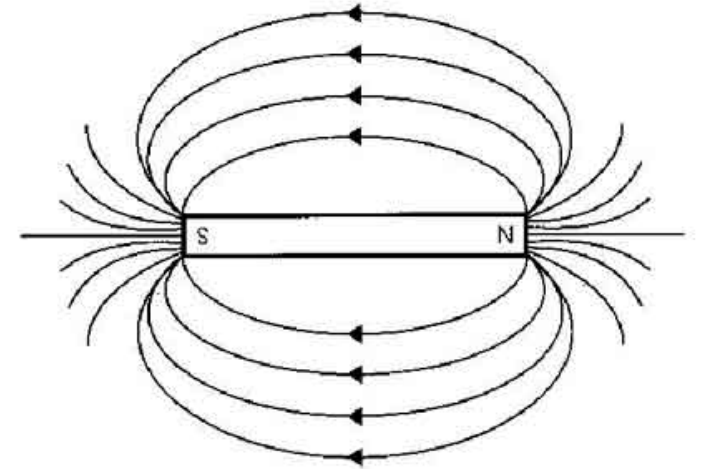


# Magneettikenttä

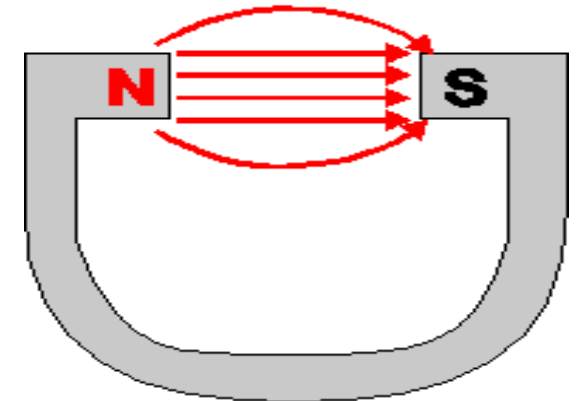
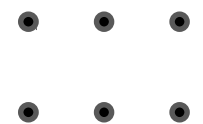
- Magneettikenttä on magneettisen vuorovaikutuksen vaikutusalue
  - Magneetti on aina dipoli. Yksinapaista magneettia ei ole havaittu
- Kenttäviivat:
  - Suunta pohjoisnavasta (N) etelänapaan (S) magneetin ulkopuolella (sisäpuolella S → N)
- Kenttäviivojen tiheys kuvaa magneettikentän voimakkuutta
  - Fysikaalinen suure  $\vec{B}$ , *magneettivuon tiheys*
  - Yksikkö  $[\vec{B}] = 1 \text{ T}$  (tesla)
- Magneettikenttä on homogeeninen, jos kentän suunta ja voimakkuus on vakio



poispäin



kohti



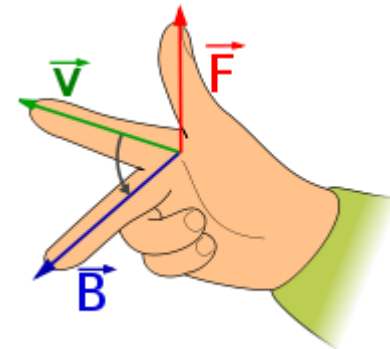
# Liikkuva varautunut hiukkanen magneettikentässä

- Nopeudella  $\vec{v}$  liikkuvaan hiukkaseen, jonka varaus on  $q$ , vaikuttaa magneettinen voima

$$F_m = qvB.$$

- Magneettivuon tiheyden  $\vec{B}$  ja hiukkasen nopeuden  $\vec{v}$  täytyy olla kohtisuorassa
- Jos nopeusvektori ei ole kohtisuorassa magneettikenttää vastaan, niin laskuissa on käytettävä nopeusvektorin magneettikentälle kohtisuoraa komponenttia
  - tai vastaavasti magneettikentän kohtisuoraa komponenttia nopeusvektorille

