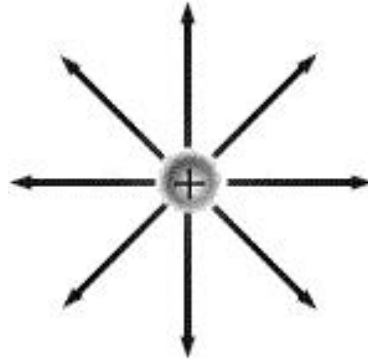
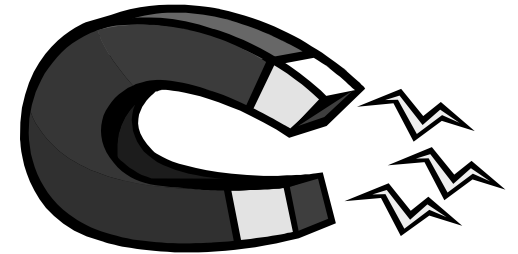


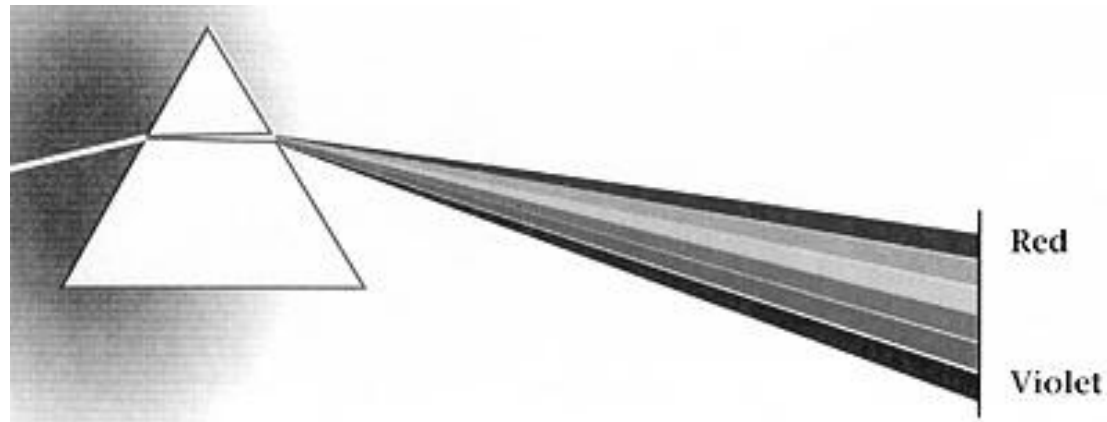
Elektrostatica



Magnetostatica



Elektromagnetisme $\Rightarrow$ Licht



Inhoud

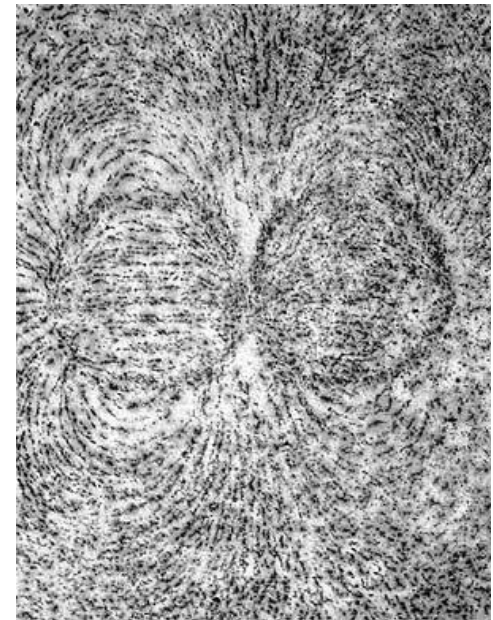
Magnetostatica

- ➔ 1. Lorentzkracht en magnetisch veld
- 2. Wet van Biot-Savart
- 3. Wet van Ampère
- 4. Veldvergelijkingen nader bekeken:
- 5. Magnetische velden in materie: magnetisatie

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I \quad \& \quad \vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

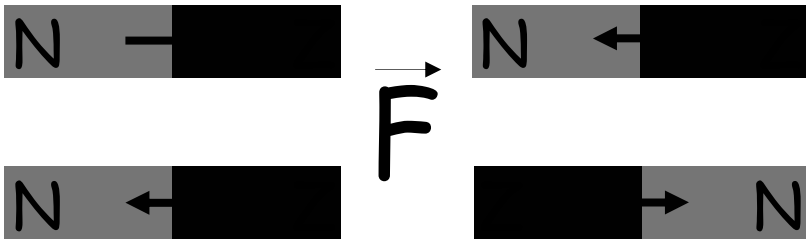
PFSAE:

- Lorentzkracht: §26.1



Magneet: experiment

noord/zuid



nieuwe kracht:

$F_{\text{magnetisch}} \gg F_{\text{gravitatie}}$

noord: "N" & zuid: "Z"

NN & ZZ: afstotend

NZ & ZN: aantrekkend

Eenheden:

- Stroom [I]: Ampère $A=C/s$

- Magneetveld [B]:

Tesla $T=N/Am=Ns/Cm=kg/Cs$

geen monopolen!



geen monopolen!
dipolen: "kleinste"

Anders dan elektrostatica:

1. beweging lading q in B-veld
2. B-veld als gevolg van stroom I

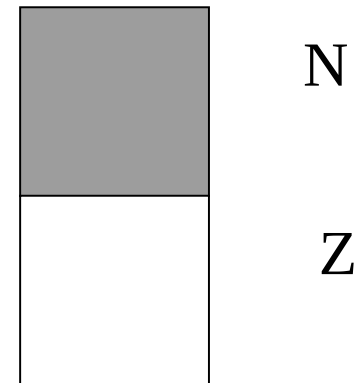
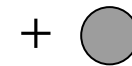
Een stilstaande positieve lading bevindt zich in de getekende positie boven de noordpool van een magneet. Op de lading zal:

A Een afstotende kracht werken

B Een aantrekkende kracht werken

C Geen kracht werken

D Een kracht naar achteren werken

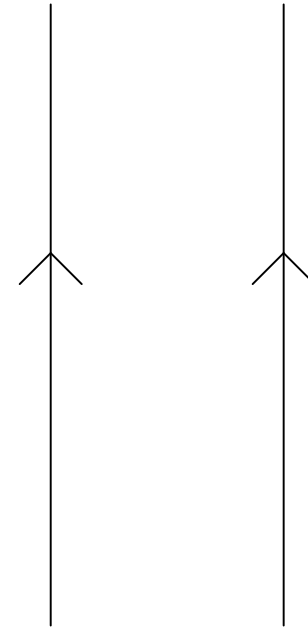


In twee draden lopen stromen, in dezelfde richting.
Er geldt:

