

Hoofdstuk 4: Magnetostatica

1. Inleiding

2. De magnetische inductie of magnetische fluxdichtheid
3. Magnetische veldlijnen
4. Berekening van de magnetische inductie door toepassing van de wet van Biot-Savart
5. Stelling van de lijnintegraal
6. Magnetische flux
7. Toepassing van de stelling van de lijnintegraal
8. Kracht door een uniform magnetisch veld op een rechte stroomvoerende geleider
9. Kracht op een bewegende lading
10. Krachtwerking evenwijdige stroomvoerende geleiders
11. Arbeid verricht bij de verplaatsing van een stroomvoerende geleider in een magnetisch veld
12. Zelfinductie- en wederzijdse inductiecoëfficiënt
13. Berekening van zelfinductiecoëfficiënten
14. Magnetisch gedrag van materialen
15. Hysteresis bij ferromagnetische materialen
16. Magnetische energie gestockeerd bij een spoel

MAGNETOSTATICA

4.1 Inleiding



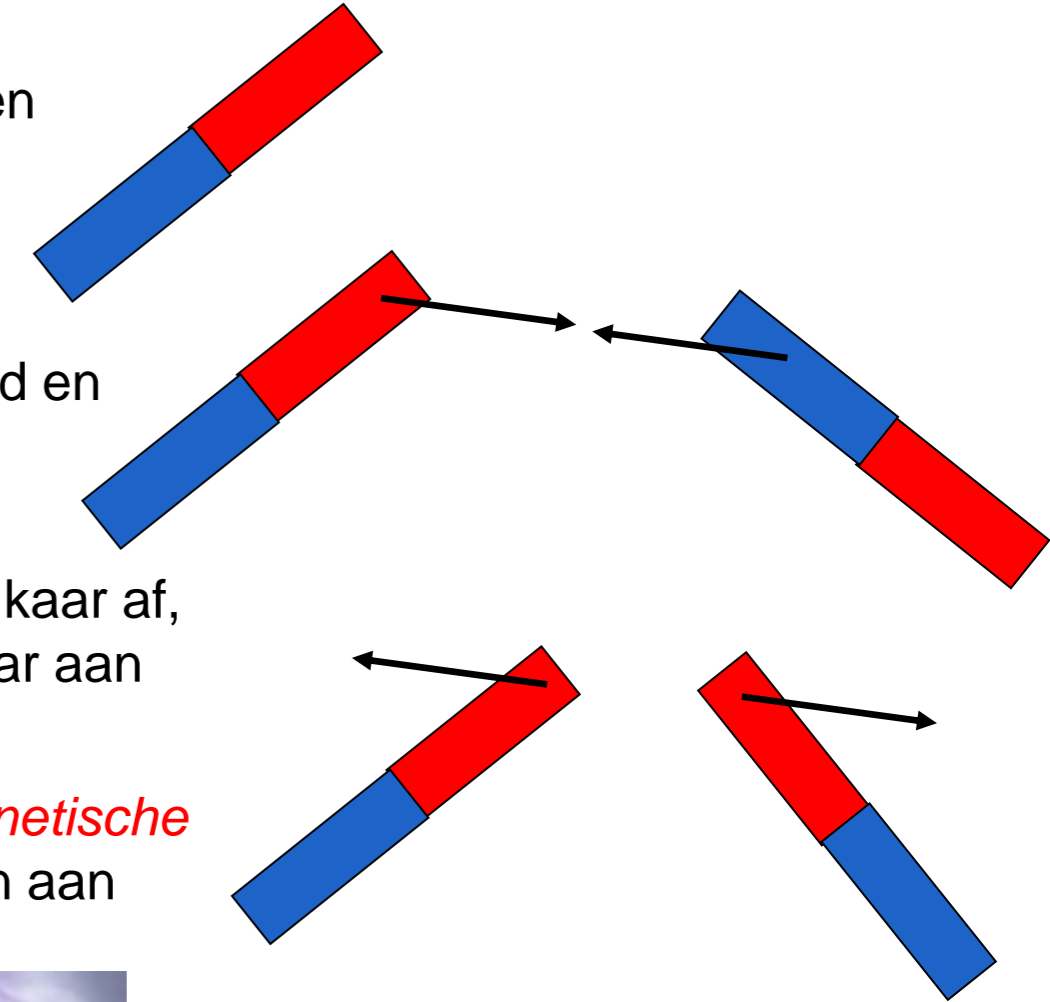
Magnetiet: $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$
-natuurlijke magnetische stof

Observatie: ijzeren naald in de omgeving van stuk magnetiet richt zich langs lijnen die convergeren naar twee tegenover elkaar liggende punten

Deze punten noemt men 'magnetische polen'.



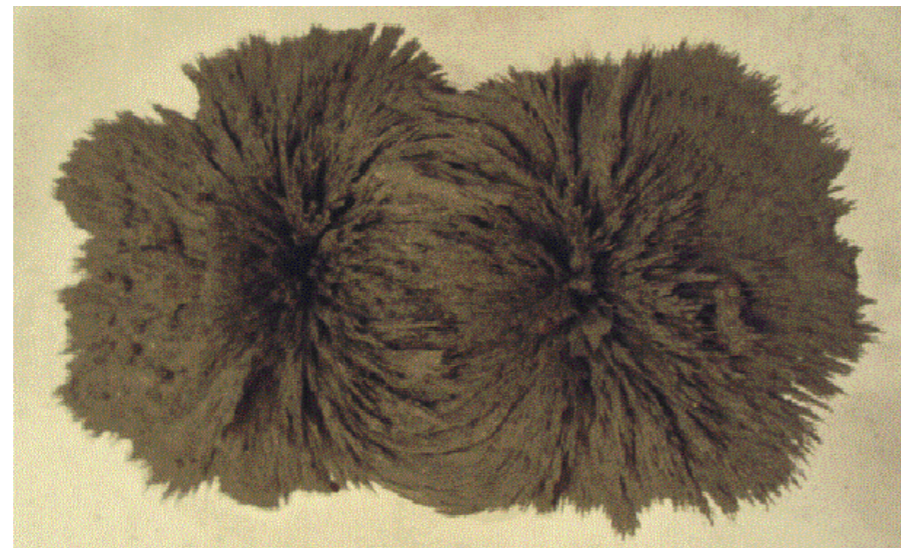
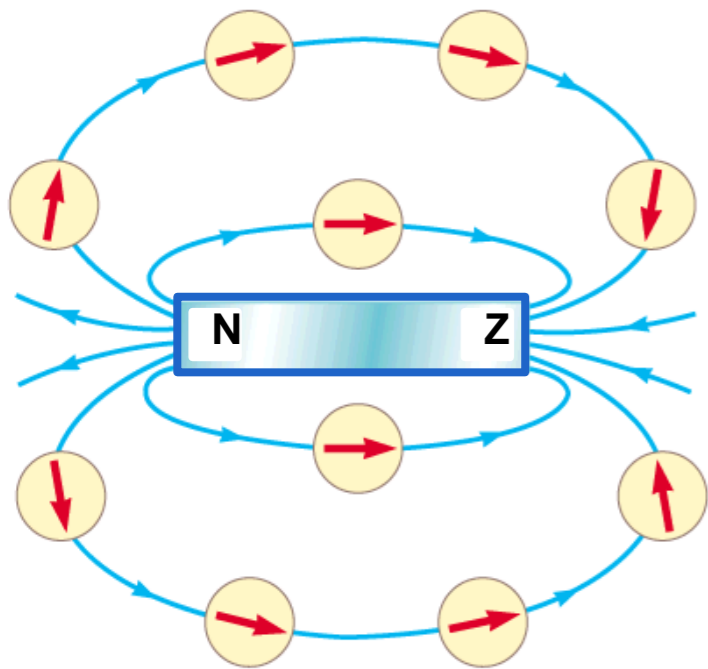
- Magneten hebben twee polen (*noord* en *zuid*)
- Magnetische polen komen paarsgewijs voor (altijd noord en zuidpool samen)
- Gelijknamige polen stoten elkaar af, ongelijknamige trekken elkaar aan
- Magneten trekken *ferromagnetische* (*ijzergebaseerde*) materialen aan



MAGNETOSTATICA

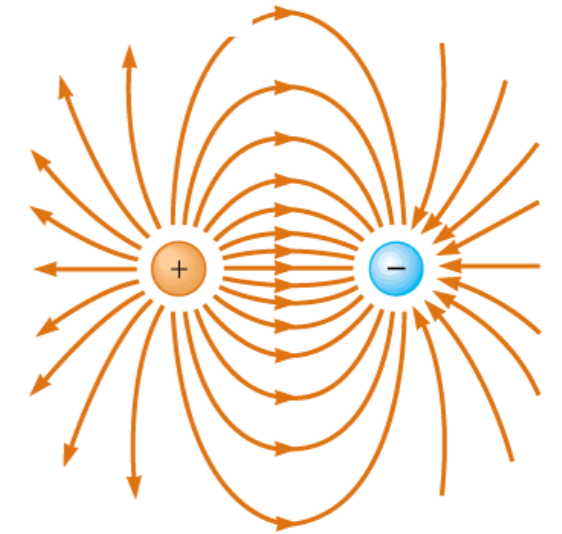
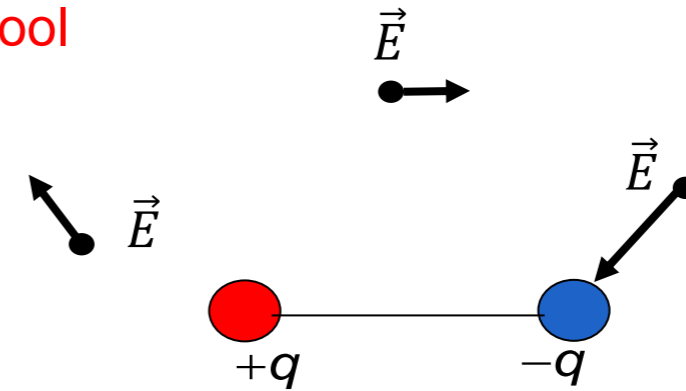
4.1 Inleiding

- elke pool gekenmerkt door een 'magnetische poolsterkte'
- magnetische poolsterkte van de polen van een magneet hebben zelfde absolute waarde
- vorming van veldlijnen – visualisatie van veldlijnen – veldlijnen buiten magneet gericht van 'noordpool' naar 'zuidpool'

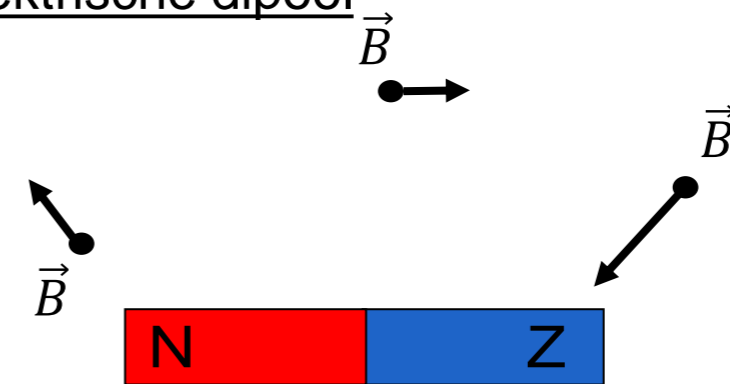


Visualisatie via ijzervijlsel

Elektrische veld; elektrische dipool



- Het magnetische veldpatroon van een staafmagneet is analoog aan het elektrische veldpatroon van een elektrische dipool

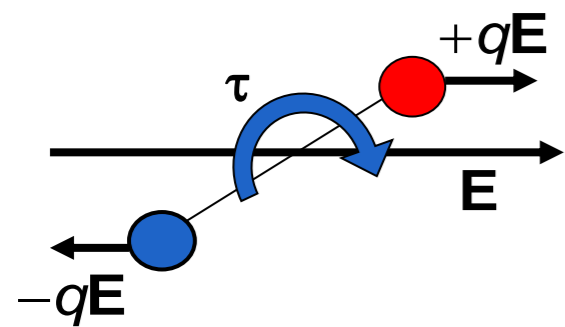


- Een magneet wekt een magnetisch veld \vec{B} op.
- Magneetveld beschrijven aan de hand van een vectorveld \vec{B} , een 'krachenveld'
- vectorveld \vec{B} is weggericht van noordpool, gericht naar de zuidpool

MAGNETOSTATICA

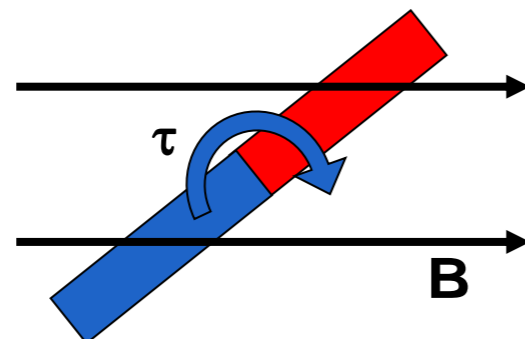
4.1 Inleiding

ELEKTRISCHE DIPOOL

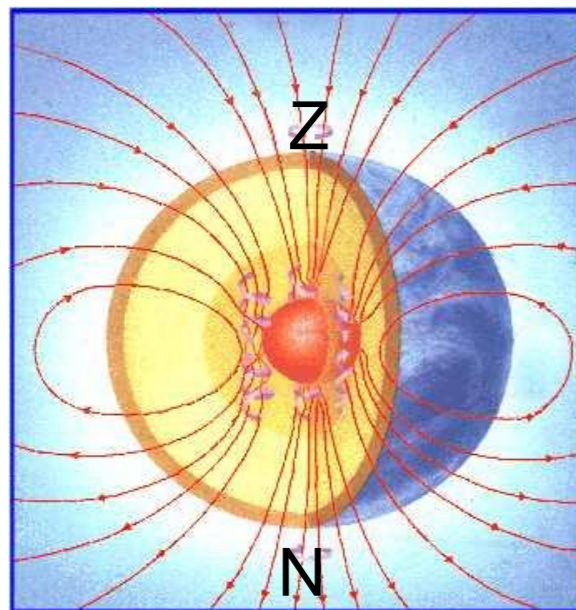


door krachtwerking komt elektrische dipool evenwijdig met elektrisch veld

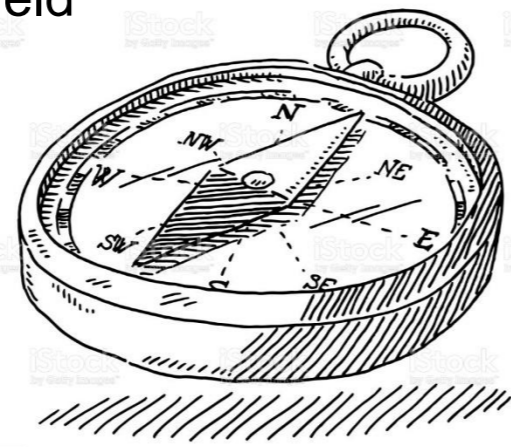
MAGNETISCHE DIPOOL



door krachtwerking komt magnetische dipool evenwijdig met magnetisch veld

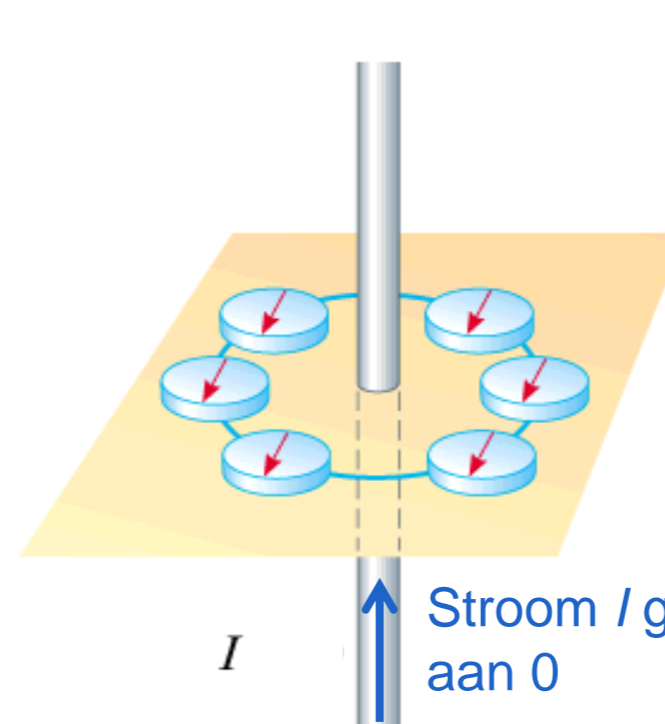


geografische noordpool= magnetische zuidpool

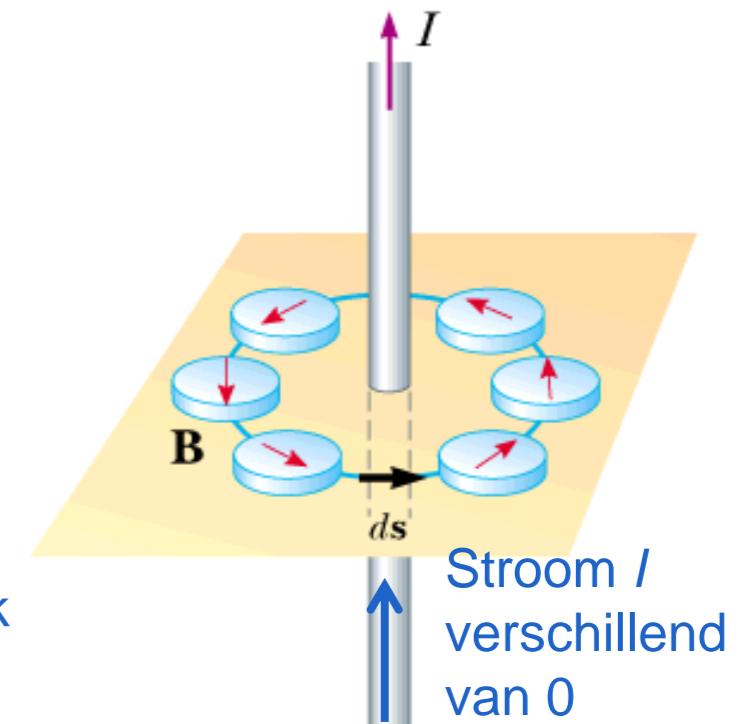


Experiment van Oersted (1820)

elektrische stroom doet magneetnaald uitwijken
Magneetjes vormen concentrische cirkels rond geleider



elektrische stroom is bron voor magnetisch veld



MAGNETOSTATICA

4.2 De magnetische inductie of magnetische fluxdichtheid

(i) Krachtwerking tussen twee evenwijdige stroomvoerende geleiders in lucht:

- elektrische stroom in zelfde zin: trekken elkaar aan
- elektrische stroom in tegengestelde zin: stoten elkaar af (tegegengestelde als in elektrostatica)

(ii) begrip 'lineaire stroomelement' (uitdrukking van de vorm $I d\vec{l}$)
Kracht steeds loodrecht gericht op stroomelement

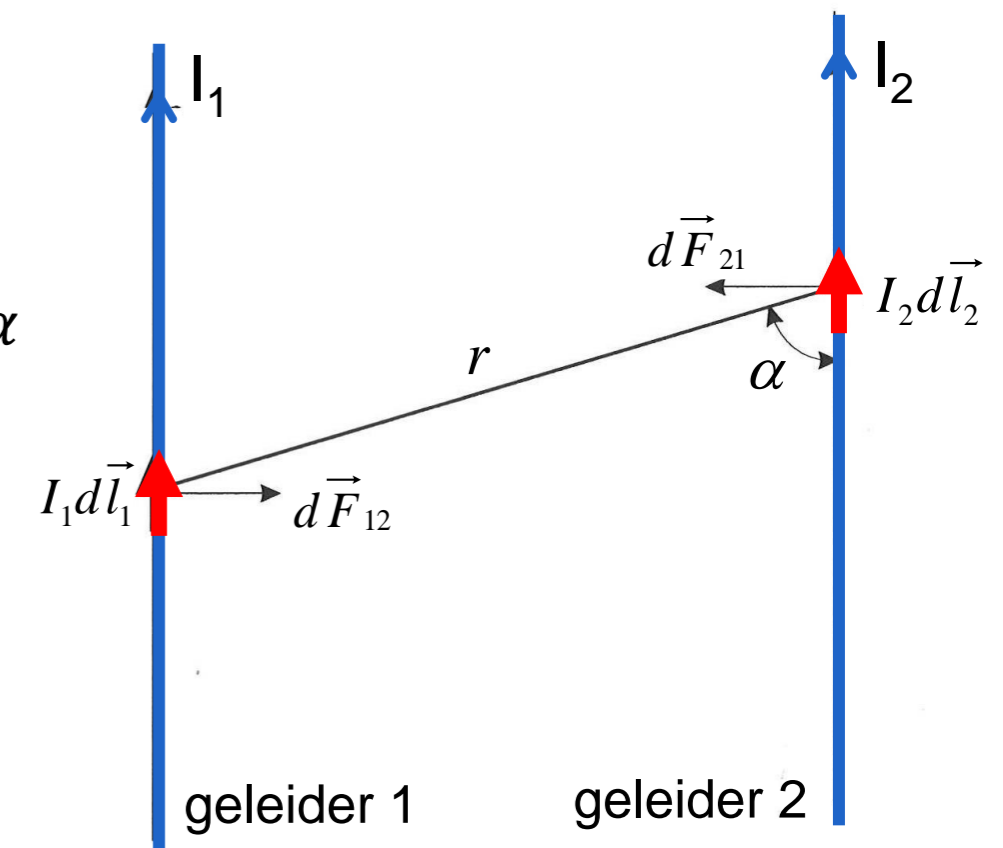
$$dF_{12} = dF_{21} = k \frac{I_1 dl_1 I_2 dl_2}{r^2} \sin \alpha$$
$$= I_1 dl_1 k \frac{I_2 dl_2}{r^2} \sin \alpha = I_1 dl_1 dB_2$$

$$dB_2 = \frac{dF_{12}}{I_1 dl_1} = k \frac{I_2 dl_2}{r^2} \sin \alpha$$

$$k = \frac{\mu_0}{4\pi}; \mu_0 = 4\pi 10^{-7}$$

$dB_2 =$ magnetische inductie op plaats $I_1 dl_1$ ten gevolge van $I_2 dl_2$

synoniem: magnetische inductie = magnetische fluxdichtheid



MAGNETOSTATICA

4.2 De magnetische inductie of magnetische fluxdichtheid

(iii) kracht op stroomelement $I_1 dl_1$ door volledige geleider 2?

$$dF_1 = \int_{\text{geleider 2}} dF_{12} = \int_{\text{geleider 2}} \mu_0 \frac{I_1 dl_1 I_2 dl_2}{4\pi r^2} \sin \alpha$$

$$= I_1 dl_1 \int_{\text{geleider 2}} \mu_0 \frac{I_2 dl_2}{4\pi r^2} \sin \alpha = I_1 dl_1 \int_{\text{geleider 2}} dB_2 = I_1 dl_1 B_2$$

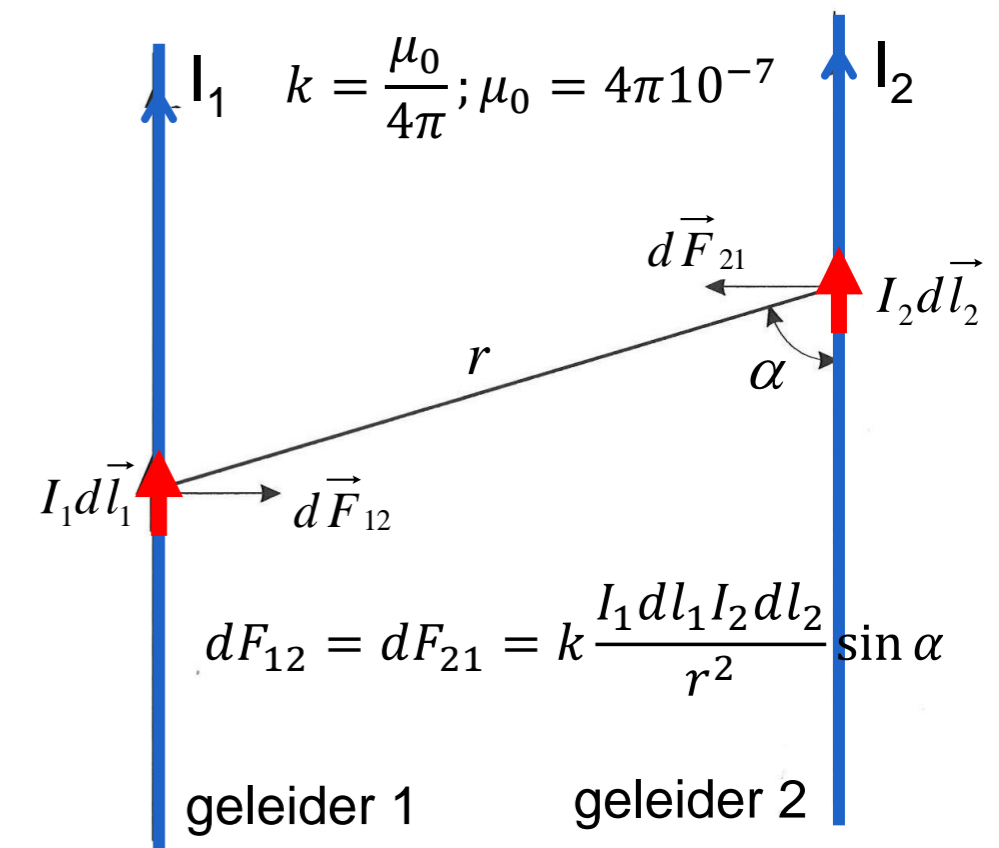
$$dF_1 = I_1 dl_1 B_2 \quad \text{Eenheid van } \vec{B} : \text{N/(Am)} = \text{Tesla}$$

wet van Biot-Savart

(iv) Kracht op volledige geleider 1 door volledige geleider 2?

$$F_1 = \int_{\text{geleider 1}} dF_1 = \int_{\text{geleider 1}} \left(\int_{\text{geleider 2}} dF_{12} \right)$$

$$= \int_{\text{geleider 1}} \left(\int_{\text{geleider 2}} \mu_0 \frac{I_1 dl_1 I_2 dl_2}{4\pi r^2} \sin \alpha \right) = \int_{\text{geleider 1}} I_1 dl_1 \left(\int_{\text{geleider 2}} \mu_0 \frac{I_2 dl_2}{4\pi r^2} \sin \alpha \right)$$



MAGNETOSTATICA

4.2 De magnetische inductie of magnetische fluxdichtheid

Veralgemening van wet: willekeurige oriëntering van stroomelementen

$$d\vec{F}_{12} = \mu_0 \frac{I_1 d\vec{l}_1 \times (I_2 d\vec{l}_2 \times \vec{r})}{4\pi r^2}$$
 komt overeen met vroeger

$$d\vec{F}_{12} = I_1 d\vec{l}_1 \times d\vec{B}_2$$

$$d\vec{B}_2 = \frac{\mu_0 (I_2 d\vec{l}_2 \times \vec{r})}{4\pi r^2}$$
 wet van Biot-Savart

\vec{r} is gericht van $I_2 d\vec{l}_2$ naar $I_1 d\vec{l}_1$
 (weggericht van de oorzaak van $d\vec{B}_2$)

$$d\vec{F}_1 = I_1 d\vec{l}_1 \times \vec{B}$$

\vec{B} = krachtenveld gegenereerd door elektrische stroom I_2 in geleider 2 op plaats van stroomelementje $I_1 d\vec{l}_1$

geleider 2

Zin van vectorproduct:
 - rechtse kurkentrekkerregel
 - regel van rechterhand $\vec{a} \times \vec{b}$

$$\vec{a} \times \vec{b} = \begin{vmatrix} \vec{1}_x & \vec{1}_y & \vec{1}_z \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_y & a_z \\ b_y & b_z \end{vmatrix} \vec{1}_x - \begin{vmatrix} a_x & a_z \\ b_x & b_z \end{vmatrix} \vec{1}_y + \begin{vmatrix} a_x & a_y \\ b_x & b_y \end{vmatrix} \vec{1}_z$$

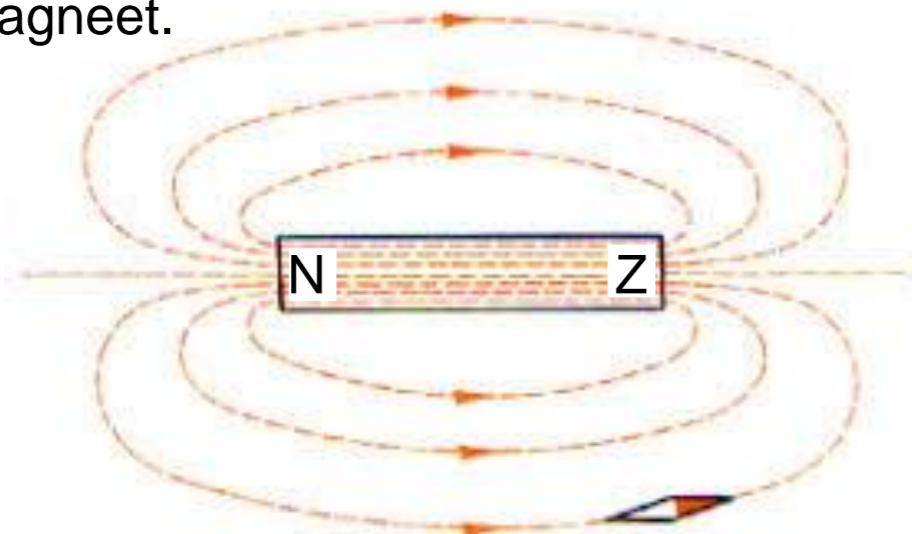
$$= (a_y b_z - a_z b_y) \vec{1}_x - (a_x b_z - a_z b_x) \vec{1}_y + (a_x b_y - a_y b_x) \vec{1}_z$$

MAGNETOSTATICA

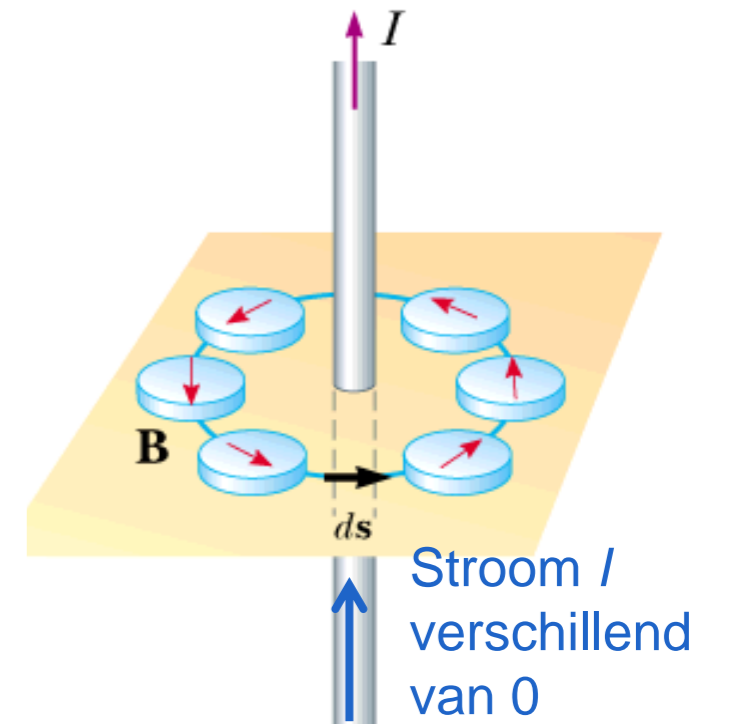
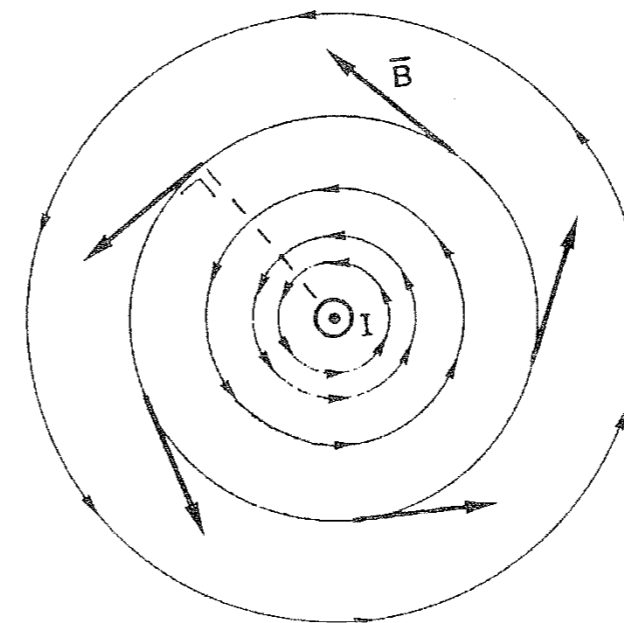
4.3 Magnetische veldlijnen

Magnetische veldlijnen voldoen aan:

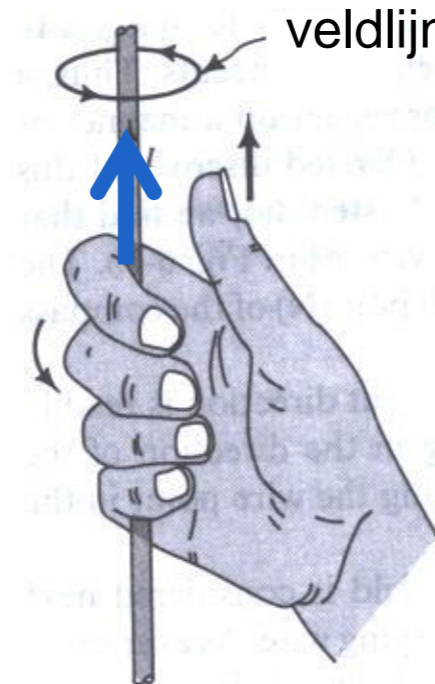
- (i) in ieder punt moeten ze raken aan de magnetische inductievector \vec{B}
- (ii) de zin van de magnetische veldlijnen moet samenvallen met de zin van de magnetische inductievector \vec{B}
- (iii) de dichtheid van de magnetische veldlijnen dwz het aantal veldlijnen per oppervlakte-eenheid moet evenredig zijn met de grootte van de magnetische inductievector \vec{B}
- (iv) opmerking: magnetische veldlijnen hebben geen begin- en eindpunt; bij een permanente magneet sluiten de veldlijnen zich binnen de magneet.