*Muista  
Oikean käden sääntö!*



*positiiviselle* varaukselle  $q$

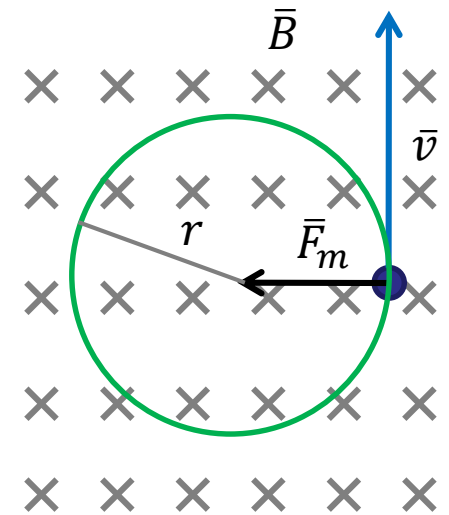
negatiivisella varauksella  
vastakkainen suunta

# Varautuneen hiukkasen rata

- Tarkastellaan positiivisesti varautuneen hiukkasen liikettä tyhjiössä, kun hiukkanen tulee kohtisuorasti homogeeniseen magneettikenttään. (Painovoiman vaikutus mitätön)
- Hiukkanen joutuu tasaiseen ympyräliikkeeseen
- Liikkeyhtälö:  $\sum \vec{F} = m\vec{a}_n$ , missä  $a_n = \frac{v^2}{r}$  on normaalikiikhtyvyys
- Ainoa vaikuttava voima on magneettinen voima:

$$qvB = m \frac{v^2}{r} \iff qB = \frac{mv}{r}$$

- Ympyräradan säteelle saadaan lauseke  $r = \frac{mv}{qB}$ .
- Hiukkasen kulmanopeus on  $\omega = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m}$  ( $qB = m \frac{v}{r}$ , joten  $\frac{v}{r} = \frac{qB}{m}$ )
- Kulmanopeus ei siis riipu hiukkasen nopeudesta  $v$  eikä radan säteestä  $r$ .

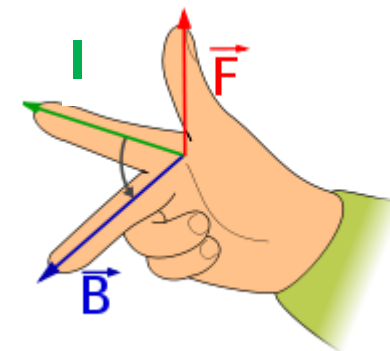
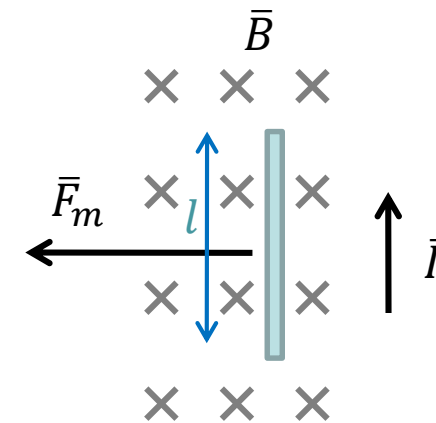


# Suora johdin magneettikentässä

- Kun johdin on kohtisuorassa magneettikentässä, siihen vaikuttaa magneettinen voima  $\vec{F}_m$ , joka riippuu suoraan magneettivuon tiheydestä  $\vec{B}$ , sähkövirrasta  $\vec{I}$  ja johtimen pituudesta  $l$ .