A De draden stoten elkaar af

B De draden trekken elkaar aan

C Er zijn geen krachten tussen de draden



Constant B-veld

⇒ Lorentzkracht

⇒ bewegingsvergelijking voor q



Lorentzkracht

De Lorentzkracht

Voorbeelden

Het Hall effect

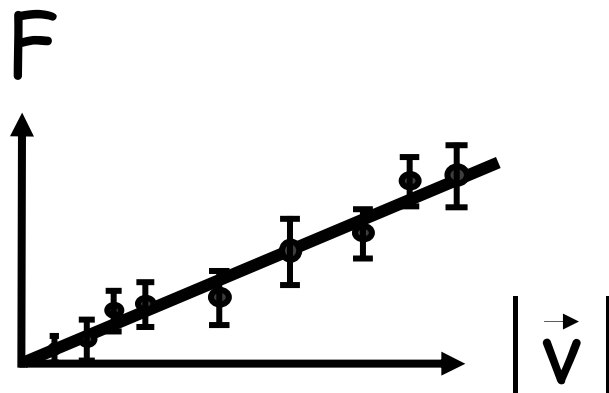
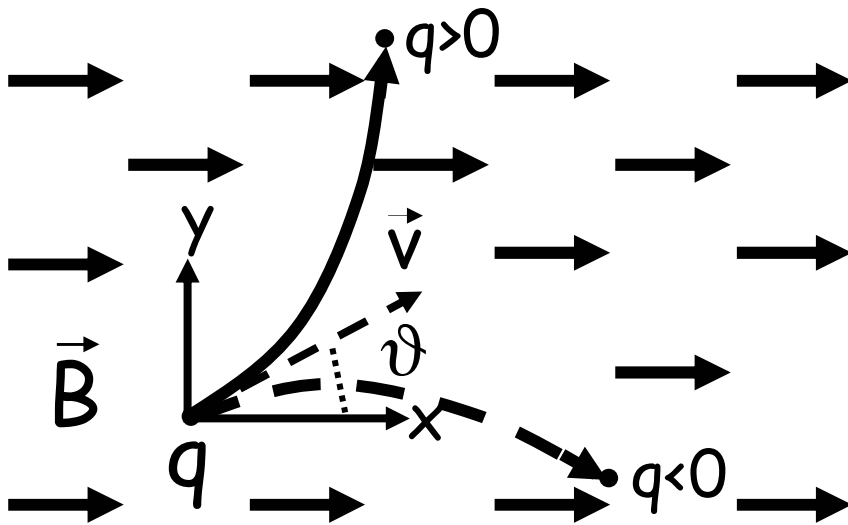
Kracht op stroomdraad

Moment op stroomlus

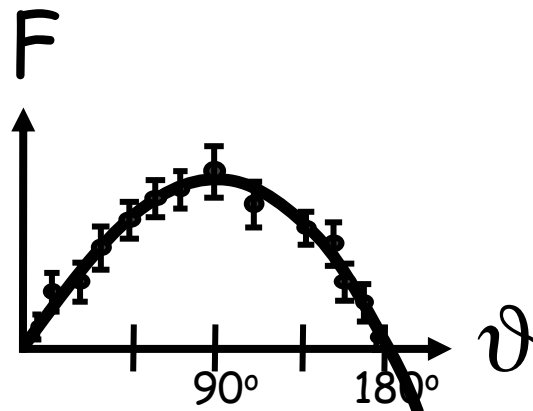
Lorentzkracht

Experiment

- $F \propto v \text{ eld } B$
- $F \propto \text{lading } q$
- $F \propto \text{snelheid } v$
- $F \propto \sinus \angle(\vec{v}, \vec{B})$
- $\vec{F} \perp \vec{v}$ en $\vec{F} \perp \vec{B}$



$$\Rightarrow F \propto |\vec{v}|$$



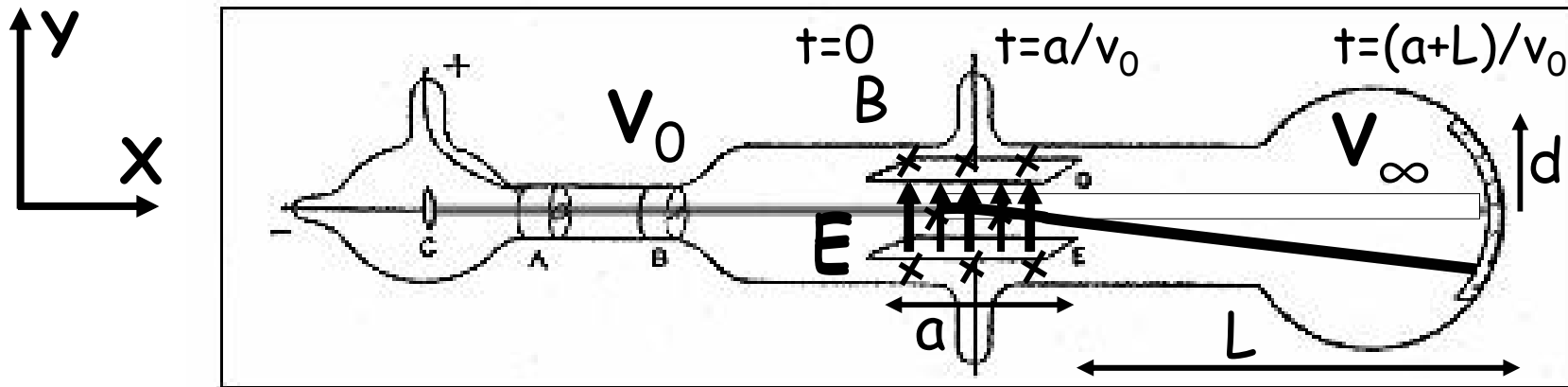
$$\Rightarrow F \propto \sin \vartheta$$

$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$$

<http://lectureonline.cl.msu.edu/~mmp/kap21/cd533capp.htm>

<http://www.phy.ntnu.edu.tw/java/emField/emField.html>

Ontdekking elektron (1897 J.J. Thomson)



~~figg~~ ~~vor~~ $\begin{cases} \vec{E} \neq \vec{0} \\ \vec{B} = \vec{0} \end{cases}$

$\vec{v}_{t=0} \equiv \vec{v}_0 = v_0 \hat{i}$

$\vec{v}_{t=a/v_0} \equiv \vec{v}_\infty = v_0 \hat{i} + \int_0^{a/v_0} \frac{eE}{m} \hat{j} dt = v_0 \hat{i} + \frac{eEa}{mv_0} \hat{j}$

$d \equiv v_y * \Delta t_{a \rightarrow a+L} = \frac{eEaL}{mv_0 v_0} \Leftrightarrow \frac{e}{m} = \frac{v_0^2 d}{EaL}$

$\vec{F} = m\vec{a} = m d\vec{v}/dt$

~~figg~~ ~~vor~~ $\vec{E} \perp \vec{B}$

$\Rightarrow \vec{0} = e\vec{E} + e\vec{v}_0 \times \vec{B}$

$\Leftrightarrow |\vec{v}_0| = \frac{|\vec{E}|}{|\vec{B}|}$

Combinatie levert e/m voor het elektron!