Bovenaanzicht



Elektrische stroom



Veldlijnen rond stroomvoerende geleider

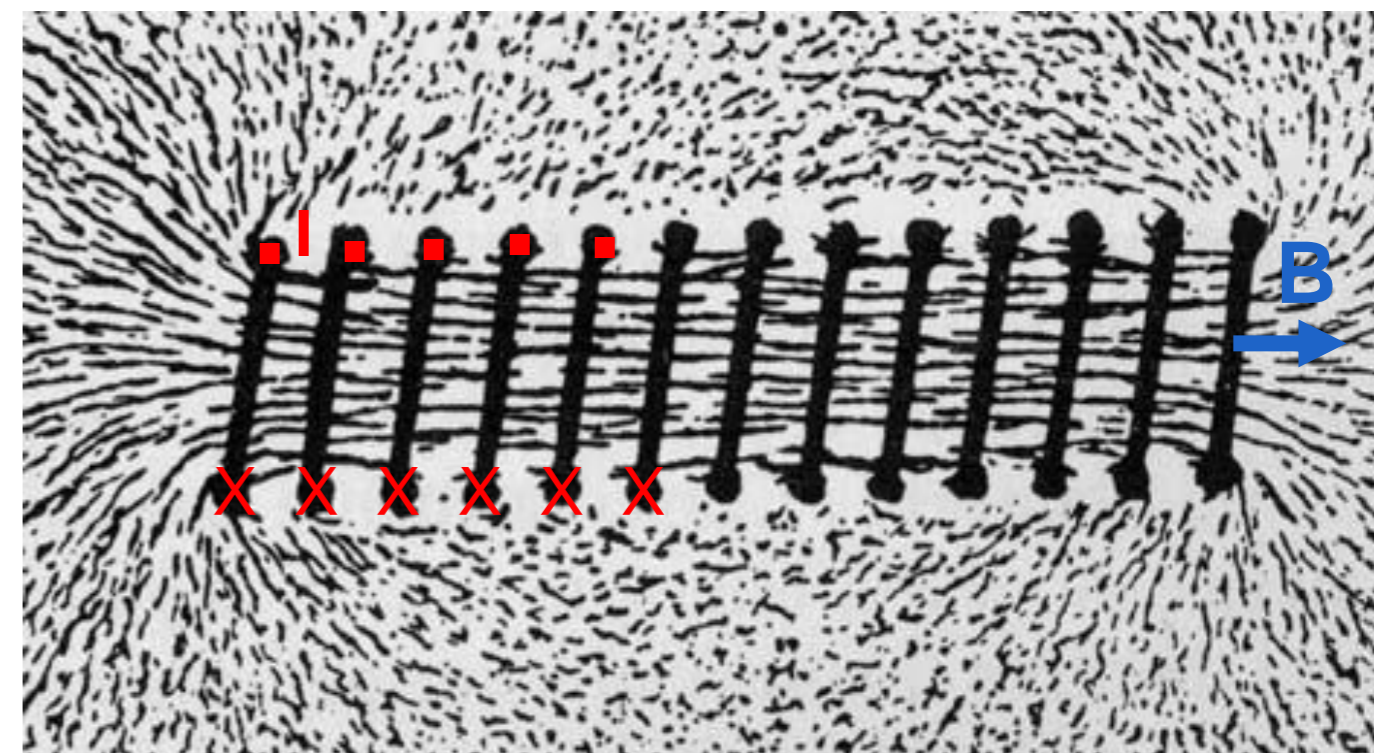
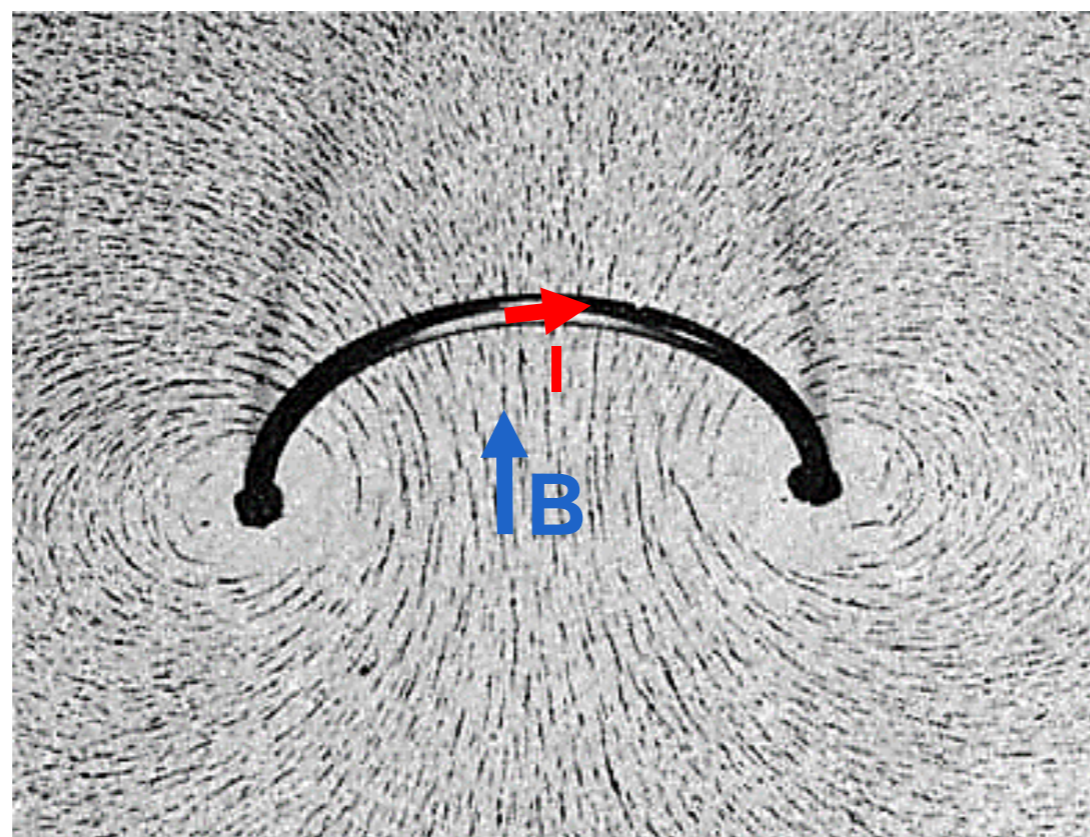
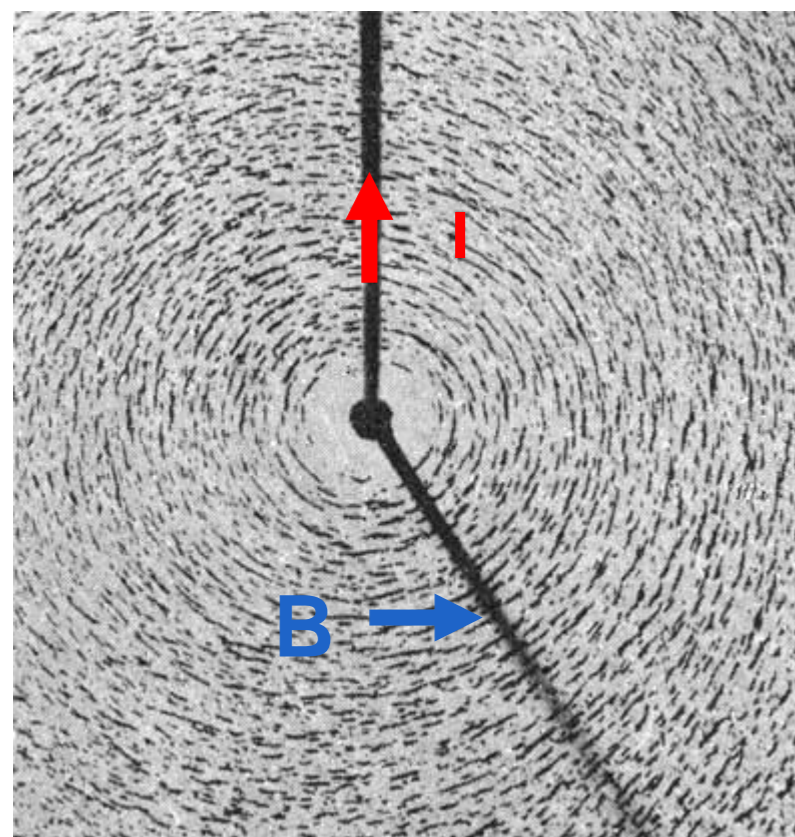
- rechterhandregel:
- *stroom gericht langs duim
- *magnetisch veld gericht volgens vingers **van** palm **naar** vingertip

MAGNETOSTATICA

4.3 Magnetische veldlijnen

Visualisatie van magnetische veldlijnen

Met ijzervijzel



Rechte stroomvoerende geleider

Eén stroomvoerende winding

13 stroomvoerende windingen, windingen in serie = spoel

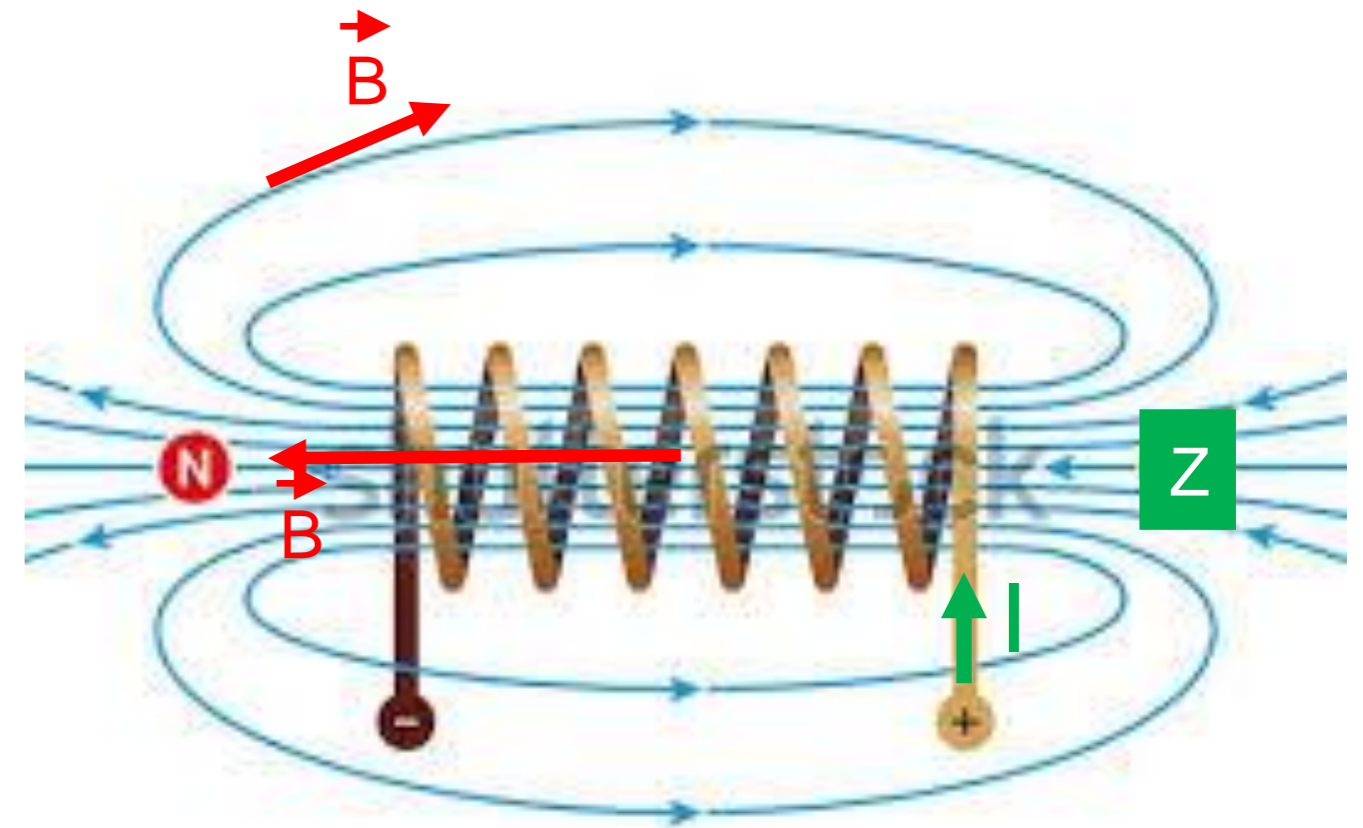
MAGNETOSTATICA

4.3 Magnetische veldlijnen

Visualisatie van magnetische veldlijnen

Magnetische veldlijnen voldoen aan:

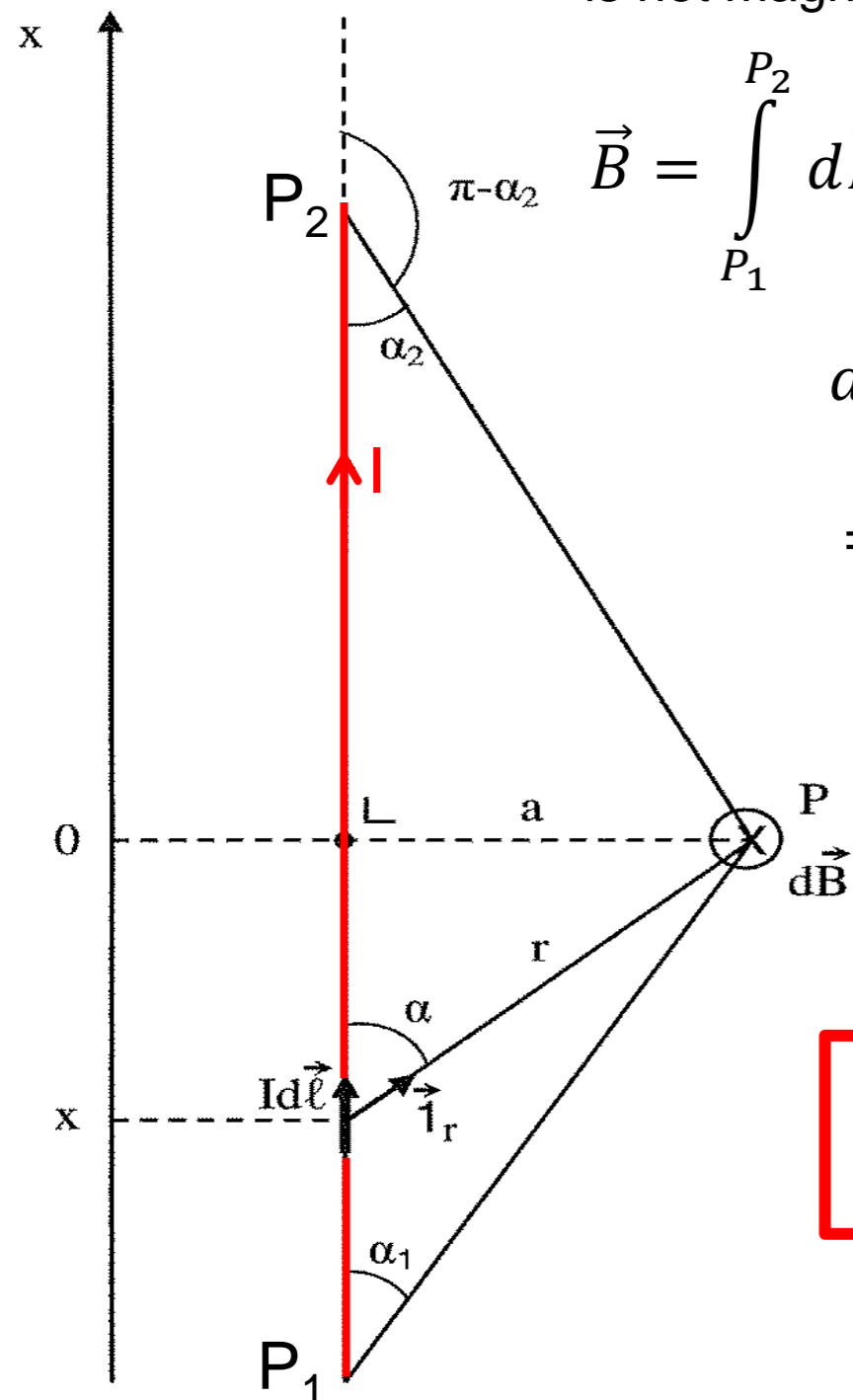
- in ieder punt moeten de magnetische veldlijnen raken aan de magnetische inductievector
- de zin van de magnetische veldlijnen moet samenvallen met de zin van de magnetische inductievector
- de dichtheid van de magnetische veldlijnen d.w.z. het aantal veldlijnen per oppervlakte-eenheid moet evenredig zijn met de grootte van de magnetische inductievector
- Opm: magnetische veldlijnen hebben geen begin- en eindpunt



MAGNETOSTATICA

4.4 Berekening van de magnetische inductie via wet van Biot-Savart

Magnetisch veld van een rechte stroomvoerende geleider (eindige lengte): wat is het magnetisch veld in punt P door rode stroomvoerende geleider?



$$\vec{B} = \int_{P_1}^{P_2} d\vec{B}$$

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 (Id\vec{l} \times \vec{r}_r)}{4\pi r^2}$$

$$\Rightarrow dB = \frac{\mu_0 I dl}{4\pi r^2} \sin \alpha$$

$$\Rightarrow dB = \frac{\mu_0 I \sin \alpha d\alpha}{4\pi a} \Rightarrow B = \int_{\alpha_1}^{\pi-\alpha_2} dB = \int_{\alpha_1}^{\pi-\alpha_2} \frac{\mu_0 I \sin \alpha d\alpha}{4\pi a}$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2)$$

Bij oneindige geleider, $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$$

-nulpunt van x-as zo geplaatst dat x voor punt P nul is.