$$F_m = IlB$$

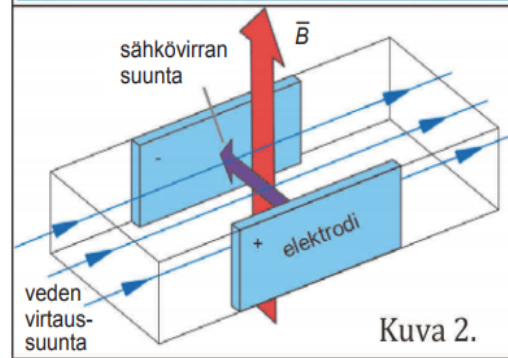
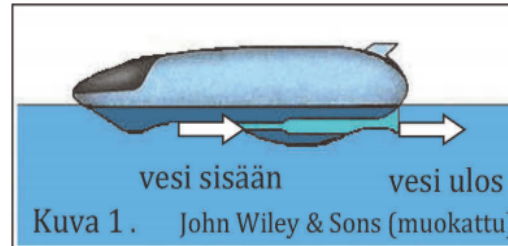
- Voimien suunnat saadaan *oikean käden säännöstä*.
- Jos magneettikenttä ja johdin eivät ole kohtisuorassa, niin lausekkeessa on käytettävä jommankumman kohtisuoraa komponenttia (projektiota) toista vastaan.



## Yo-tehtävä K2015/8

Kuvassa 1 on japanilainen Yamato-prototyyppi-laiva. Laivan moottori on molemmista päistään avoin metalliputki, jonka läpi merivesi pääsee virtaamaan. Putkessa sijaitsevien elektrodien välillä on jännite, joka synnyttää meriveteen sähkövirran kuvan 2 osoittamaan suuntaan. Vettä kiihdytetään suprajohtavan sähkömagneetin magneettikentän avulla. Tällöin syntyy laivaa eteenpäin työntävä voima. Sähkövirtaa vastaan kohtisuoran magneettikentän magneettivuon tiheys on 15 T.

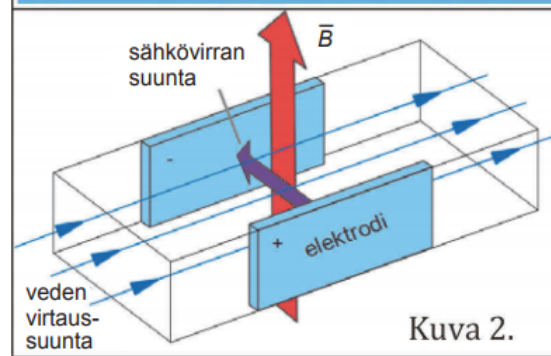
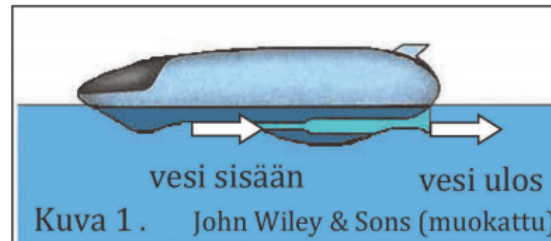
- Miten elektrodien välille syntyy sähkövirta? (1 p.)
- Miten moottorin työntövoima syntyy? (3 p.)
- Laske moottorin työntövoima, kun elektrodien välinen etäisyys on 0,30 m. Niiden välinen 82 V:n jännite synnyttää sähkövirran, jonka suuruus on 0,70 kA. (2 p.)



- Merivesi on sähköisesti neutraali (kokonaisvaraus  $\approx 0$ ), mutta merivedessä on suuret määrät sekä positiivisia, että negatiivisia ioneja.  
Levyjen välille syntyy potentiaalieron vuoksi (likimain homogeeninen) sähkökenttä. Sähkökenttä aiheuttaa ioneihin sähköisen voiman  $\vec{F}_s = q\vec{E}$ , missä  $\vec{E}$  on sähkökentän voimakkuus ja  $q$  on varaus. Tämä voima saa ionit liikkumaan ja sähkövirta on nimenomaan ionien liikettä.
- Magneettikenttä vuorovaikuttaa liikkuvien ionien kanssa ja tästä kohdistuu ioneihin magneettinen voima kaavan  $F_m = qvB$  mukaisesti.  
Kokonaisvoima, joka kohdistuu varausta kuljettaviin ioneihin saadaan kaavasta  $F = IlB$  ja se saa meriveden virtaamaan kuvan mukaisesti.  
Laivaan kohdistuu Newtonin III:n lain mukaisesti yhtä suuri, mutta vastakkaissuuntainen voima.