V.b. deeltje in uniform B-veld

Deeltje met:

- lading q , massa m en snelheid v

$$t = 0: \begin{cases} \vec{r} \equiv \vec{0} \\ \vec{v} \equiv v\hat{i} \end{cases}$$

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} = q \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ v_x & v_y & v_z \\ 0 & 0 & B \end{vmatrix} = qBv_y\hat{i} - qBv_x\hat{j} = m \frac{dv_x}{dt}\hat{i} + m \frac{dv_y}{dt}\hat{j} \Rightarrow$$

$$\vec{F} = m\vec{a} = m \frac{d\vec{v}}{dt}$$

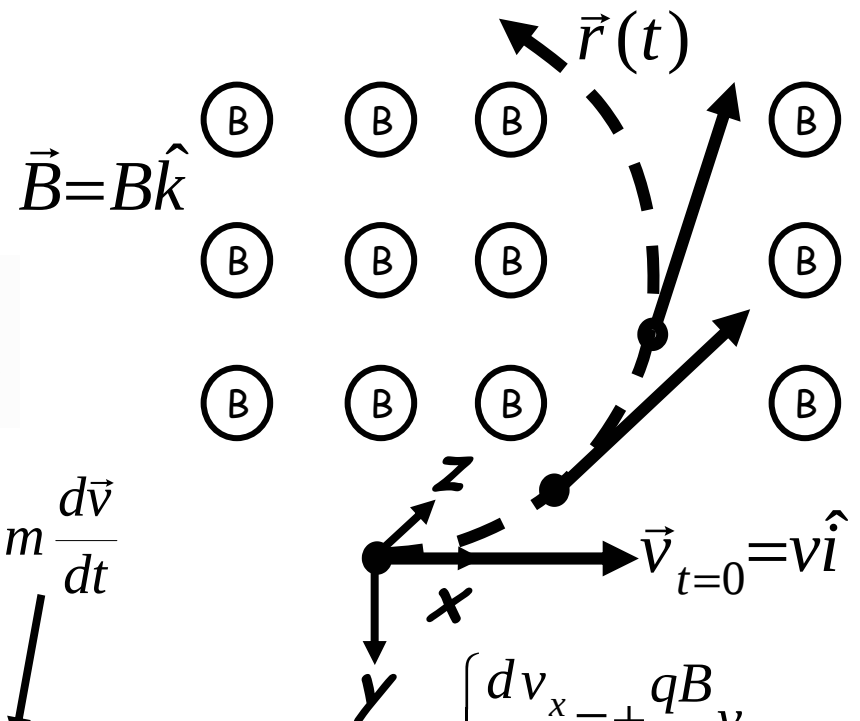
$$x(t) : \frac{d^2v_x}{dt^2} = -\left(\frac{qB}{m}\right)^2 v_x \Rightarrow v_x(t) = v \cos\left(\frac{qBt}{m}\right) \Rightarrow x(t) = \int_0^t v_x(t') dt' = \frac{mv}{qB} \sin\left(\frac{qBt}{m}\right)$$

Cyclotron frequentie: $\omega = 2\pi f = 2\pi/T$

Beschrijft cirkelbaan met ($v \perp B$):

- straal $R = mv/|q|B$
- periode $T = 2\pi m/|q|B$

Algemeen geldt: $R = mv_{\perp}/|q|B \equiv p_{\perp}/|q|B$



$$x(0) = 0$$

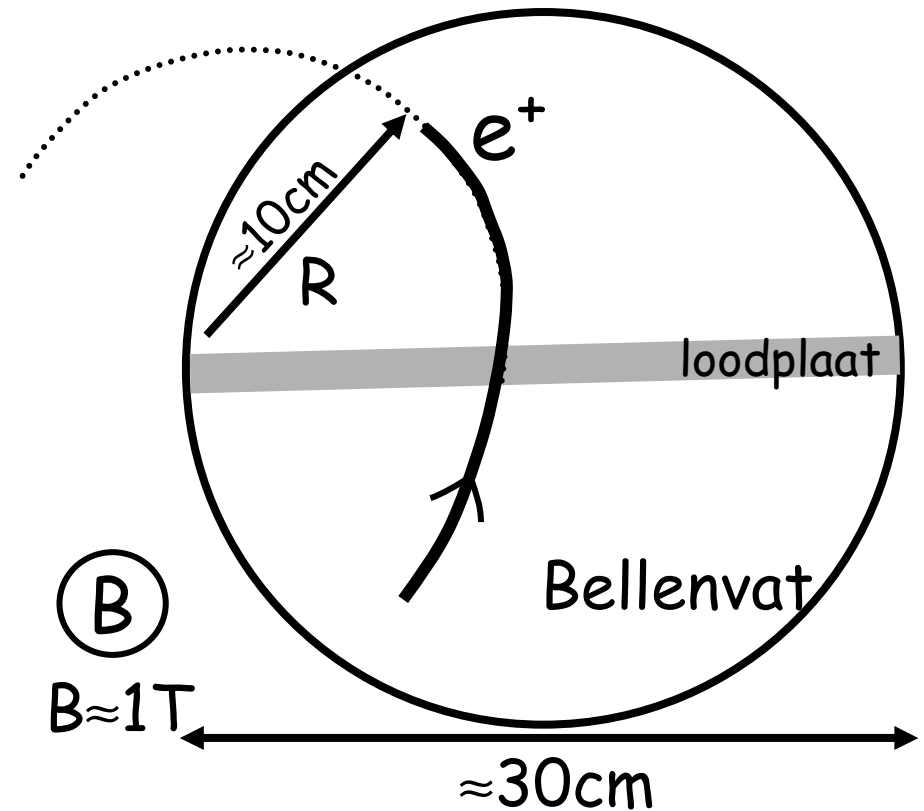
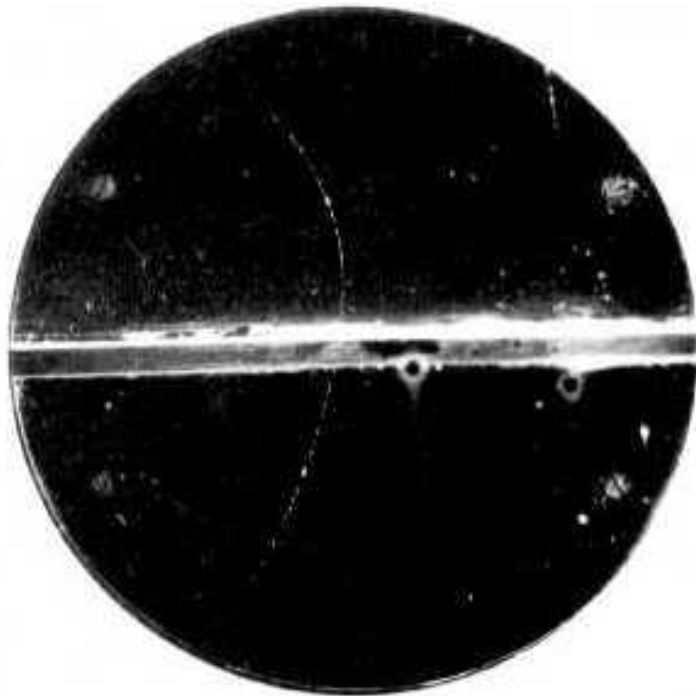
$$y(t) = \frac{mv}{qB} \cos\left(\frac{qBt}{m}\right) - \frac{mv}{qB}$$

Ontdekking positron (1932 C.D. Anderson)

Spoorreconstructie:

- In deeltjes fysica wordt energie bepaald uit kromming van spoor!