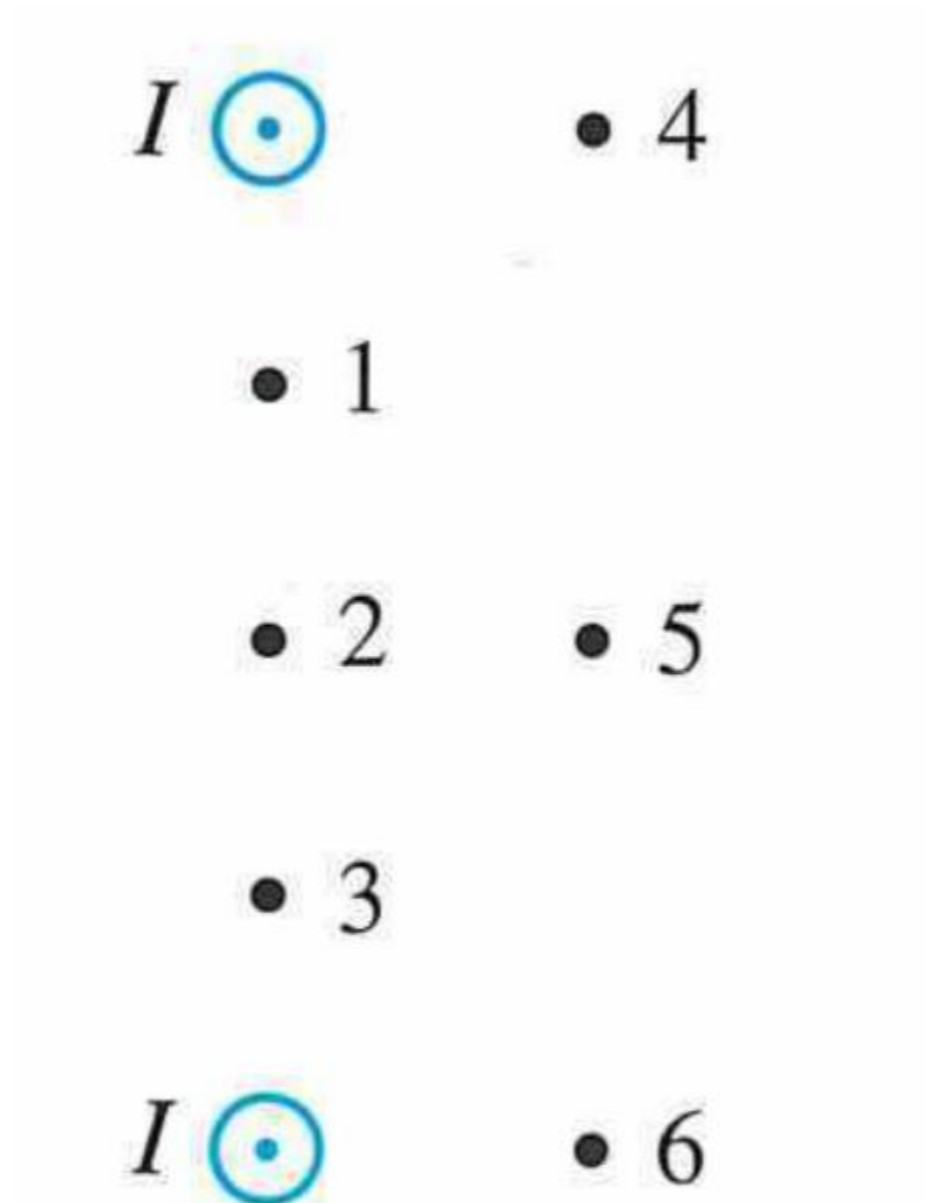
-begin en einde van lijnstuk vastgelegd door hoeken α_1 en α_2

\vec{r}_r is gericht van oorzaak $Id\vec{l}$

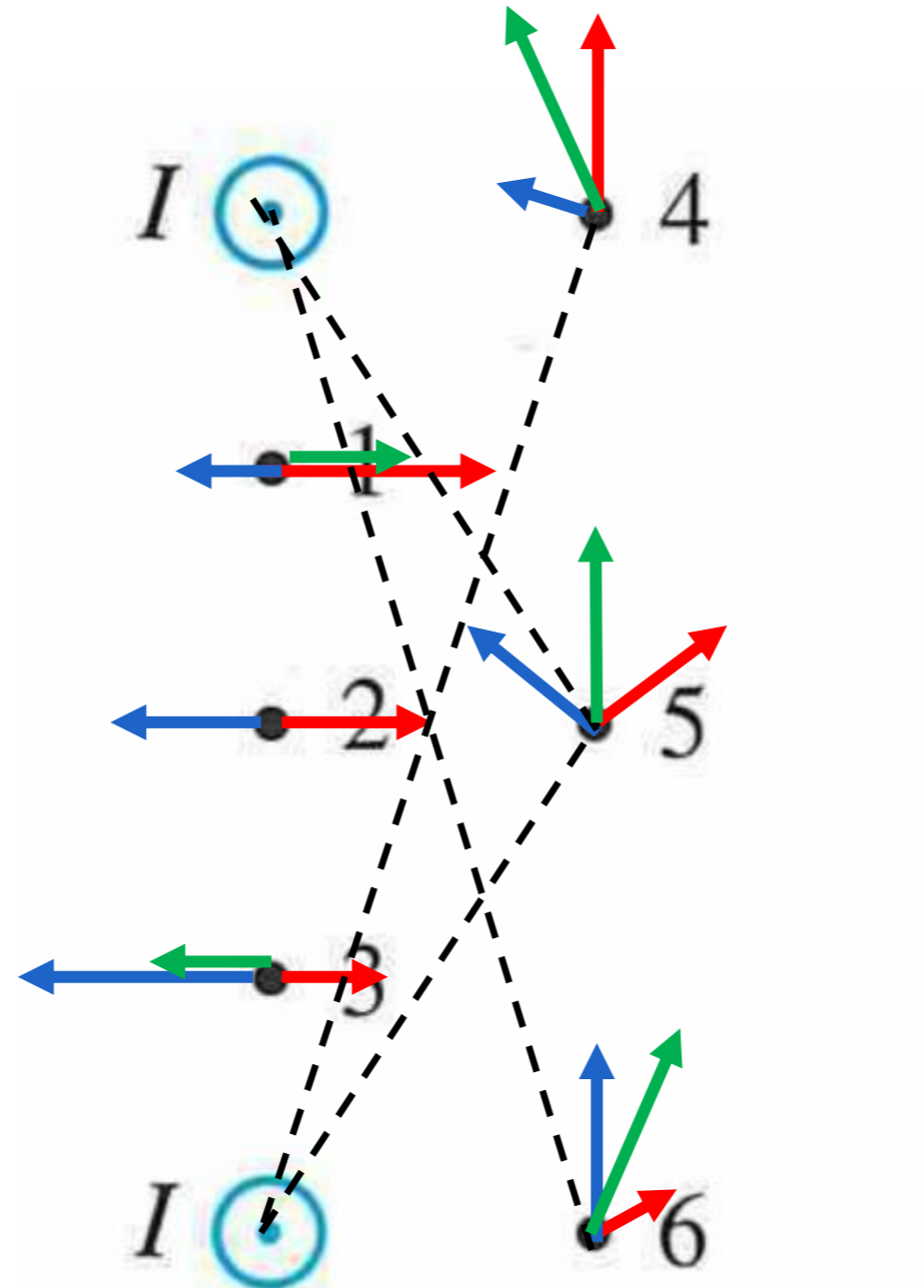
$$\tan \alpha = -\frac{a}{x} \Rightarrow x = -\frac{a}{\tan \alpha} \Rightarrow dl = dx = \frac{a}{\sin^2 \alpha} d\alpha$$

$$\sin \alpha = \frac{a}{r} \Rightarrow r = \frac{a}{\sin \alpha}$$

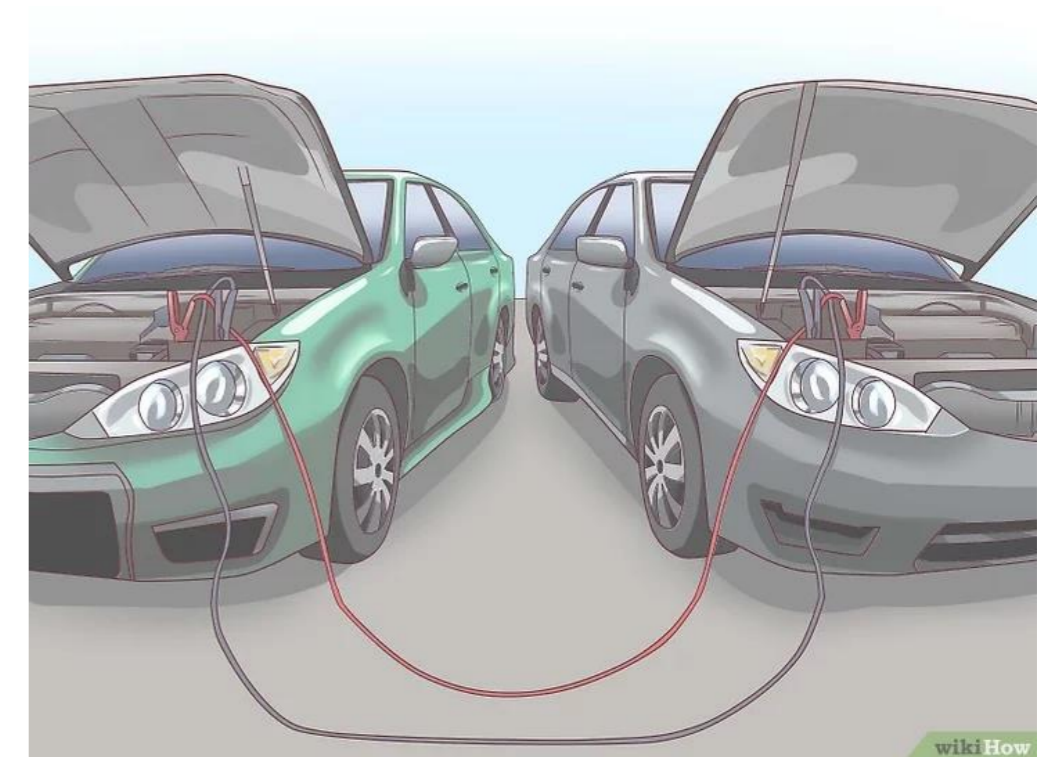
Vraag 1: Door twee lange rechte draden loopt een stroom I uit het scherm. Geef met pijlen de richting van B aan in de punten 1 tot en met 6 in het vlak van het scherm.



Vraag 1: Door twee lange rechte draden loopt een stroom I uit het scherm. Geef met pijlen de richting van B aan in de punten 1 tot en met 6 in het vlak van het scherm.



Vraag 2: Door startkabels die gebruikt worden om een auto te starten lopen stromen die gelijk zijn aan 65 A. Hoe sterk is het magnetische veld door de stroom in 1 kabel op een afstand van 3,5 cm van die kabel. Vergelijk je antwoord met de sterkte van het magnetische veld van de aarde ($5 \times 10^{-5} \text{T}$). Veronderstel hierbij dat de startkabel langs een rechte ligt. Wat is de kracht per lopende meter op de andere kabel indien die zich evenwijdig bevindt aan de eerste kabel op 3,5 cm. Zullen de kabels elkaar aantrekken of afstoten?



Vraag 2: Door startkabels die gebruikt worden om een auto te starten lopen stromen die gelijk zijn aan 65 A. Hoe sterk is het magnetische veld door de stroom in 1 kabel op een afstand van 3,5 cm van die kabel. Vergelijk je antwoord met de sterkte van het magnetische veld van de aarde ($5 \times 10^{-5} \text{T}$).

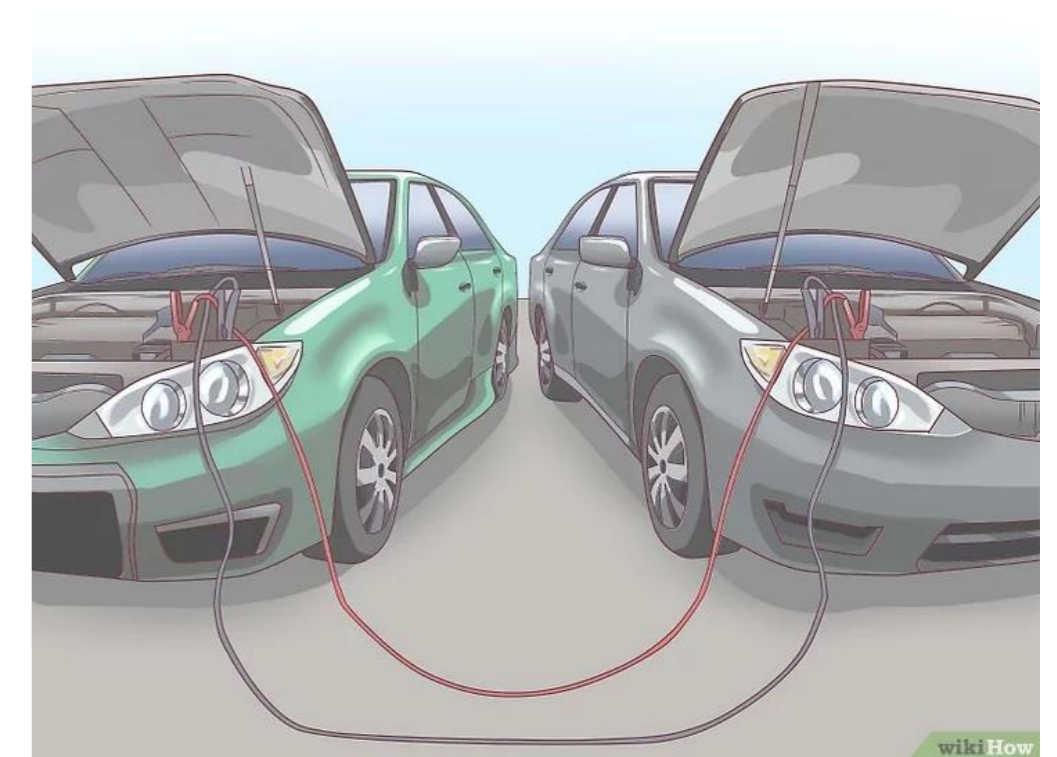
Veronderstel hierbij dat de startkabel langs een rechte ligt.

Wat is de kracht per lopende meter op de andere kabel indien die zich evenwijdig bevindt aan de eerste kabel op 3,5 cm. Zullen de kabels elkaar aantrekken of afstoten?