Kuvassa 1 on japanilainen Yamato-prototyypin laiva. Laivan moottori on molemmista päistään avoin metalliputki, jonka läpi merivesi pääsee virtaamaan. Putkessa sijaitsevien elektrodien välillä on jännite, joka synnyttää meriveteen sähkövirran kuvan 2 osoittamaan suuntaan. Vettä kiihdytetään suprajohtavan sähkömagneetin magneettikentän avulla. Tällöin syntyy laivaa eteenpäin työntävä voima. Sähkövirtaa vastaan kohtisuoran magneettikentän magneettivuon tiheys on 15 T.

- Miten elektrodien välille syntyy sähkövirta? (1 p.)
- Miten moottorin työntövoima syntyy? (3 p.)
- Laske moottorin työntövoima, kun elektrodien välinen etäisyys on 0,30 m. Niiden välinen 82 V:n jännite synnyttää sähkövirran, jonka suuruus on 0,70 kA. (2 p.)



c) Sijoitetaan arvot kaavaan  $F = IlB$  (virta ja magneettikenttä ovat kohtisuorassa):

$$F = 700 \text{ A} \cdot 0,30 \text{ m} \cdot 15 \text{ T} = 3150 \text{ N} \approx 3,2 \text{ kN}$$

Tämä on siis ioneihin kohdistuva kokonaisvoima, mutta laivaan kohdistuva voima on suuruudeltaan sama.

# Sähkömagneettinen induktio

- Muuttuva magneettikenttä *indusoi* johtimeen jännitteen
- Tämä aiheuttaa suljettuun virtapiiriin *induktiovirran*
- *Lenzin laki*: Induktiovirran suunta on sellainen, että sen vaikutukset vastustavat muutosta, joka aiheuttaa induktion (ilmiö vastustaa aiheuttajaansa)
- Suoran johtimen induktiolaki
  - Kun suora johdin on kohtisuorassa magneettikenttää vastaan, vakionopeudella  $v$  liikkuvaan johtimeen indusoituu jännite  $e = lvB$ .
  - Jos johdin/nopeusvektori ei ole kohtisuorassa magneettikenttää vastaan on laskuissa käytettävä johtimen/nopeusvektorin kohtisuoraa komponenttia magneettikentälle.
- Magneettivuo  $\Phi = AB$ , yksikkö  $[\Phi] = 1 \text{ Tm}^2 = 1 \text{ Wb}$  (weber)
- Magneettivuo kuvaa tietyn pinta-alan *kohtisuorasti* lävistävien kenttäviivojen määrää

# Induktiolaki

- Kun johdinsilmukan läpäisevä magneettivuo muuttuu, silmukkaan syntyy *keskimääräinen induktiojännite*:

$$e_k = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

- Voidaan määrittää graafisesti  $(t, \Phi)$  –koordinaatistosta (sekantin kulmakerroin)
- Kaavan miinus-merkki Lenzin lain perusteella
- Jos kyseessä käämi, jossa  $N$  kierrosta, niin  $e_k = -N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$
- Hetkellinen jännite saadaan derivaatan avulla tai tangentin kulmakertoimesta  $(t, \Phi)$  –koordinaatistossa