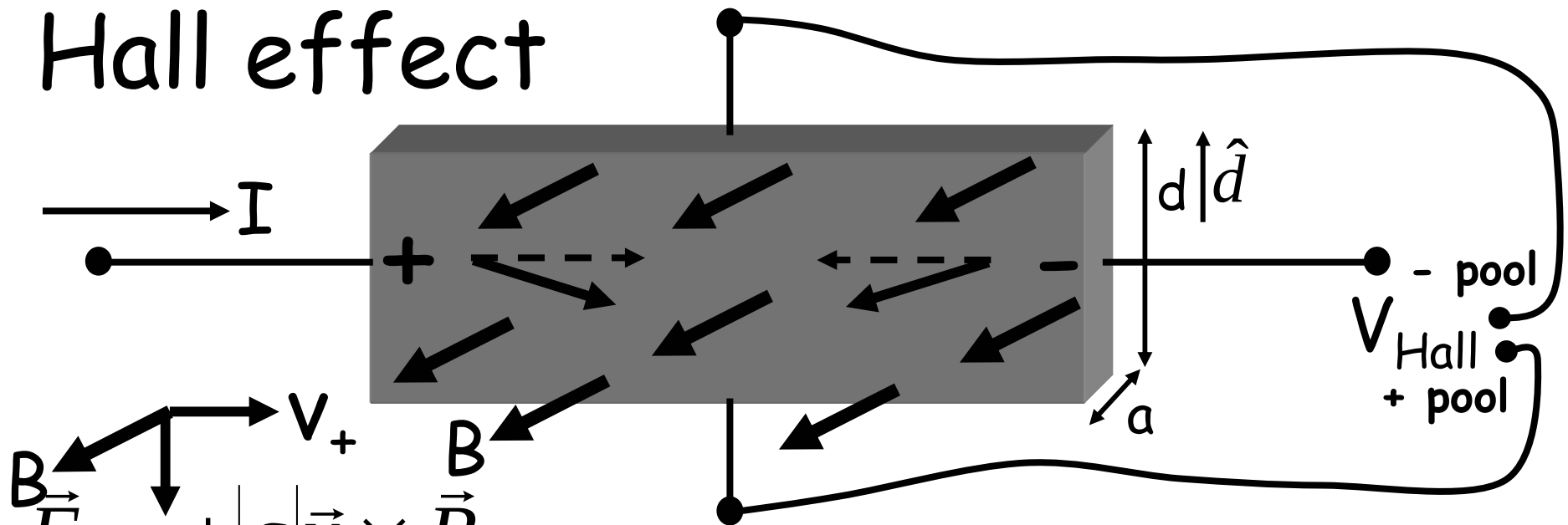
$$\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$$



$$p_{\perp} \approx 0.1 [\text{m}] * 1 [\text{T}] = 1.6 * 10^{-19} [\text{C}] = 1.6 * 10^{-20} [\text{kg m/s}]$$

$$m_e \approx 9.1 * 10^{-31} [\text{kg}] \Rightarrow v_{\perp} \approx \frac{1.6 * 10^{-20}}{9.1 * 10^{-31}} \approx 1.8 * 10^{10} [\text{m/s}]$$

Hall effect



$\Rightarrow$ afbuiging $q=+/- \Rightarrow$ E-veld: E_{Hall}

$$\vec{F} = -|q|\vec{v} \times \vec{B}$$

Voor $q=+/-$:

- dichtheid: N
- lading: q
- snelheid: v

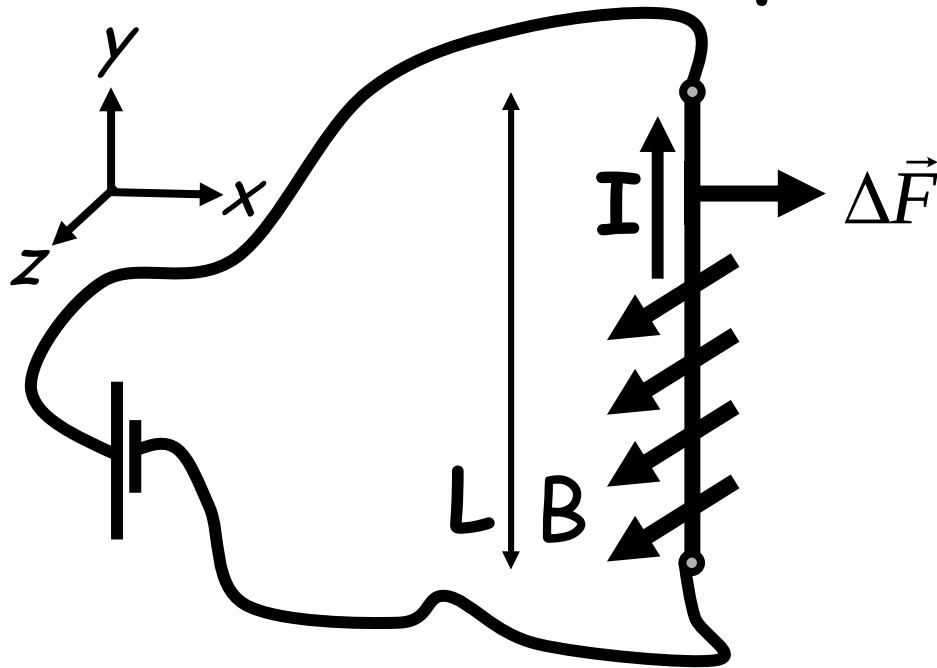
$$\Rightarrow I = Nq \cdot a \cdot v \text{ [C/s]}$$

$$\vec{0} = \vec{F}_{elec} + \vec{F}$$

Dus: $V_{Hall} < 0 \Rightarrow q$ negatief
 $V_{Hall} > 0 \Rightarrow q$ positief

$$\Rightarrow E_{Hall} = \frac{|qv|}{q} B = \frac{I}{Nad} \frac{B}{q} \Rightarrow V_{Hall} = d E_{Hall} = \frac{IB}{Nqa}$$

V.b. kracht op een stroomdraad



Situatie:

- uniform B-veld
- draadstuk L stroom I

Gevraagd:

- kracht F op draadstuk

$$\vec{B} = B\hat{k}, \quad \vec{I} = I\hat{j} \quad \text{en} \quad \vec{I} = \lambda\vec{v}$$

λ : $\begin{cases} \lambda: \text{ladingsdichtheid} & [C/m] \\ \vec{v}: \text{snelheid} & [m/s] \end{cases}$

$$\Delta\vec{F} = (\Delta q)\vec{v} \times \vec{B}$$

$$\rightarrow (\lambda\Delta l)\vec{v} \times \vec{B} = (\lambda\Delta l)vB\hat{i} \Rightarrow \vec{F} = \hat{i} \int \lambda v B dl = \hat{i} \lambda v BL = \hat{i} IBL$$