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 65}{2 \cdot \pi \cdot 0,035} = 3714 \cdot 10^{-7} \text{T} = 37,14 \cdot 10^{-5} \text{T}$$

$$|\vec{F}| = |\vec{I} l \times \vec{B}| = |\vec{I}| \cdot l \cdot |\vec{B}| \sin \alpha = 65 \times 1 \times 37,14 \cdot 10^{-5} = 0,02414 \text{N}$$

AFSTOTEN



MAGNETOSTATICA

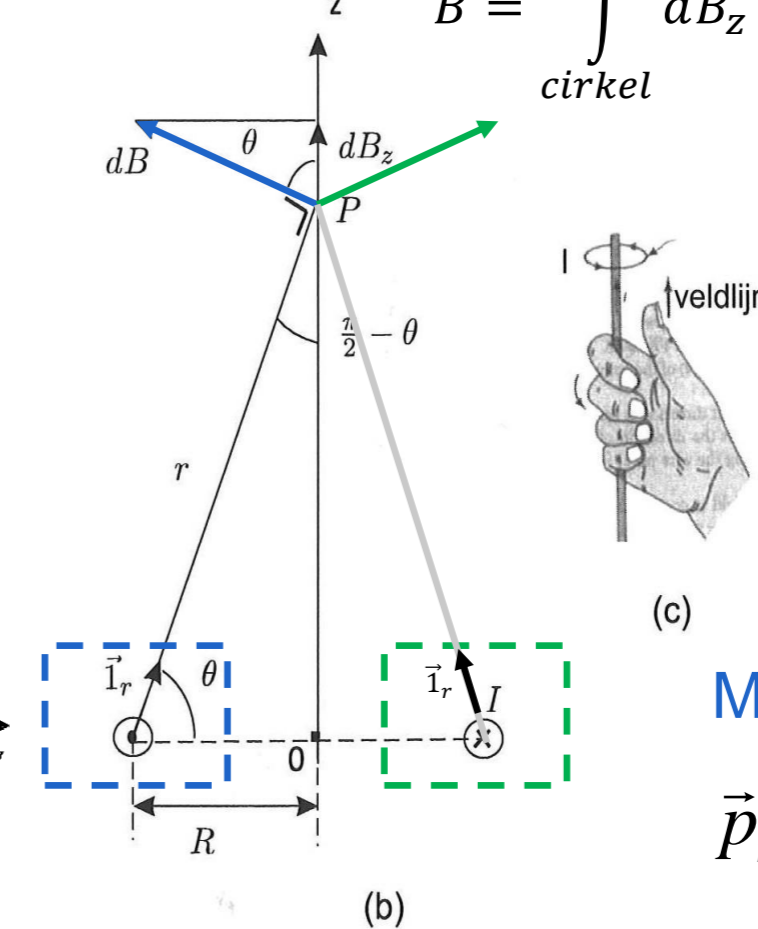
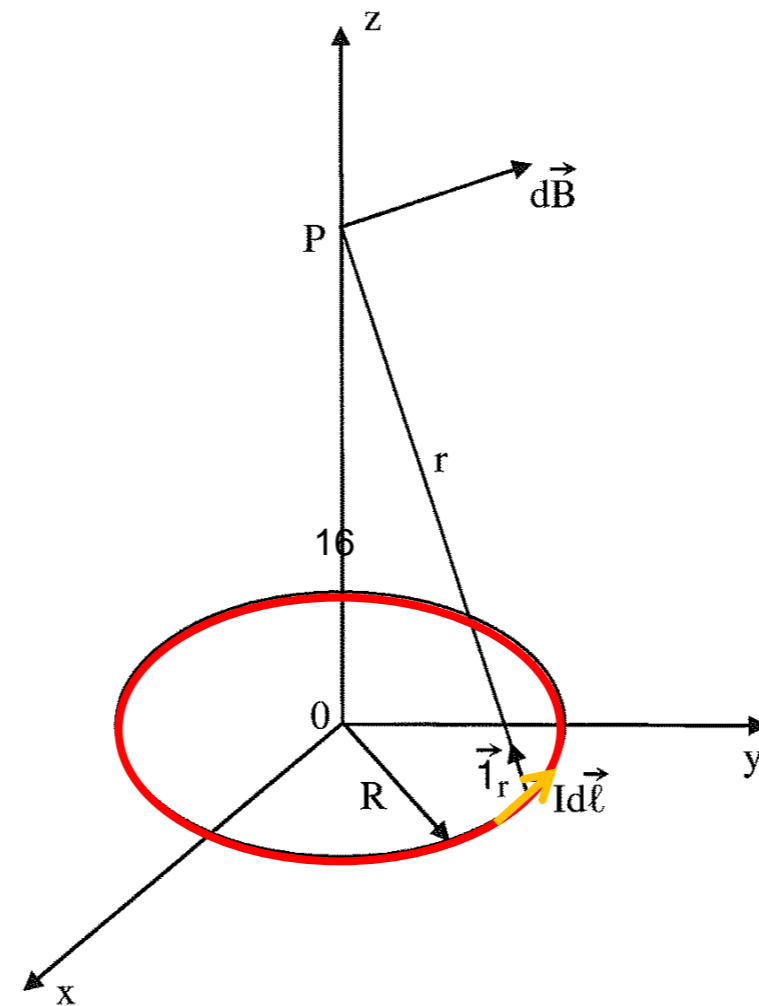
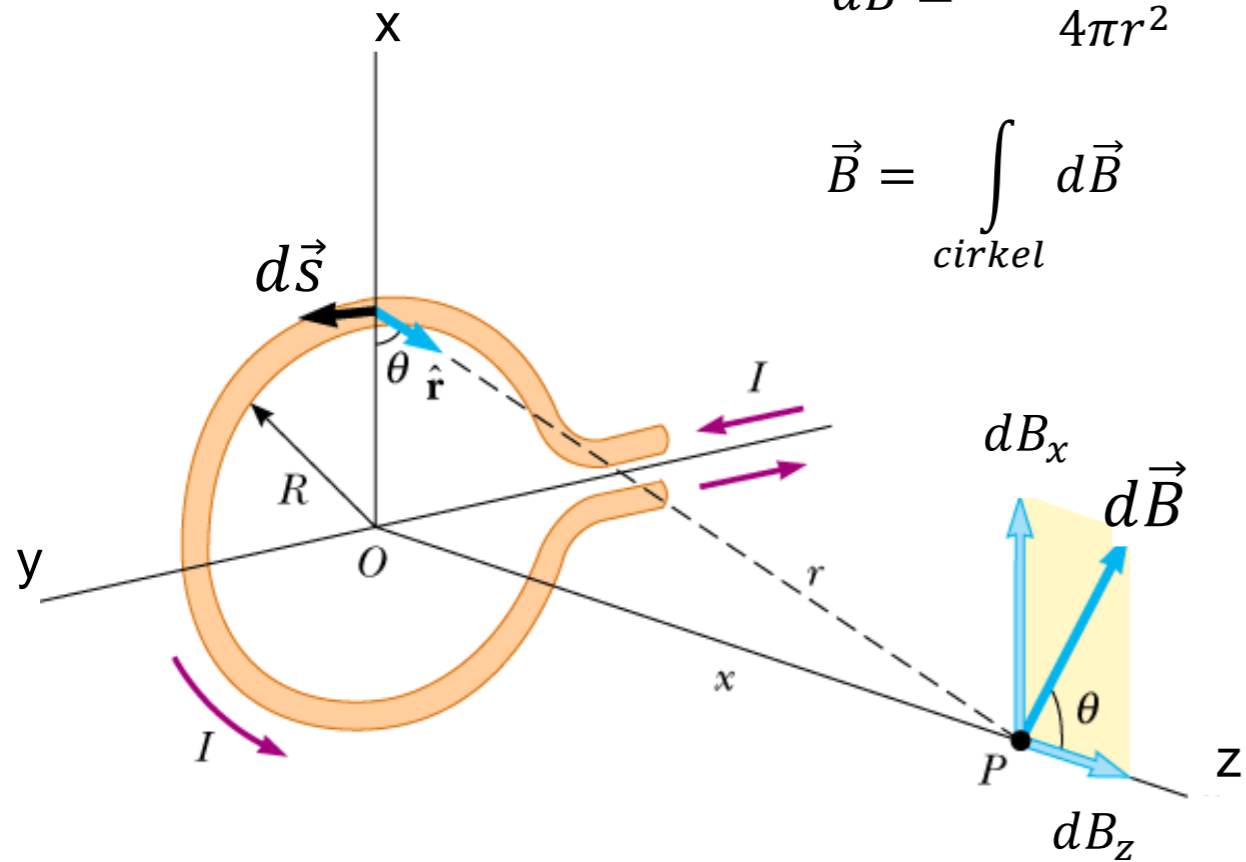
4.4 Berekening van de magnetische inductie via wet van Biot-Savart

Magnetisch veld van een cirkelvormige stroomwinding

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 (I d\vec{l} \times \vec{r})}{4\pi r^2} \Rightarrow dB = \frac{\mu_0 I dl}{4\pi r^2} \Rightarrow dB_z = \frac{\mu_0 I dl}{4\pi r^2} \cos \theta = \frac{\mu_0 I dl R}{4\pi r^2 r} = \frac{\mu_0 I dl}{4\pi} \frac{R}{(R^2 + z^2)^{3/2}}$$

$$\vec{B} = \int_{\text{cirkel}} d\vec{B}$$

$$\vec{B} = \int_{\text{cirkel}} dB_z = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{R}{(R^2 + z^2)^{3/2}} (2\pi R)$$



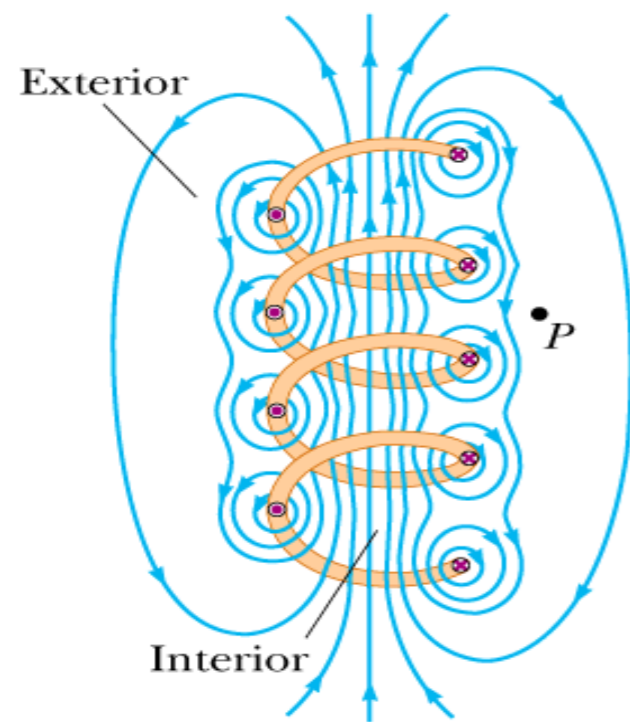
Magnetische dipool

$$\vec{p}_m = p_m \vec{1}_z = I\pi R^2 \vec{1}_z$$

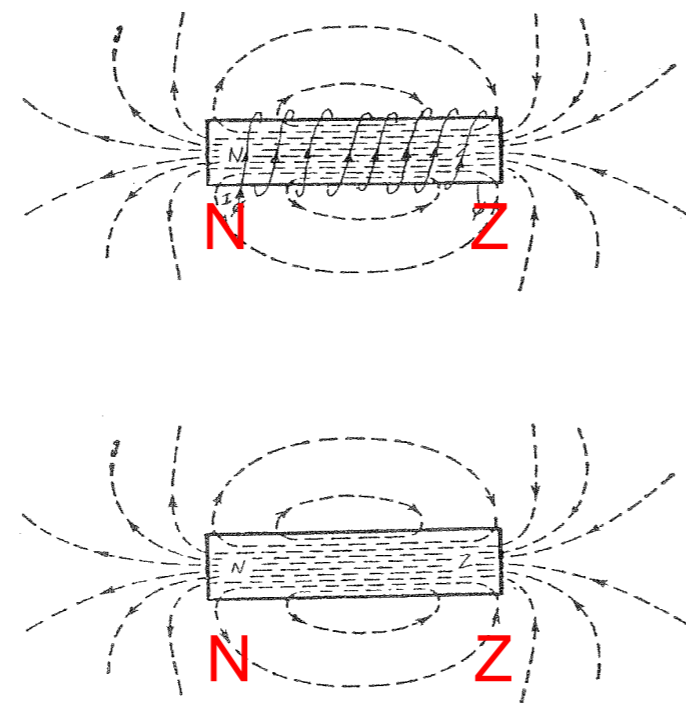
$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I R^2}{2(z^2 + R^2)^{3/2}} \vec{1}_z$$

MAGNETOSTATICA

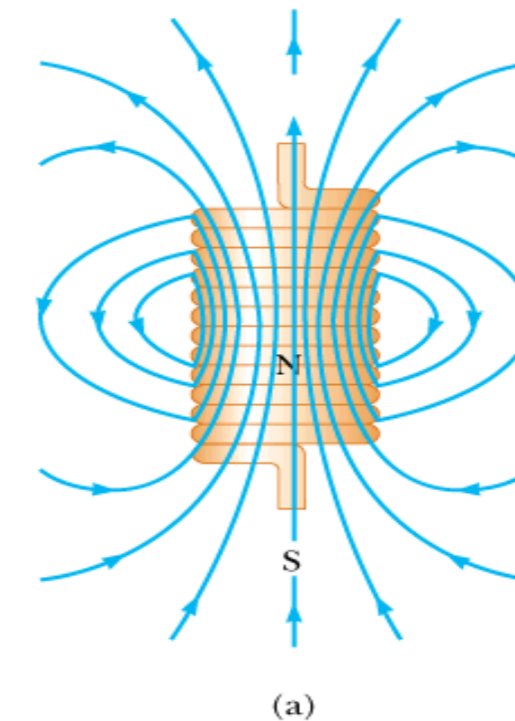
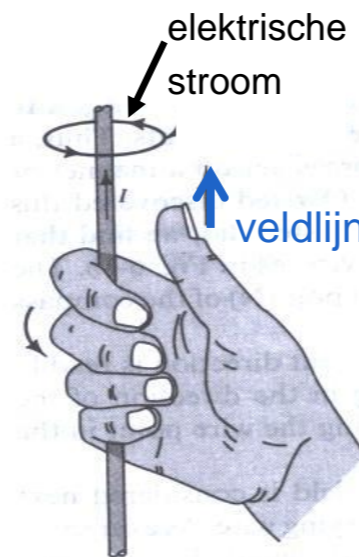
4.4 Berekening van de magnetische inductie via wet van Biot-Savart



Solenoid met uiteenliggende windingen



Magnetische veldlijnen treden uit langs noordpool en treden in langs zuidpool



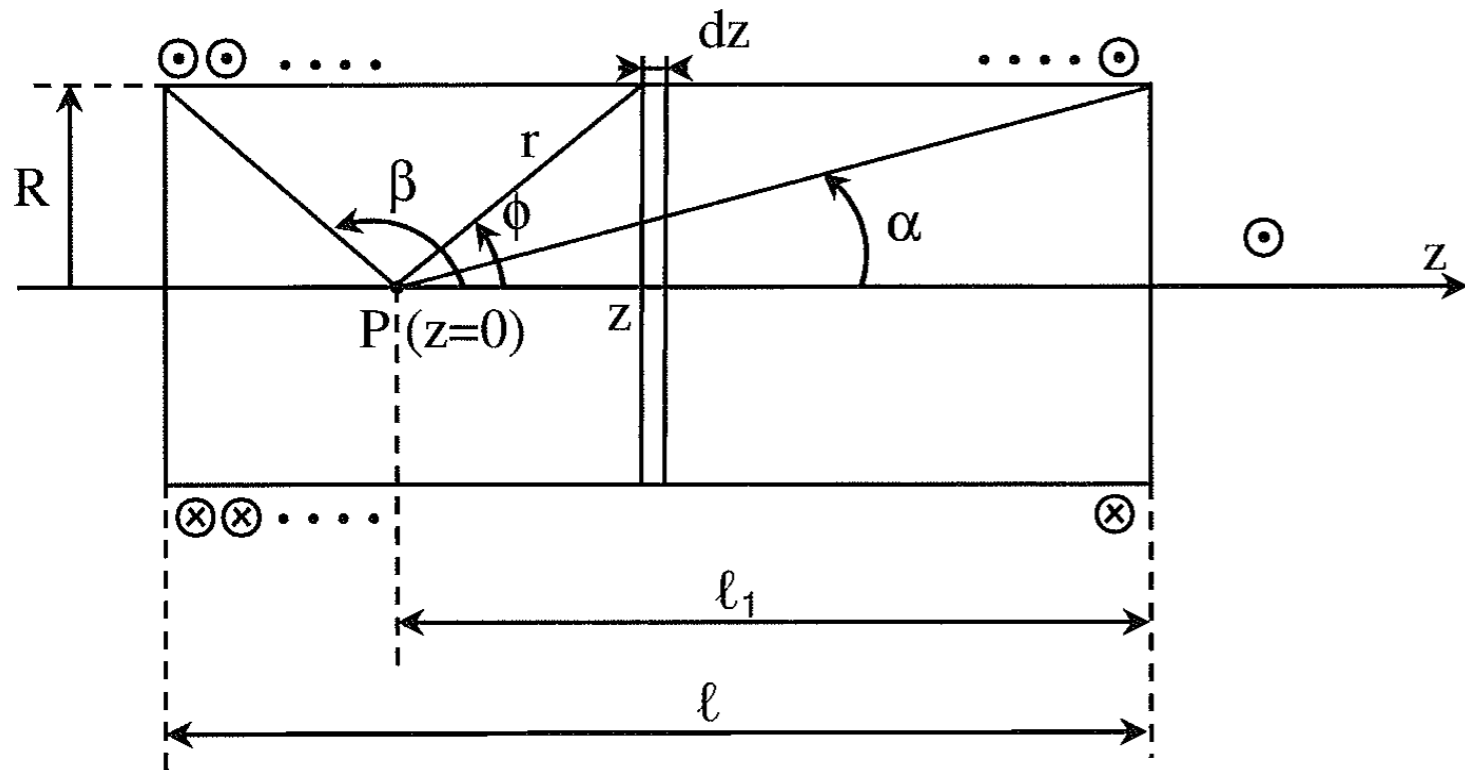
Solenoid met dichtgewonden windingen

MAGNETOSTATICA

4.4 Berekening van de magnetische inductie via wet van Biot-Savart

$$n = \frac{N}{l} \quad \begin{array}{l} \text{totale} \\ \text{stroom} \\ \text{over } dz \end{array}$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I R^2}{2(z^2 + R^2)^{3/2}} \vec{1}_z \quad \rightarrow \quad dB = \frac{\mu_0 I n dz R^2}{2(z^2 + R^2)^{3/2}} \quad \rightarrow \quad B = \int_{l_1-l}^{l_1} dB = \int_{l_1-l}^{l_1} \frac{\mu_0 I n R^2 dz}{2(z^2 + R^2)^{3/2}} = \frac{\mu_0 I n R^2}{2} \int_{l_1-l}^{l_1} \frac{dz}{(z^2 + R^2)^{3/2}}$$