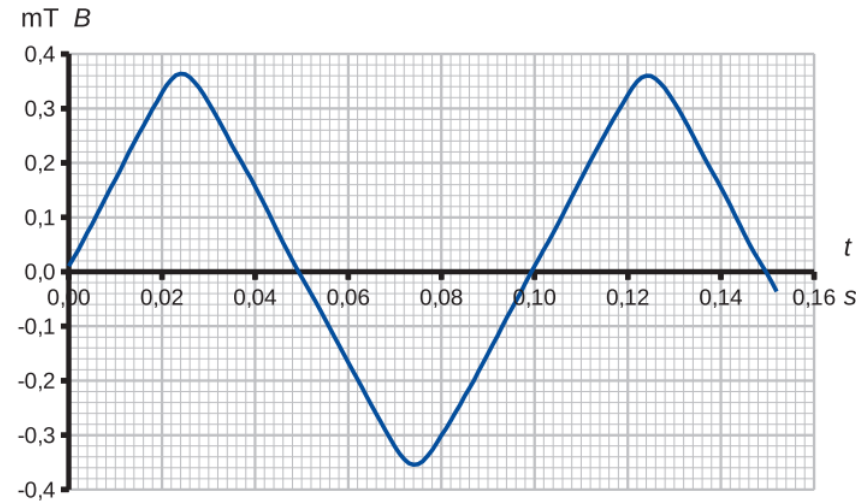
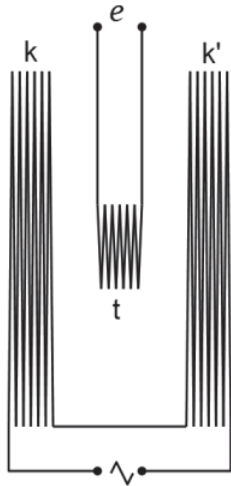
$$e_k = -N \frac{d\Phi}{dt}$$



## Yo-tehtävä K2017/8

Kaavakuva esittää induktion tutkimiseen käytettävää laitetta. Siinä on kaksi kenttäkäämiä  $k$  ja  $k'$  sekä niiden välissä testikäämi  $t$ . Kenttäkäämeissä kulkeva sähkövirta synnyttää käämien väliin homogeenisen magneettikentän. Testikäämissä on 3600 kierrosta, ja sen poikkileikkaus on neliö, jonka sivun pituus on 42 mm.

- a) Kuvaaja esittää kenttäkäämien välistä magneettivuon tiheyttä ajan funktiona. Piirrä testikäämiin indusoituvan jännitteen kuvaaja. (4 p.)
- b) Testikäämiä käännetään niin, että sen akseli muodostaa  $65^\circ$  kulman kenttäkäämien akselin kanssa. Kuinka suuri on nyt testikäämin jännitteen maksimi? (2 p.)



- a) Testikäämiin indusoituva jännite saadaan induktiolain  $e = -N \frac{d\Phi}{dt}$  avulla. Testikäämin kierrosluku on  $N = 3\,600$  ja testikäämin läpäisevä magneettivuo  $\Phi = AB$ , jossa  $A = (0,042\text{ m})^2$  on testikäämin poikkileikkauksen pinta-ala. Koska  $A$  pysyy vakiona, induktiolaki voidaan kirjoittaa muotoon