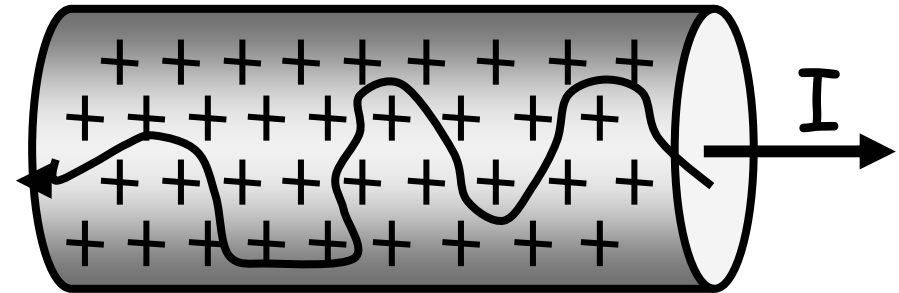
lijnstuk

~~Ge~~

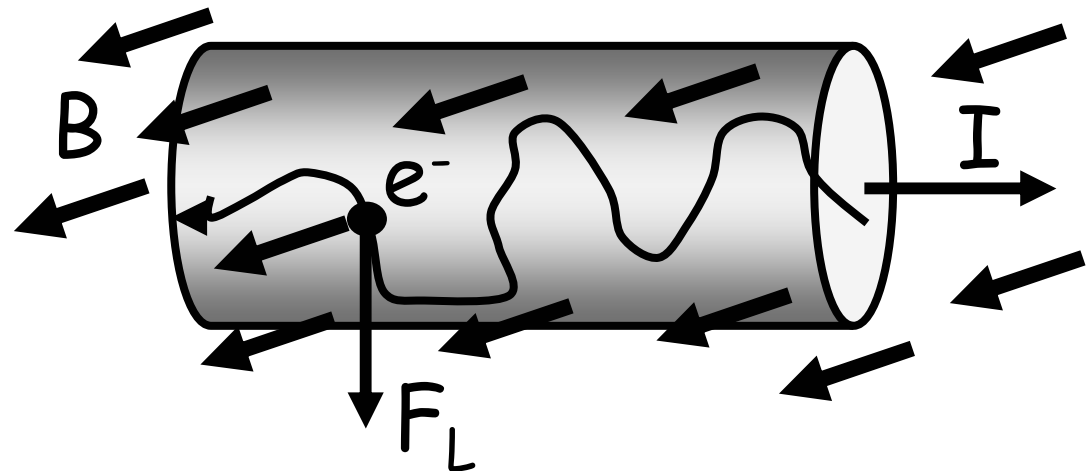
$$\text{nd: } \Delta\vec{F} = I\Delta\vec{l} \times \vec{B} \quad \text{en} \quad |\vec{F}| = IBL$$

Waarom beweegt stroomdraad?

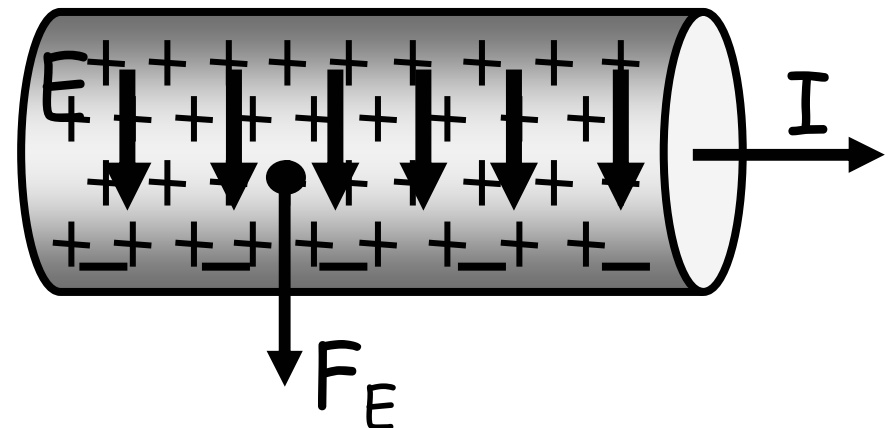
Niet F_{Lorentz} :
elektronen zwemmen
vrijelijk door draad!



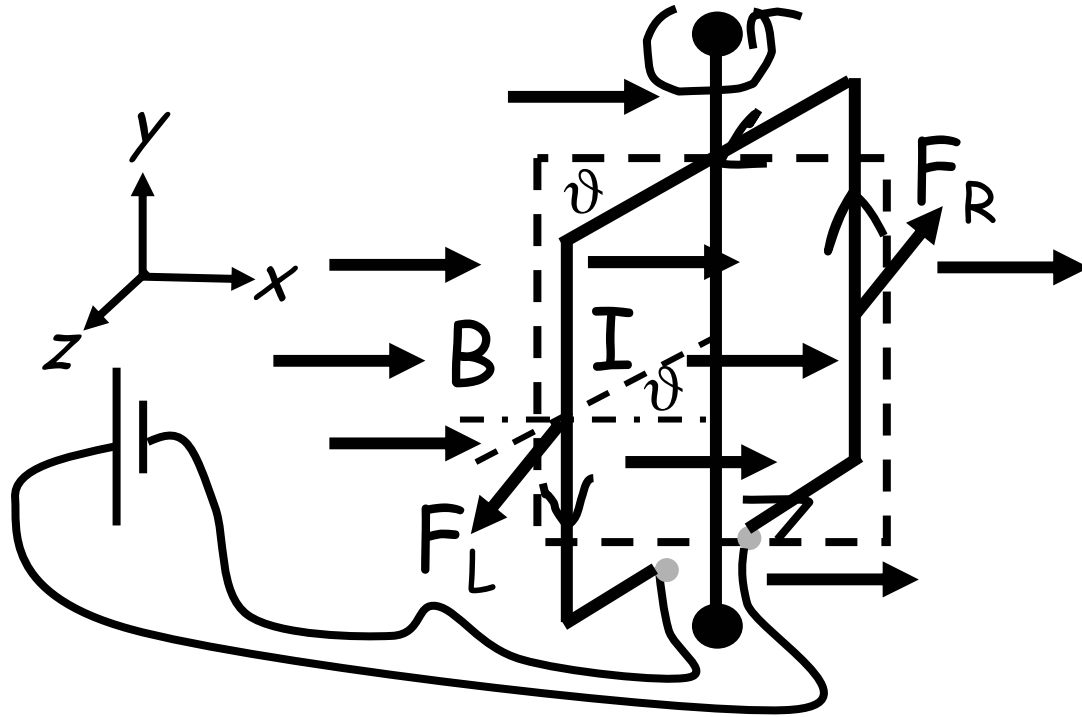
Hall effect:
Elektronen naar
onderkant draad!



$\Rightarrow$ E-veld:
E-veld trekt rooster
ionen (+) en daarmee de
draad naar beneden!