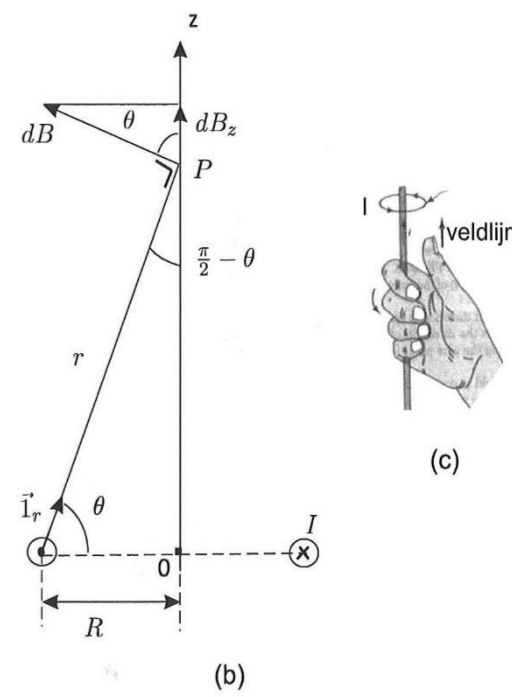


$$= \frac{\mu_0 I n R^2}{2} \int_{l_1-l}^{l_1} \frac{dz}{(z^2 + R^2)^{3/2}} \quad \text{substitutie } z = R \tan \theta; \quad dz = \frac{R d\theta}{\cos^2 \theta}; \quad (z^2 + R^2)^{3/2} = \frac{R^3}{\cos^3 \theta}$$

$$= \frac{\mu_0 I n R^2}{2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos \theta d\theta \quad \tan \theta_1 = \frac{l_1 - l}{R}; \quad \tan \theta_2 = \frac{l_1}{R};$$

$$= \frac{\mu_0 I n R^2}{2} (\sin \theta_2 - \sin \theta_1); \quad \sin(\arctan(y)) = \frac{y}{\sqrt{1 + y^2}}$$

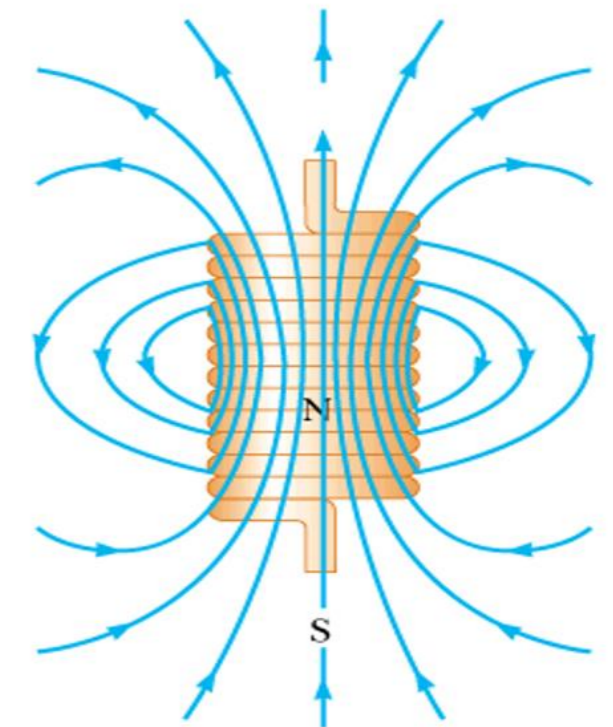
$$B = \frac{\mu_0 I n}{2} \left[\frac{l_1}{\sqrt{l_1^2 + R^2}} + \frac{(l - l_1)}{\sqrt{(l - l_1)^2 + R^2}} \right]$$



Bijzondere geval $l \gg R$

- (i) $l_1 = \frac{l}{2} : B = \mu_0 I n$
- (ii) $l_1 = 0$ of $l_1 = l : B = \frac{1}{2} \mu_0 I n$

Vraag 3: Een 20 meter lange koperdraad met een diameter (inclusief de isolatiemantel) van 2,00 mm wordt in een enkele laag strak gewonden, winding tegen winding, tot een solenoïde met een buitendiameter van 2,5 cm. Hoe groot is (a) de lengte van de solenoïde en (b) het veld ter plaatse van het middelpunt wanneer de stroom in de draad 16,7 A is.



Vraag 3: Een 20 meter lange koperdraad met een diameter (inclusief de isolatiemantel) van 2,00 mm wordt in een enkele laag strak gewonden, winding tegen winding, tot een solenoïde met een buitendiameter van 2,5 cm. Hoe groot is (a) de lengte van de solenoïde en (b) het veld ter plaatse van het middelpunt wanneer de stroom in de draad 16,7 A is.

$$\text{diameter winding} = 25 \text{ mm} - 2 \text{ mm} = 23 \text{ mm} = D = 2R$$

$$\text{omtrek winding} = \pi D = 3,1415 \times 23 \text{ mm} = 72,256 \text{ mm}$$

$$\text{aantal windingen } N = \frac{20000 \text{ mm}}{72,256 \text{ mm}} = 276,79$$

$$\text{lengte solenoïde } l = N \cdot 2 \text{ mm} = 276,79 \times 2 \text{ mm} = 0,553 \text{ m}$$

exacte formule

$$B = \frac{\mu_0 I N}{2l} \left[\frac{l/2}{\sqrt{(l/2)^2 + R^2}} + \frac{l/2}{\sqrt{(l/2)^2 + R^2}} \right]$$

$$= \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \times 16,7 \times 276,79}{2 \times 0,553} \left[\frac{\frac{0,553}{2} \cdot 2}{\sqrt{\left(\frac{0,553}{2}\right)^2 + 0,0115^2}} \right]$$

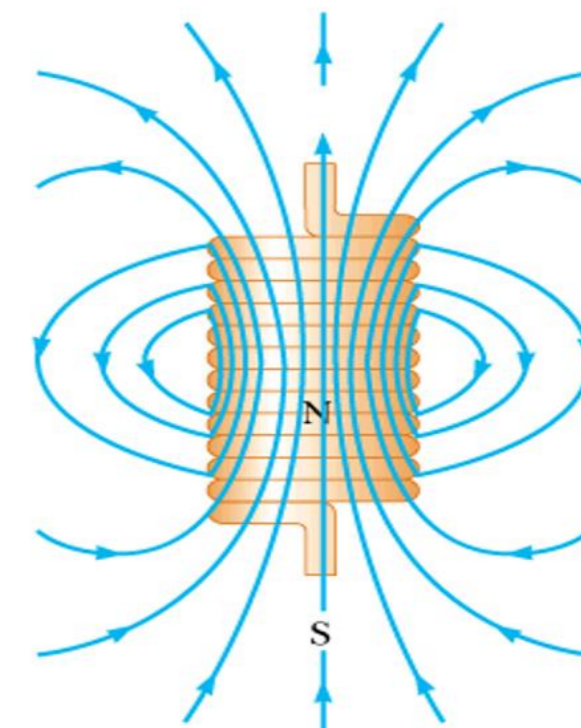
$$= 0,01048 \text{ T}$$

wat indien 2 meter draad in plaats van 20 meter?

Benaderde formule
 $R \ll l$

$$B = \frac{\mu_0 I N}{l} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \times 16,7 \times 276,79}{0,553}$$

$$= 0,0105 \text{ T}$$



Vraag 3: Een 2 meter lange koperdraad met een diameter (inclusief de isolatiemantel) van 2,00 mm wordt in een enkele laag strak gewonden, winding tegen winding, tot een solenoïde met een buitendiameter van 2,5 cm. Hoe groot is (a) de lengte van de solenoïde en (b) het veld ter plaatse van het middelpunt wanneer de stroom in de draad 16,7 A is.

exacte formule

$$B = \frac{\mu_0 I N}{2l} \left(\frac{l/2}{\sqrt{(l/2)^2 + R^2}} + \frac{l/2}{\sqrt{(l/2)^2 + R^2}} \right)$$

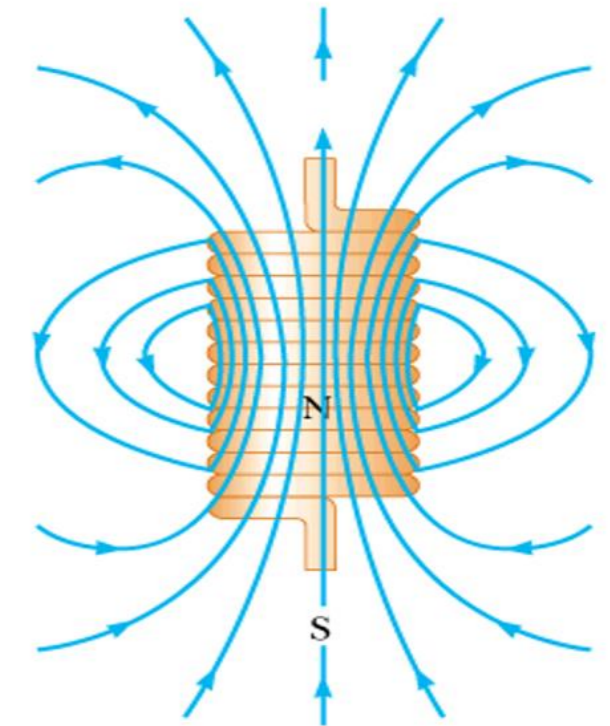
$$= \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \times 16,7 \times 27,67}{2 \times 0,0553} \left(\frac{0,0553 \cdot 2}{\sqrt{\left(\frac{0,0553}{2}\right)^2 + 0,0115^2}} \right)$$

$$= 0,00969 \text{ T}$$

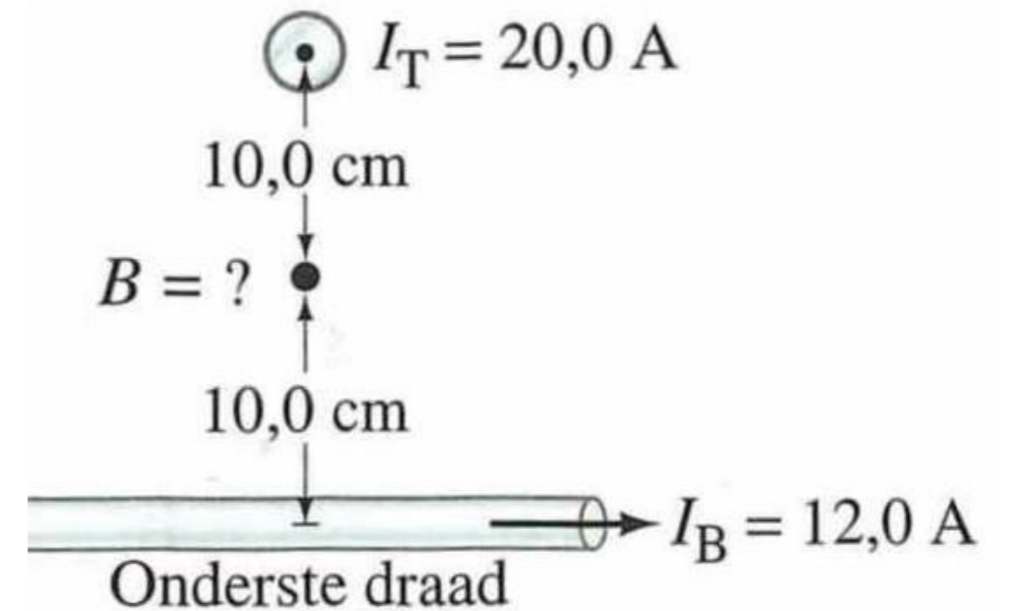
benaderde formule
 $R \ll l$

$$B = \frac{\mu_0 I N}{l} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \times 16,7 \times 27,67}{0,0553}$$

$$= 0,0105 \text{ T}$$



Vraag 4: Twee lange draden staan loodrecht op elkaar. Op het dichtste punt bevinden ze zich 20 cm van elkaar – zie figuur. Wat is de grootte van het magnetische veld ter plaatse van een punt midden tussen de draden als door de bovenste draad een stroom van 20 A loopt en door de onderste een van 12 A?

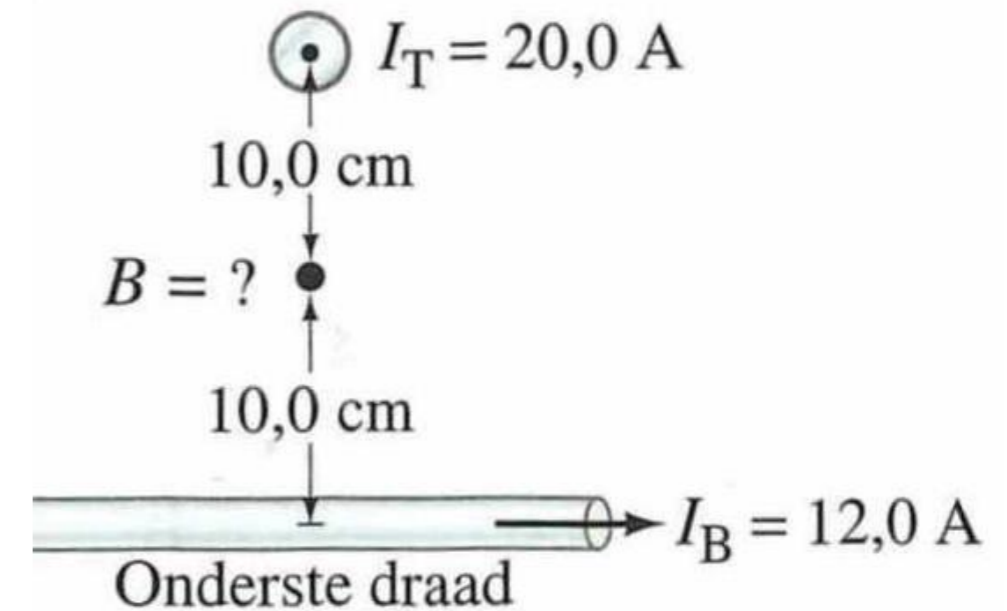


Vraag 4: Twee lange draden staan loodrecht op elkaar. Op het dichtste punt bevinden ze zich 20 cm van elkaar – zie figuur. Wat is de grootte van het magnetische veld ter plaatse van een punt midden tussen de draden als door de bovenste draad een stroom van 20 A loopt en door de onderste een van 12 A?

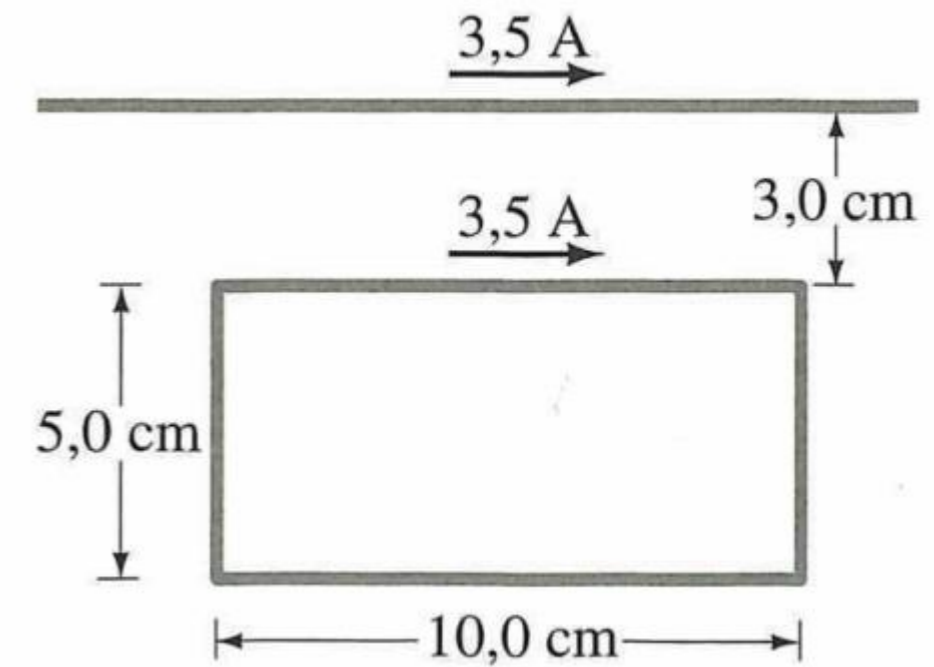
$$B_A = \frac{\mu_0 I_A}{2\pi a} = \frac{4\pi 10^{-7} \cdot 20}{2\pi 0,1} = 4 \cdot 10^{-5} \text{ T}$$

$$B_B = \frac{\mu_0 I_B}{2\pi a} = \frac{4\pi 10^{-7} \cdot 12}{2\pi 0,1} = 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ T}$$

$$B_T = \sqrt{B_A^2 + B_B^2} = 4,66 \cdot 10^{-5} \text{ T}$$



Vraag 5: Een rechthoekige draadlus wordt naast een rechte draad geplaatst op de manier zoals is weergegeven in de figuur. In beide draden loopt een stroom van 3,5 A. Bereken de grootte en richting van de resulterende kracht op de lus.



Vraag 5: Een rechthoekige draadlus wordt naast een rechte draad geplaatst op de manier zoals is weergegeven in de figuur. In beide draden loopt een stroom van 3,5 A. Bereken de grootte en richting van de resulterende kracht op de lus.