$$e = -N \frac{dAB}{dt} = -NA \frac{dB}{dt}$$

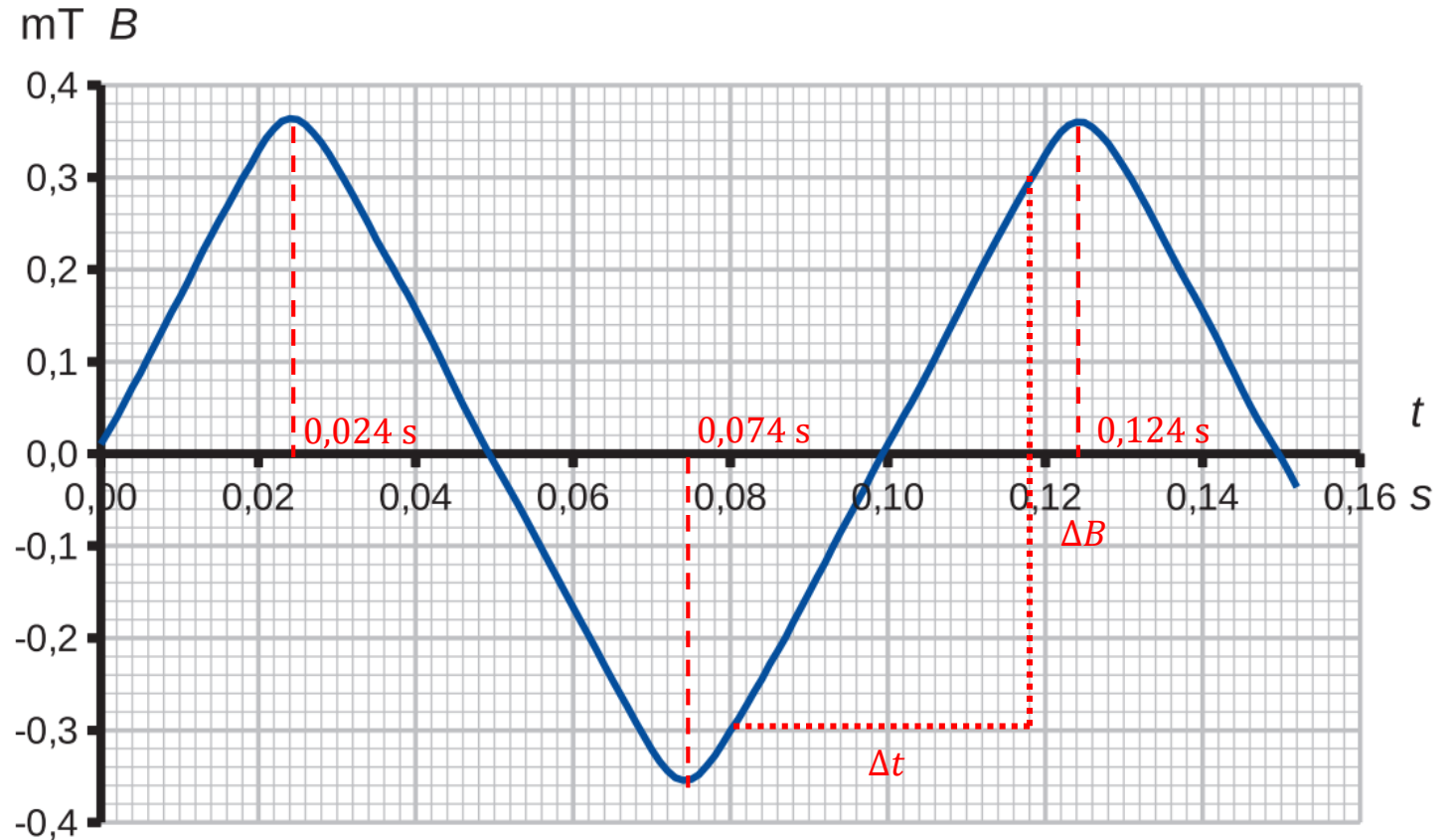
Kuvaajasta nähdään, että magneettivuon tiheyden ääriarvot saavutetaan ajanhetkillä 0,024 s, 0,074 s ja 0,124 s eli 50 ms välein. Nämä ääriarvot ovat itseisarvoltaan (lähes) yhtä suuria.

Kuvaajan osat ovat lineaarisia ääriarvojen välillä (jos huippujen pientä pyöristymistä ei huomioida)

Lasketaan magneettivuon muutosnopeus (eli suoran kulmakerroin) jollakin lineaarisella osalla, esim. käyttämällä aikavälillä 0,08 s – 0,118 s.

$$\frac{\Delta B}{\Delta t} = \frac{0,30 \text{ mT} - (-0,30 \text{ mT})}{0,118 \text{ s} - 0,08 \text{ s}} \approx 15,79 \frac{\text{mT}}{\text{s}}$$

Jaksollisuuden ja symmetrian perusteella muutosnopeuden itseisarvo on jokaisella lineaarisella osalla sama.

