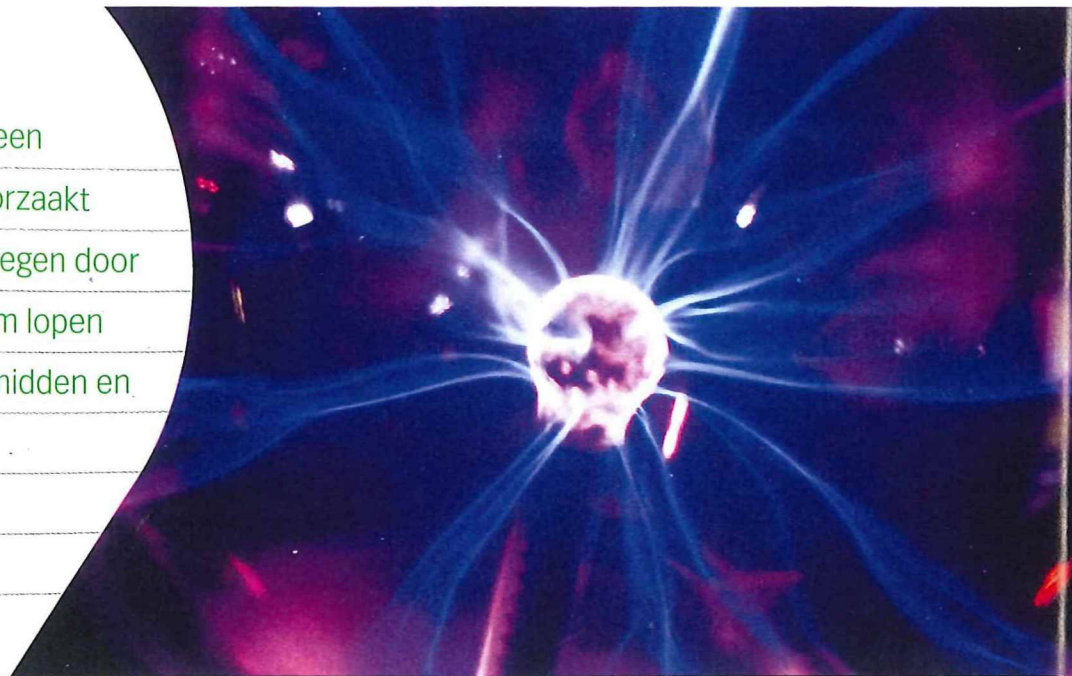


De strepen die je ziet in een plasmabool worden veroorzaakt door elektronen die bewegen door het gas in de bol. Waarom lopen alle strepen tussen het midden en de rand?



Figuur 10.1

## 10.1 Elektrische velden

### Krachtwerking op afstand

Wanneer je een PVC staaf opwrijft, krijgt de staaf een lading. Staven met gelijke lading stoten elkaar af. Zie figuur 10.2. Beweeg je de staaf richting de liggende staaf, dan gaat deze ook draaien terwijl de staven elkaar niet aanraken.

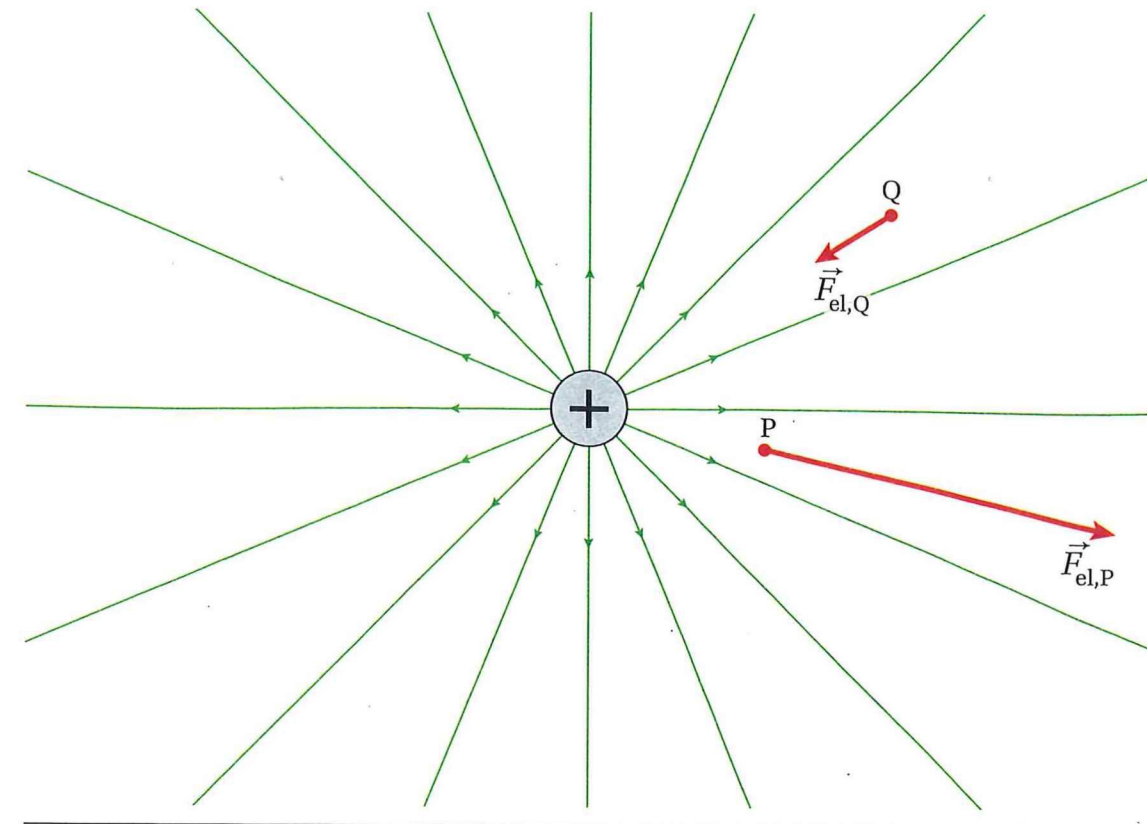
Staven met ongelijknamige ladingen trekken elkaar aan. De ladingen oefenen kracht op elkaar uit terwijl de staven elkaar niet aanraken. De omgeving waarin een elektrische kracht merkbaar is, noem je het **elektrisch veld**. Ladingen ondervinden krachtwerking als ze zich in een elektrisch veld bevinden.