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

$$|\vec{F}_2| = |\vec{I}_2 l \times \vec{B}_1| = |\vec{I}_2| \cdot 0,1 \text{ m} \cdot \frac{\mu_0 I_1}{2\pi a}$$

$$= 3,5 \times 0,1 \times \frac{4\pi 10^{-7} \times 3,5}{2\pi \times 0,03} = 81,666 \cdot 10^{-7} \text{ N}$$

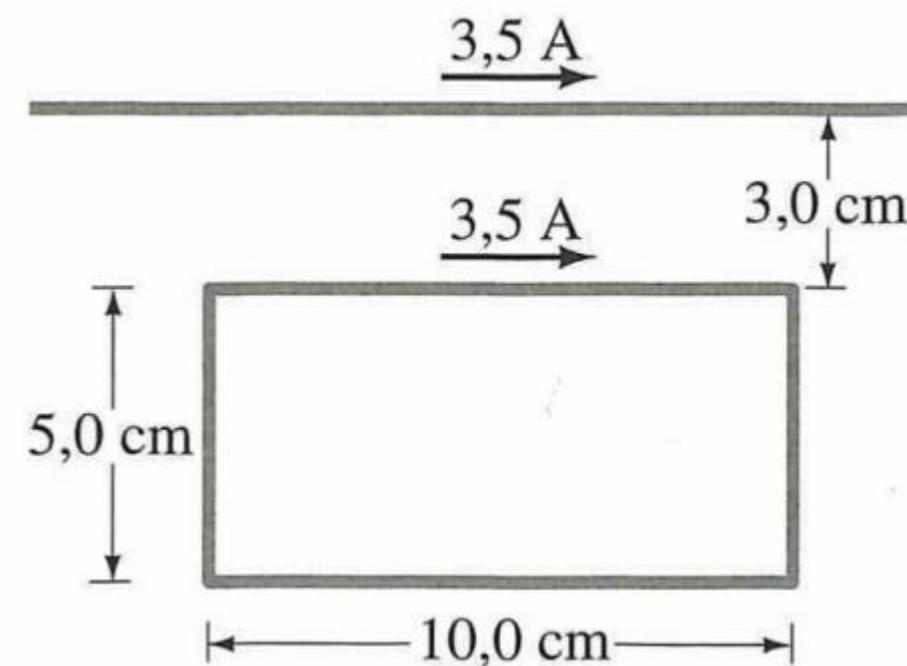
$$|\vec{F}_3| = |\vec{I}_2 l \times \vec{B}_1| = |\vec{I}_2| \times 0,1 \text{ m} \times \frac{4\pi 10^{-7} \cdot |\vec{I}_1|}{2\pi \cdot 0,08 \text{ m}}$$

$$= 3,5 \times 0,1 \times \frac{4\pi 10^{-7} \cdot 3,5}{2\pi \cdot 0,08} = 30,625 \cdot 10^{-7} \text{ N}$$

\vec{F}_1 en \vec{F}_3 tegengesteldes zijn.

$$F_{\text{net}} = |\vec{F}_1| - |\vec{F}_3| = (81,666 - 30,625) \cdot 10^{-7} \text{ N}$$

$$= 51,041 \cdot 10^{-7} \text{ N}$$



MAGNETOSTATICA

4.5 Stelling van de lijnintegraal

Rechte stroomvoerende geleider loodrecht op blad

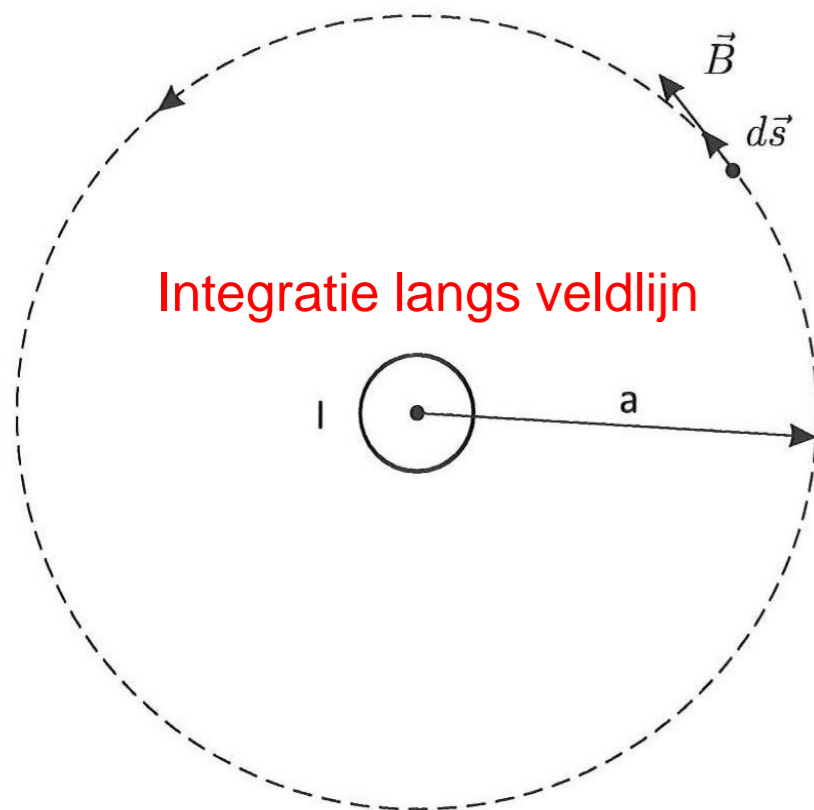
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$$

Bij oneindige geleider, $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{s} = B 2\pi a$$

$$= \frac{\mu_0 I}{2\pi a} 2\pi a = \mu_0 I$$

$$\oint_L \frac{\vec{B}}{\mu_0} \cdot d\vec{s} = I$$



Is ook geldig wanneer de geleiders niet recht zijn en voor willekeurige gesloten kromme L

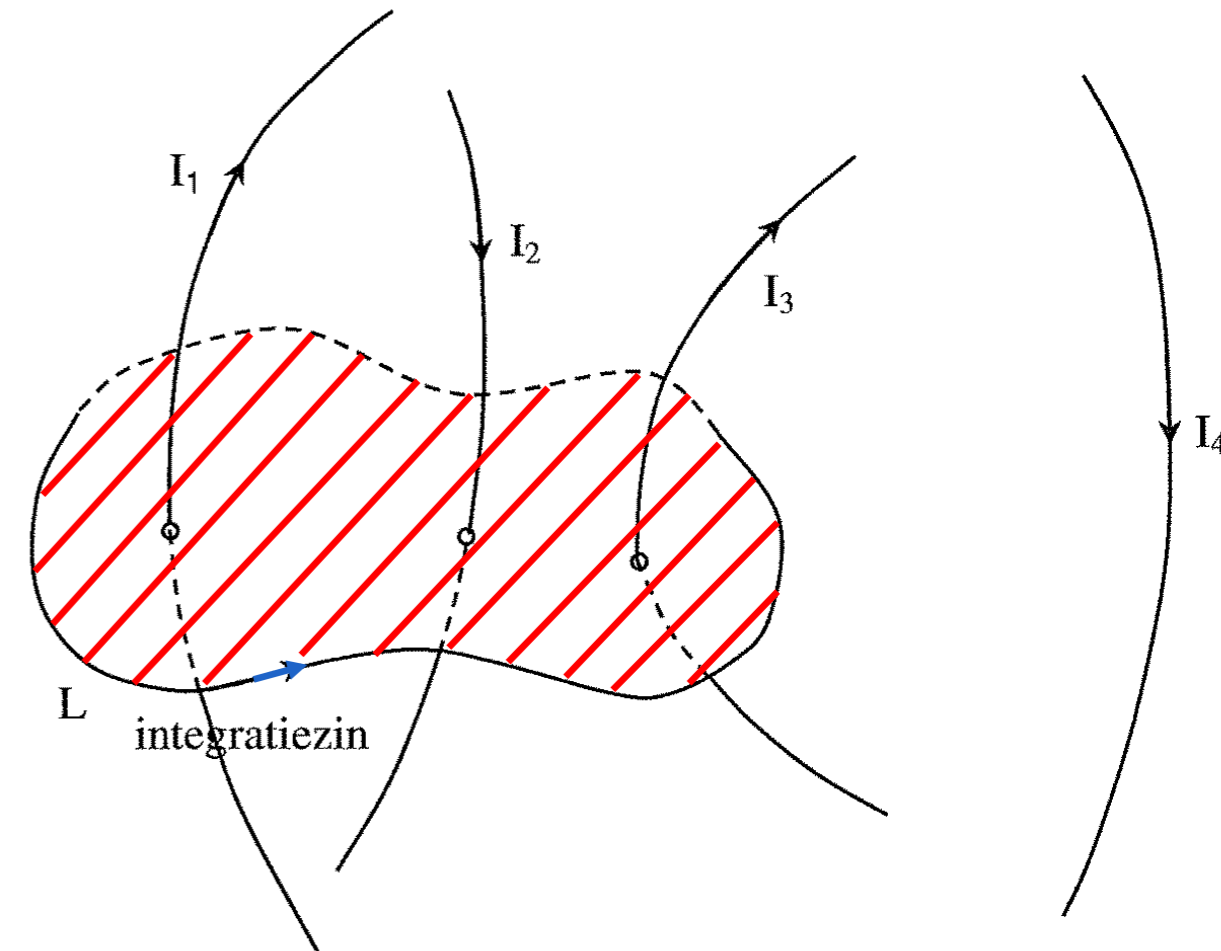
$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n$$

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \sum_{i=1}^n I_i$$

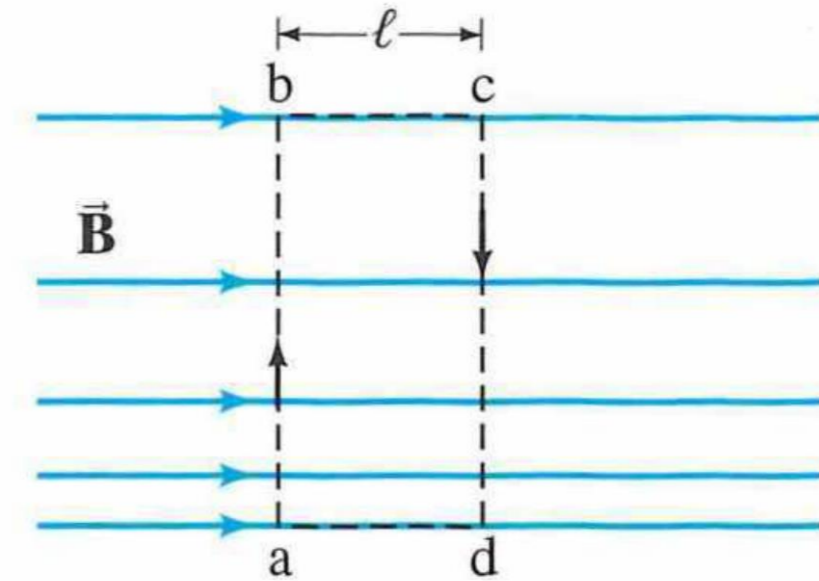
$$= \mu_0 (I_1 - I_2 + I_3)$$

$$\oint_L \frac{\vec{B}}{\mu_0} \cdot d\vec{s}$$

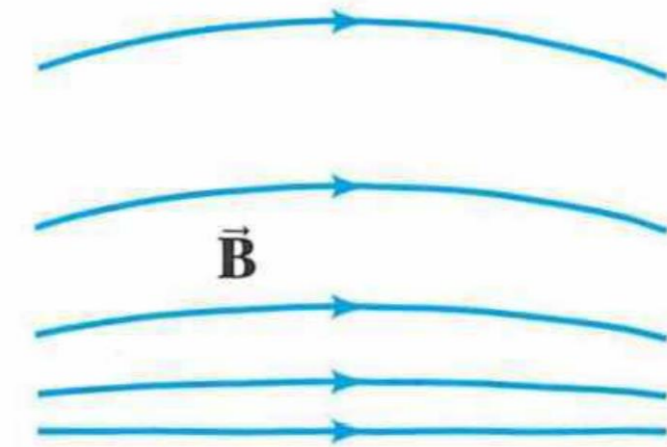
$$= (I_1 - I_2 + I_3)$$



Vraag 7: Gebruik de wet van Ampere om aan te tonen dat in een willekeurig gebied in de ruimte waarin geen stromen lopen, het magnetisch veld niet zowel unidirectioneel als niet-homogeen kan zijn op de manier zoals is weergegeven in bovenste figuur.



(a) (onmogelijk)



(b) (mogelijk)

Vraag 7: Gebruik de wet van Ampere om aan te tonen dat in een willekeurig gebied in de ruimte waarin geen stromen lopen, het magnetisch veld niet zowel unidirectioneel als niet-homogeen kan zijn op de manier zoals is weergegeven in bovenste figuur.

beschouw gesloten kromme abcd
 elektrische stroom door opp. opgespannen over rechthoek abcd
 = 0 A

$$\Rightarrow \oint \frac{\vec{B}}{\mu_0} \cdot d\vec{l} = I_{\text{tot}} = 0$$

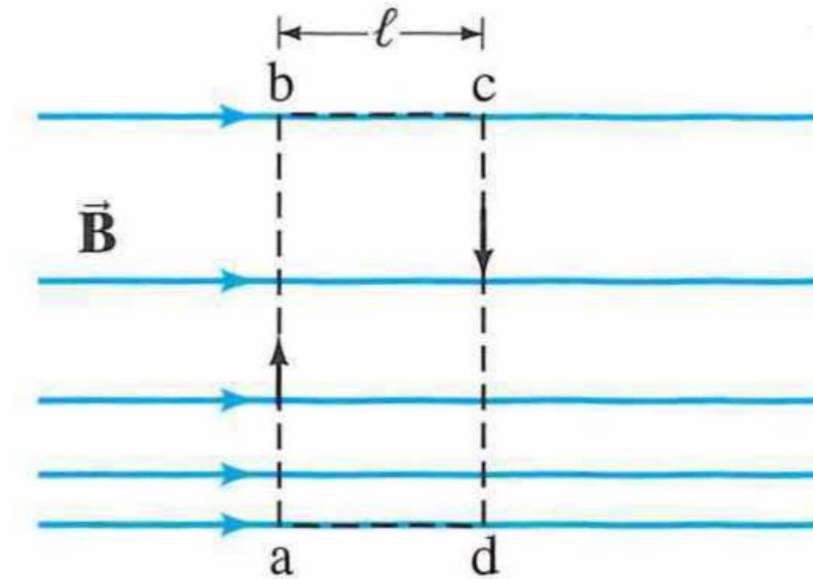
$$\Rightarrow \int_a^b \frac{\vec{B}}{\mu_0} \cdot d\vec{l} + \int_b^c \frac{\vec{B}}{\mu_0} \cdot d\vec{l} + \int_c^d \frac{\vec{B}}{\mu_0} \cdot d\vec{l} + \int_d^a \frac{\vec{B}}{\mu_0} \cdot d\vec{l} = 0$$

$\vec{B} \perp d\vec{l}$ $\vec{B} \parallel d\vec{l}$ $\vec{B} \perp d\vec{l}$ $\vec{B} \parallel d\vec{l}$

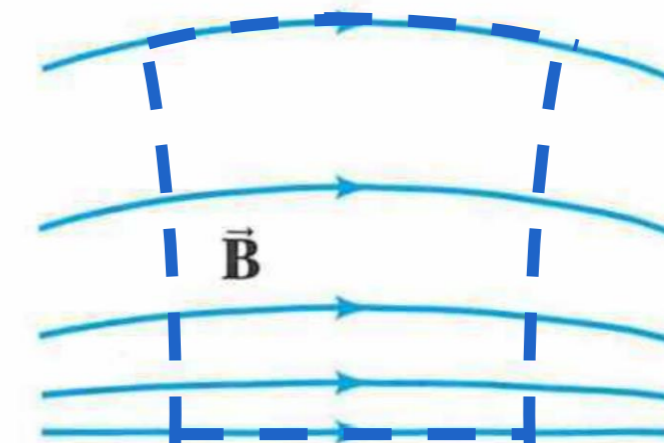
$$\Rightarrow \frac{B_{bc}}{\mu_0} \cdot l - \frac{B_{ad}}{\mu_0} \cdot l = 0$$

$$\Rightarrow B_{bc} = B_{ad}$$

l is niet zo : dichtheid van veldlijnen!