V.b. draaimoment stroomlus



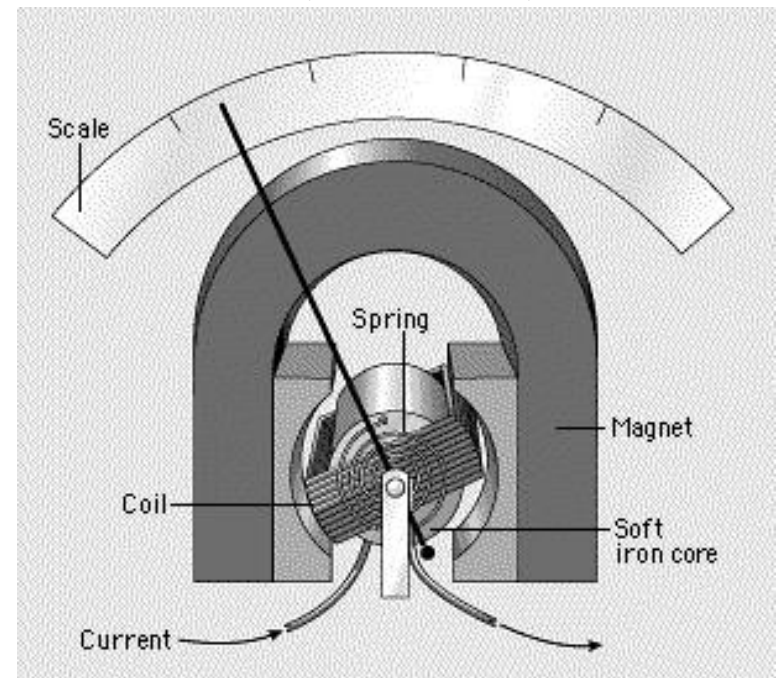
Situatie:

- uniform B-veld
- draadlus $L \times l$ stroom I

Gevraagd:

- moment τ op draadlus

Galvano (stroom) meter



$$\text{Kt} : \begin{cases} \vec{F}_L = +BIL\hat{k} \\ \vec{F}_R = -BIL\hat{k} \end{cases} \quad \vec{F}_L + \vec{F}_R = \vec{0}$$

$$\text{Dan} \quad \dagger: \tau = BIL^2 \cos \vartheta \quad (\text{A\&F } \vartheta \rightarrow \pi - \vartheta)$$

$$(\vec{\tau} = \vec{m} \times \vec{B}, \quad |\vec{m}| \equiv I \cdot \text{opp}$$

$$\Rightarrow \text{drlus} \quad \text{w} \perp \text{B-veld}$$

VII Wat heb ik geleerd?

Magneet N of Z

N

Lorentzkracht

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

Kracht, $\vec{B}$ -veld

$$\vec{F} = \int_{\text{stroom}} \vec{I} \times \vec{B} dl \rightarrow I \int_{\text{stroom}} d\vec{l} \times \vec{B}$$

- Hall effect
- e/m elektron
- Torsie op stroomlus

Inhoud

Magnetostatica

1. Lorentz kracht en magnetisch veld
- 2. Wet van Biot-Savart
3. Wet van Ampère
4. Veldvergelijkingen nader bekeken: $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I$ & $\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$
5. Magnetische velden in materie: magnetisatie

Griffiths:

- Wet van Biot-Savart: §5.2

$I = \text{constant gegeven} \Rightarrow B\text{-veld}$



Wet van Biot-Savart

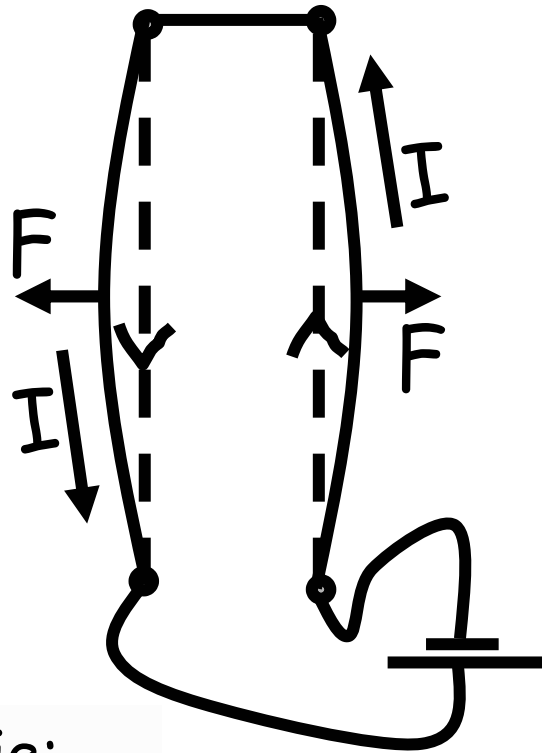
De elektrische stroom I

Het verband tussen stroom I en veld B

Voorbeelden

V.b. kracht tussen stroomdraden

Experiment A



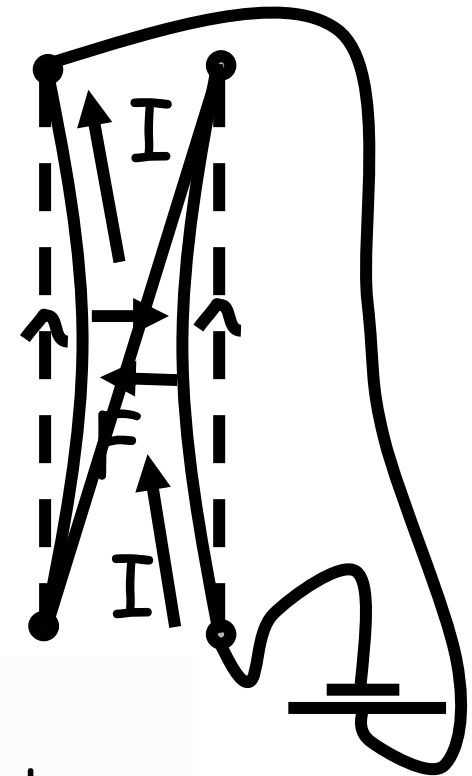
Observatie:

- afstoting

Uitleg:

- elektrisch?

Experiment B



Observatie:

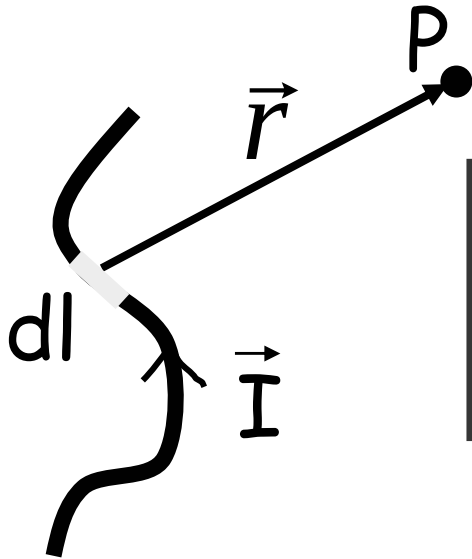
- aantrekking!

Uitleg:

- niet elektrisch!
- Magnetisch? Ja!