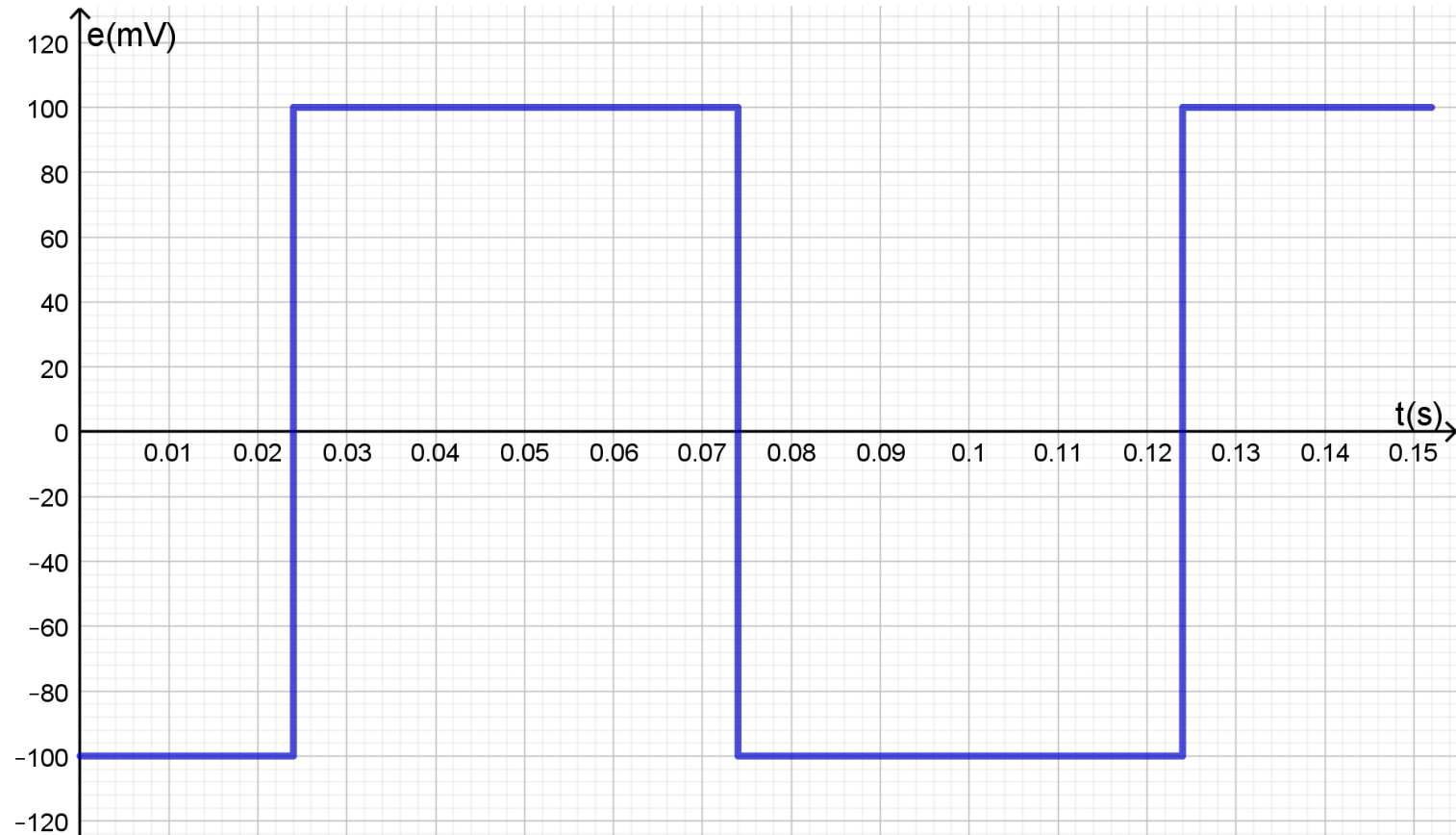


Kun magneettivuon tiheys on kasvussa, indusoitunut jännite on

$$e = -NA \frac{dB}{dt} = -NA \frac{\Delta B}{\Delta t} = -3\,600 \cdot (0,042 \text{ m})^2 \cdot 15,79 \frac{\text{mT}}{\text{s}} \approx -100,27 \text{ mV} \approx -100 \text{ mV}$$

Vastaavasti, kun magneettivuon tiheys on laskussa, indusoituvan jännitteen arvo on  $e = 100$  mV.

Jännitteen (idealisoitu) kuvaaja, kun magneettivuon tiheyden kuvaajan huippujen lievä pyöristyminen jätetään huomioimatta:



**Huom!**

Kuvaajan saisi Geogebraalla derivoimalla (derivaatta kerrottuna tekijällä  $-NA$ ), jos funktion  $B(t)$  lauseke olisi tiedossa tai sovitettuna.

- b) Kenttäkämmien akselit ja magneettikentän kenttäviivat ovat yhdensuuntaisia.

Lasketaan vektorin  $\vec{B}$  kohtisuoran eli testikämmien akselin suuntaisen komponentin  $\vec{B}_\perp$  pituus:

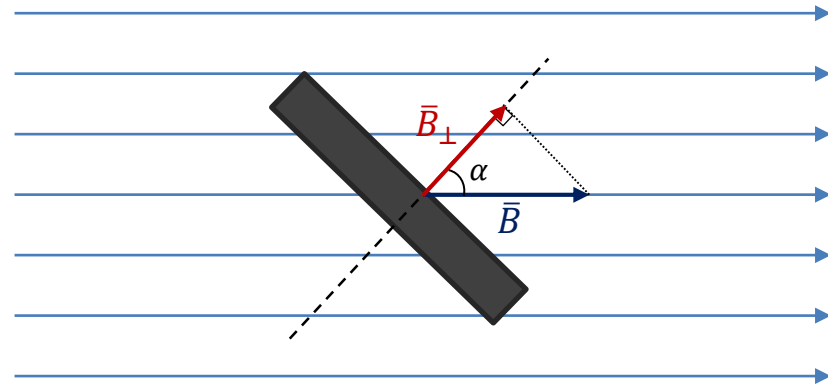
$$B_\perp = B \cos \alpha$$

Testikämmiin indusoituu nyt jännite

$$e = -NA \frac{dB_\perp}{dt} = -NA \cos \alpha \frac{\Delta B}{\Delta t},$$

koska kulma  $\alpha$  on vakio.

Jännitteen huippuarvo on siis  $100,27 \text{ mV} \cdot \cos 65^\circ \approx 42 \text{ mV}$ .



# Pyörrevirrat

- Pyörrevirta on muuttuvan magneettikentän synnyttämä sähkövirta metalleissa (vrt. johdinsilmukkaan indusoituva virta)
- Pyörrevirtojen suunta on sellainen, että niiden synnyttämä magneettikenttä pyrkii vastustamaan virran aiheuttanutta muutosta
- Pyörrevirrat aiheuttavat tehohäviöitä lämmöksi generaattoreissa, moottoreissa ja muuntajien rautaytimissä
  - Käämien ytimet tehdään rautaliuskoista pyörrevirtojen minimoimiseksi
- Pyörrevirtoja hyödynnetään teollisuuden induktiouuneissa, kodin induktioliesissä, pyörrevirtajarruissa, sähkönkulutusmittareissa, metallinpaljastimissa...