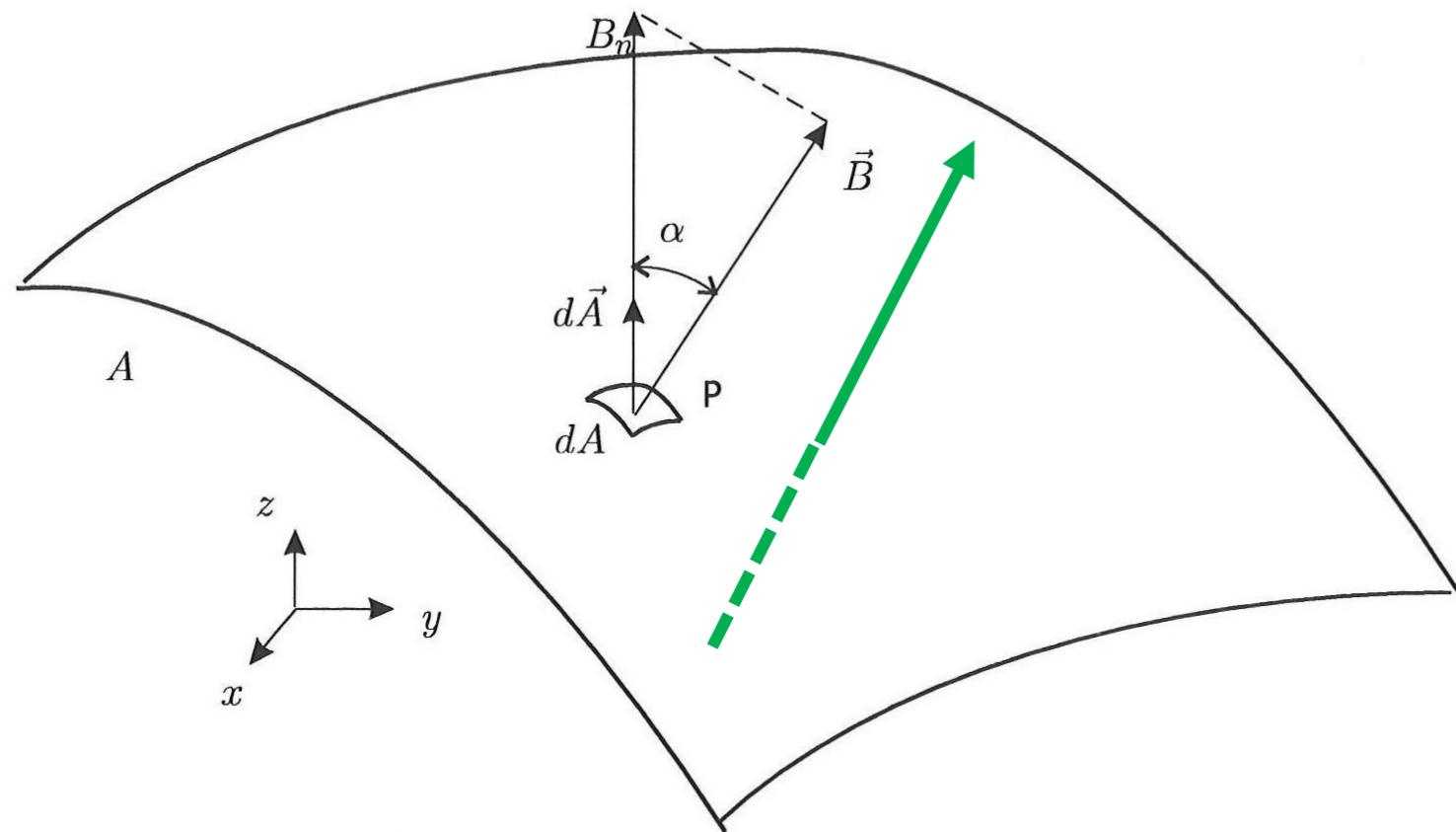
(a) (onmogelijk)



(b) (mogelijk)

MAGNETOSTATICA

4.6 Magnetische flux



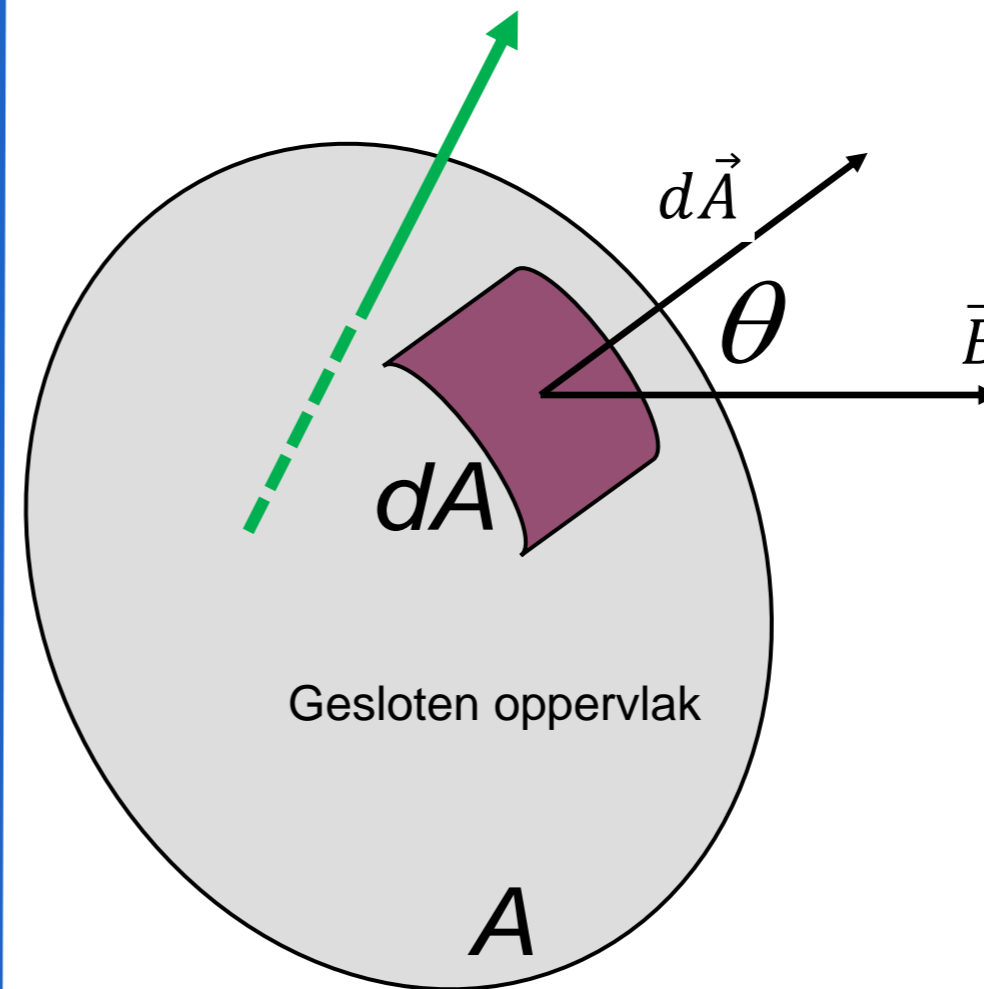
$$d\phi = \vec{B} \cdot d\vec{A} = B dA \cos \alpha = B_n dA$$

$$\phi = \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = \int_A B_n dA$$

$$d\vec{A} = dA \vec{1}_n$$

Eenheid 1Wb= 1 Weber=1 Volt x 1 sec

Magnetische flux doorheen een gesloten oppervlak is nul (Stelling van Gauss)



$$\phi = \oint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

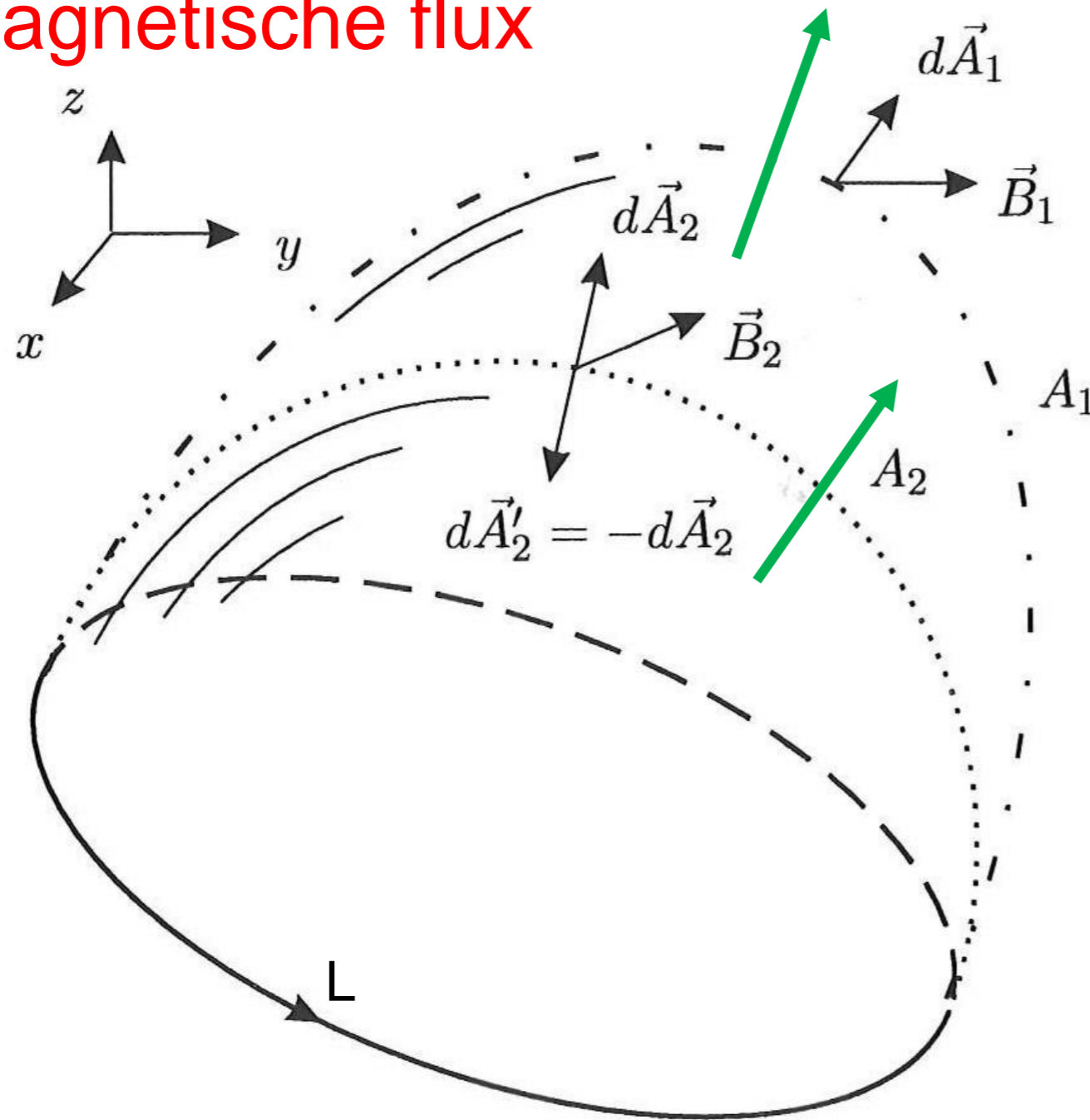
In elektrostatica

$$\psi = \oint_A \epsilon_0 \vec{E} \cdot d\vec{A} = Q$$

Prof.dr.ir. Luc Dupré, luc.dupre@ugent.be

MAGNETOSTATICA

4.6 Magnetische flux



$$\Phi_1 = \int_{A_1} \vec{B} \cdot d\vec{A}_1 \quad (\text{volgens groene referentiepijl})$$

$$\Phi_2 = \int_{A_2} \vec{B} \cdot d\vec{A}_2 \quad (\text{volgens groene referentiepijl})$$

$$\begin{aligned} \Phi &= \oint_{A_1+A_2} \vec{B} \cdot d\vec{A} = \int_{A_1} \vec{B} \cdot d\vec{A}_1 + \int_{A_2} \vec{B} \cdot d\vec{A}'_2 \\ &= \int_{A_1} \vec{B} \cdot d\vec{A}_1 - \int_{A_2} \vec{B} \cdot d\vec{A}_2 = 0 \end{aligned}$$

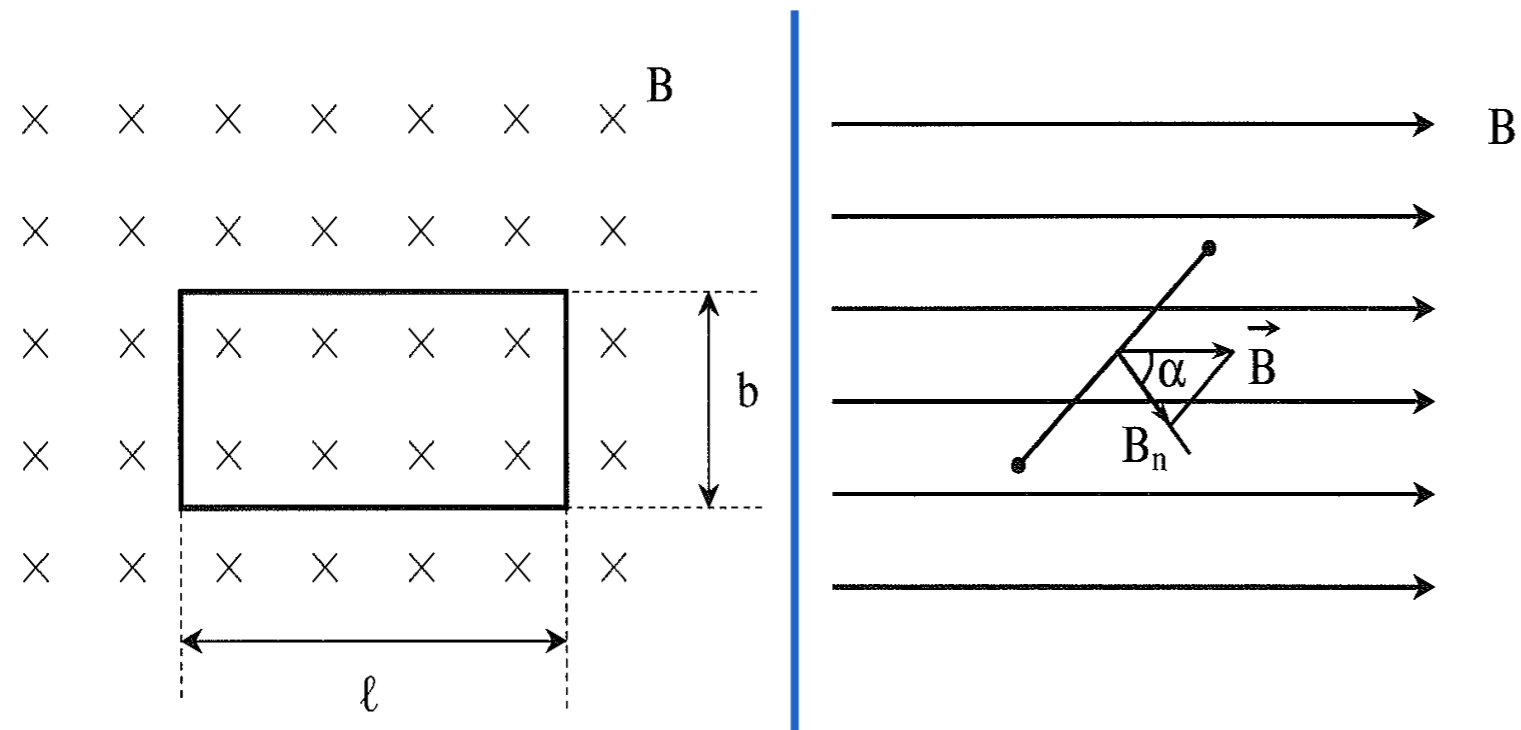
$$\int_{A_1} \vec{B} \cdot d\vec{A}_1 = \int_{A_2} \vec{B} \cdot d\vec{A}_2 = \Phi_1 = \Phi_2$$

Totale flux doorheen een gesloten oppervlak van binnen naar buiten is gelijk aan nul (wet van Gauss)

MAGNETOSTATICA

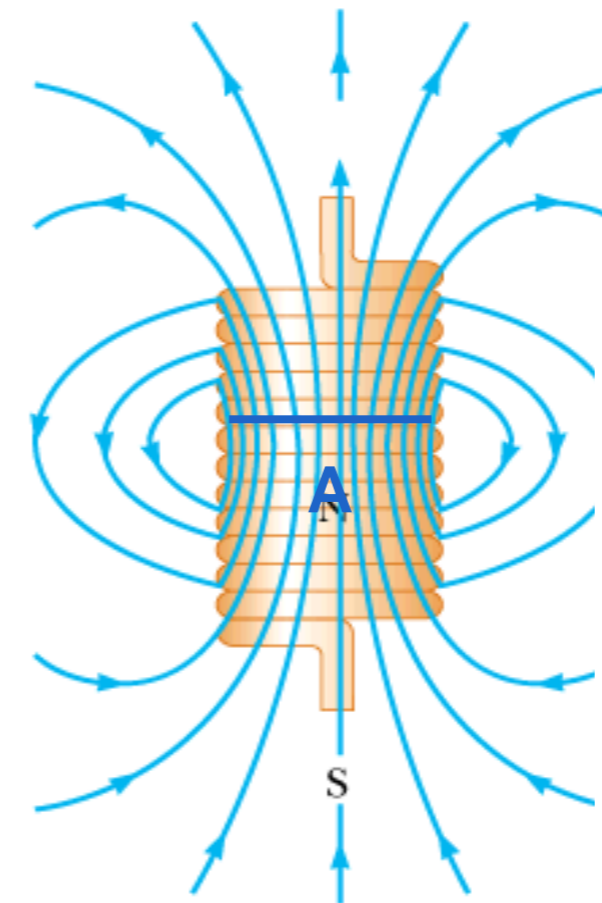
4.6 Magnetische flux

Flux gekoppeld met gesloten stroomkring



$$\phi = Bbl = B \cdot opp$$

$$\phi = Bbl \cos \alpha = B \cdot opp \cos \alpha$$



Solenoid met dichtgewonden N windingen

-N windingen
-elke winding gekoppeld met een flux ϕ

-flux gekoppeld met de volledige spoel

$$\psi = \phi_1 + \phi_2 + \dots + \phi_N$$

$$\psi = N\phi$$

Fysische flux van spoel: ϕ
gekoppelde flux van spoel: ψ