Wet van Biot-Savart: experiment

Elektrische stroom $\Rightarrow$ magnetisch veld!



$$\vec{B}_P = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{\text{lijn}} \frac{d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2} \rightarrow \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\text{lijn}} dl \frac{\vec{I} \times \hat{r}}{r^2}$$

- permeabiliteit:

$$\mu_0 \equiv 4\pi * 10^{-7} \frac{N}{A^2}$$

- permittiviteit:

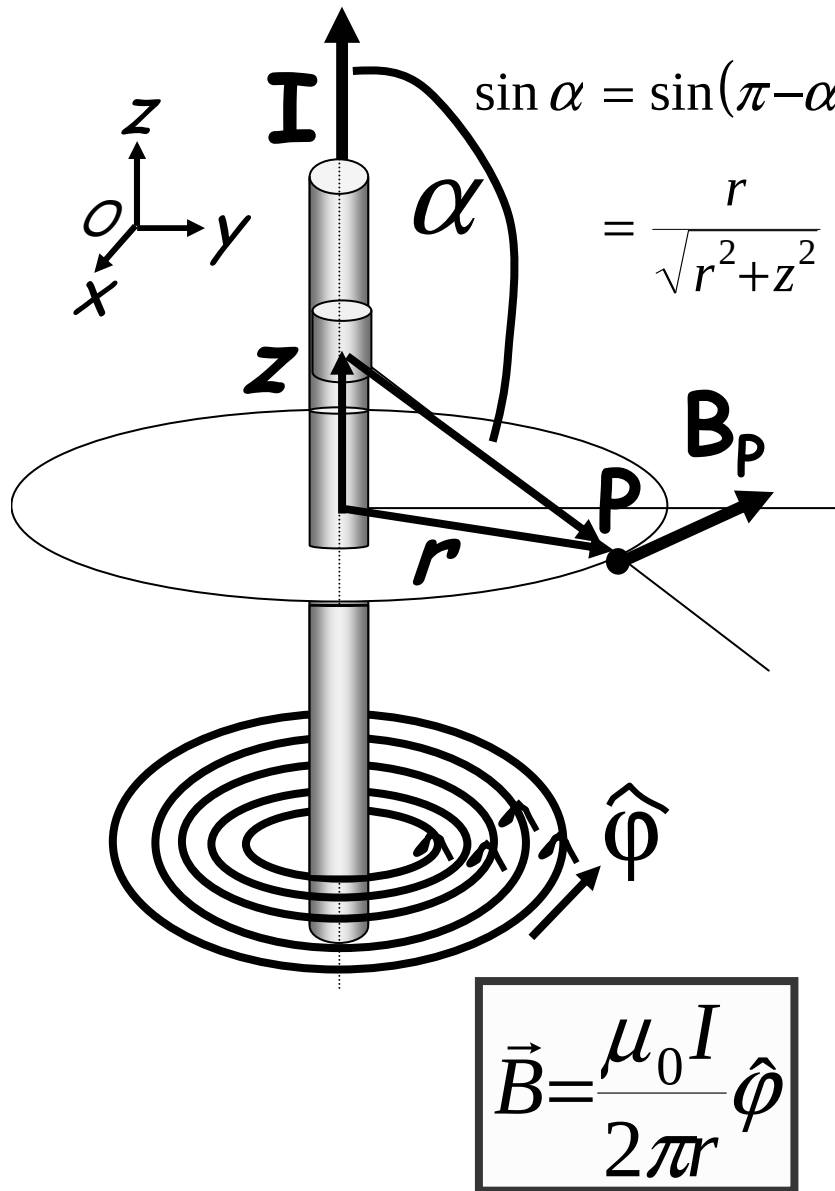
$$\epsilon_0 \equiv \frac{1}{4\pi * 10^{-7} c^2} \frac{C^2}{Nm^2}$$

Samenhang:

- elektrostatica: ladingen
- magnetostatica: stromen

$$1/\epsilon_0 \mu_0 = c^2 \quad [m^2/s^2]$$

V.b. B-veld ∞ lange draad



Berekening B-veld:

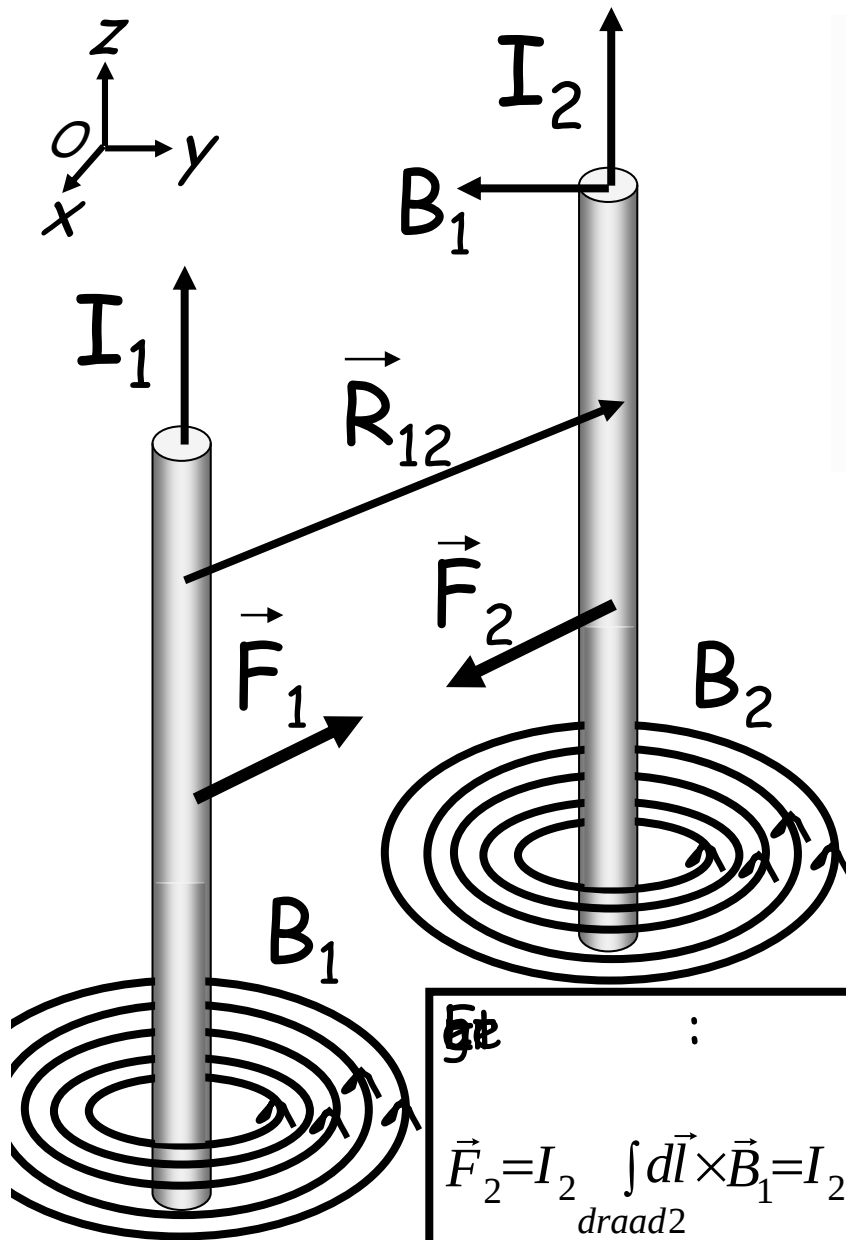
Nadenken:

- Cilindersymmetrie: $(r\phi z)$
- B in azimuthale (ϕ) richting

Rekenen:

$$\begin{aligned}
 |\vec{B}_P| &= \left| \int_{\text{lijn}} d\vec{B}_\phi \right| = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dz}{[r^2 + z^2]} \sin \alpha \\
 &= \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{dz}{[r^2 + z^2]} \frac{r}{\sqrt{r^2 + z^2}} \\
 &= \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{z}{r \sqrt{r^2 + z^2}} \Big|_{-\infty}^{+\infty} = \frac{2\mu_0 I}{4\pi r} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}
 \end{aligned}$$

V.b. kracht tussen stroomdraden



Situatie:

- stroomdraden met I_1 en I_2
- afstand R_{12} , draadlengten $L \gg R_{12}$

Gevraagd:

- kracht op draad 2

Slim/snel antwoord:

- B-veld draad 1 op draad 2:

$$B_1 = \mu_0 I_1 / 2\pi R_{12}$$

- kracht op draad 2 door B_1

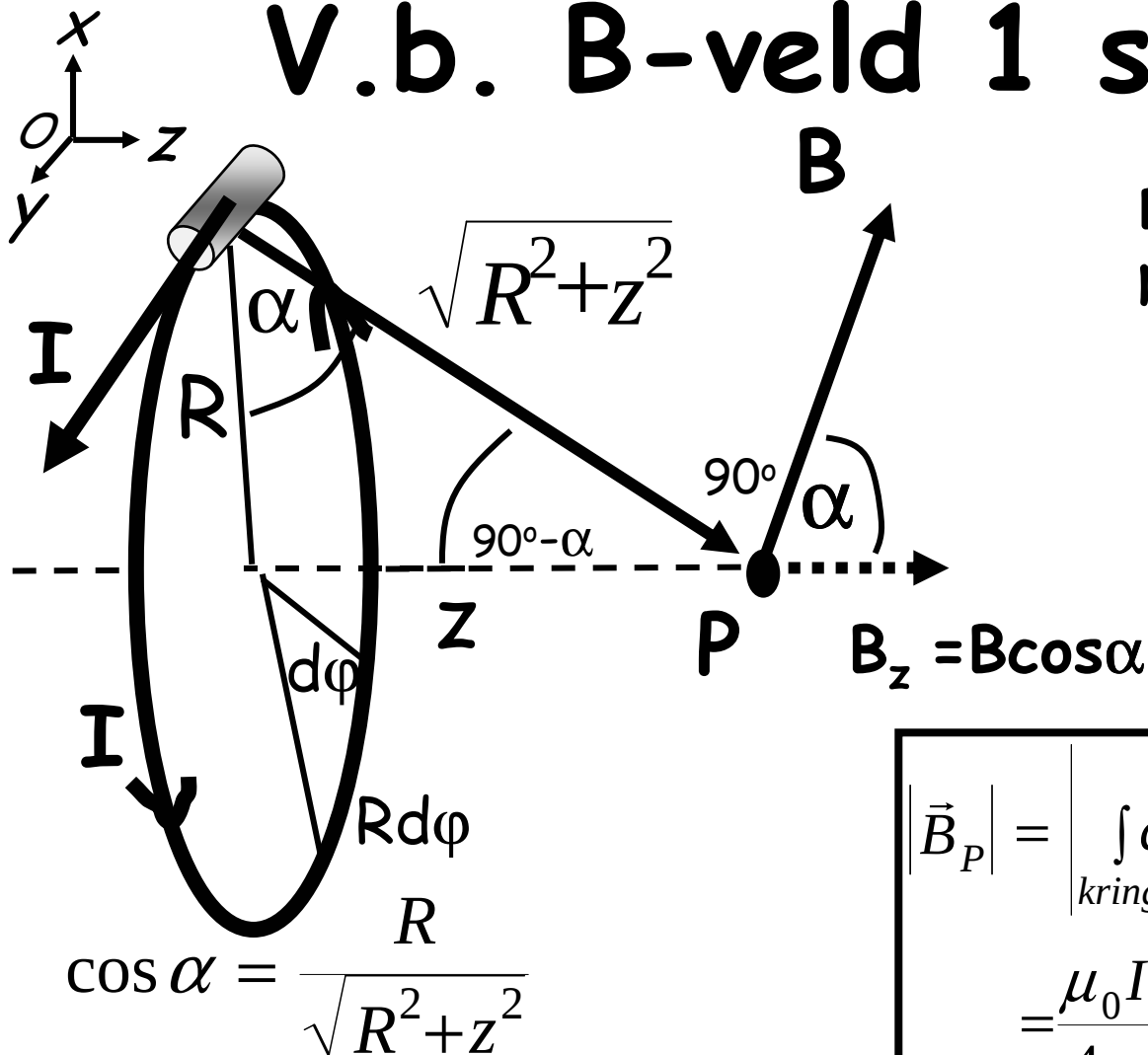
$$F_2 = B_1 I_2 L = \mu_0 I_1 I_2 L / 2\pi R_{12}$$

Ge

:

$$\vec{F}_2 = I_2 \int_{\text{draad 2}} d\vec{l} \times \vec{B}_1 = I_2 \int_{\text{draad 2}} d\vec{l} \times \frac{\mu_0 I_1}{2\pi R_{12}} \hat{\phi} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi R_{12}} \int_{\text{draad 2}} d\vec{l} \times \hat{\phi} = -\frac{\mu_0 I_1 I_2 L}{2\pi R_{12}} \hat{R}_{12}$$

V.b. B-veld 1 stroomkring



Berekening B-veld:

Nadenken:

- Cilindersymmetrie
- $\vec{B} \parallel$ as stroomkring

Rekenen:

$$Rd\phi = dl$$

$$B_z = B \cos \alpha$$

$$\begin{aligned} |\vec{B}_P| &= \left| \int_{\text{kring}} dB_z \right| = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{Rd\phi}{[R^2 + z^2]} \cos \alpha \\ &= \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_0^{2\pi} \frac{Rd\phi}{[R^2 + z^2]} \frac{R}{\sqrt{R^2 + z^2}} \quad \leftarrow \cos \alpha \\ &= \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{R^2 \phi}{[R^2 + z^2]^{3/2}} \bigg|_0^{2\pi} = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{R^2}{[R^2 + z^2]^{3/2}} \end{aligned}$$

$$\vec{B}_P = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{R^2}{[R^2 + z^2]^{3/2}} \hat{z}$$

VIII Wat heb ik geleerd?

Magneet N of Z



Kracht, $\vec{B}$ -veld

Lorentzkracht

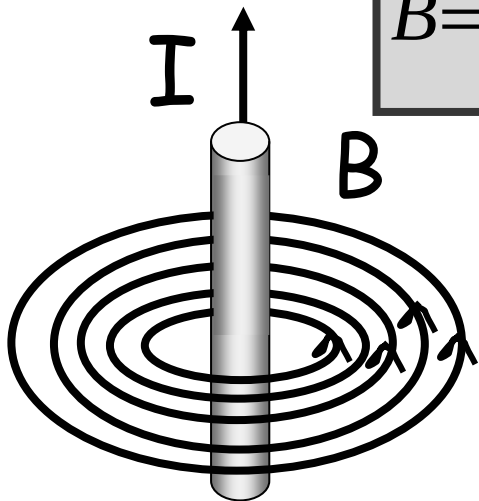
$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

$$\vec{F} = \int_{\text{stroom}} \vec{I} \times \vec{B} dl \rightarrow I \int_{\text{stroom}} d\vec{l} \times \vec{B}$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{\text{stroom}} \frac{d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2} \rightarrow \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\text{stroom}} dl \frac{\vec{I} \times \hat{r}}{r^2}$$

stroomdraad

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \hat{\phi}$$



stroomkring

$$\vec{B}_{z-as} = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{R^2}{[R^2 + z^2]^{3/2}} \hat{z}$$