Een elektrisch veld geef je schematisch weer met veldlijnen. **Elektrische veldlijnen** zijn denkbeeldige lijnen waarlangs een positieve lading in een elektrisch veld beweegt. Omdat positieve ladingen elkaar afstoten, is de richting van een veldlijn altijd van de positieve lading af. Zie figuur 10.3.

In de buurt van de lading is het elektrisch veld het sterkst. Hoe dichter de veldlijnen bij elkaar liggen, des te groter is de krachtwerking op een lading in het veld.



Figuur 10.2



Figuur 10.3

Plaats je een positieve lading in punt P, dan ondervindt deze een kracht in de richting van de veldlijnen. Plaats je een even grote negatieve lading in punt Q, dan wijst de kracht tegen de richting van de veldlijnen in. Bovendien is de kracht kleiner, omdat de veldlijnen bij punt Q verder van elkaar af liggen dan bij punt P.

### Elektrische veldsterkte

De elektrische kracht op een geladen deeltje hangt af van de lading van het deeltje en van de sterkte van het elektrisch veld. De **elektrische kracht** die een geladen deeltje in een punt van een elektrisch veld ondervindt, bereken je met:

$$\vec{F}_{el} = q \cdot \vec{E}$$

- $\vec{F}_{el}$  is de elektrische kracht in N.
- $q$  is de lading van het deeltje in C.
- $\vec{E}$  is de elektrische veldsterkte in N/C.

De **elektrische veldsterkte** in een punt P is dus gelijk aan de elektrische kracht op een lading van 1 coulomb in P. De **elektrische kracht** en de veldsterkte zijn vectoren. Plaats je een positieve lading, dan wijzen de elektrische kracht en de veldsterkte dezelfde kant op. Is de lading negatief, dan wijst de elektrische kracht tegen de veldsterkte in.

## Wet van Coulomb

Twee ladingen stoten elkaar meer af als ze dichterbij elkaar in de buurt zijn. De afstoting is ook sterker naarmate de lading groter is. De grootte van de **elektrische kracht** die twee ladingen op elkaar uitoefenen, bereken je met de **wet van Coulomb**.

$$F_{\text{el}} = f \cdot \frac{q \cdot Q}{r^2}$$

- $F_{\text{el}}$  is de elektrische kracht in N.
- $f$  is een constante in  $\text{Nm}^2\text{C}^{-2}$ .
- $q$  is de lading van het deeltje 1 in C.
- $Q$  is de lading van het deeltje 2 in C.
- $r$  is de afstand tussen de twee deeltjes.

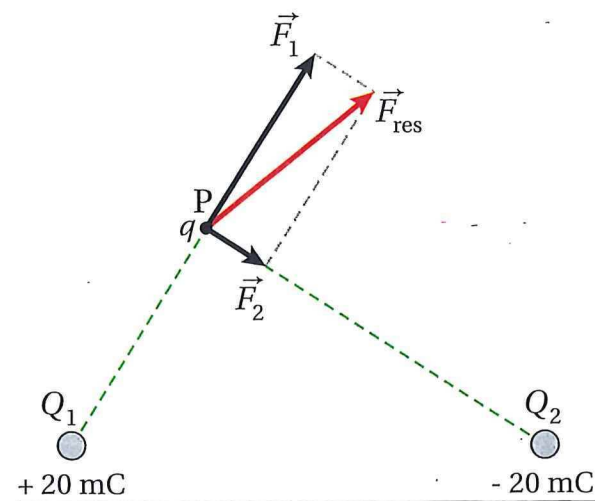
### Opmerking

- De wet van Coulomb geldt ook voor geladen bollen. In dat geval is de afstand  $r$  gelijk aan de afstand tussen de middelpunten van de bollen.
- De waarde van  $f$  hangt af van het medium waarin de deeltjes zich bevinden. Voor vacuüm vind je de waarde van  $f$  in BINAS tabel 7. Deze waarde geldt ook als er sprake is van lucht.

## Eigenschappen van veldlijnen

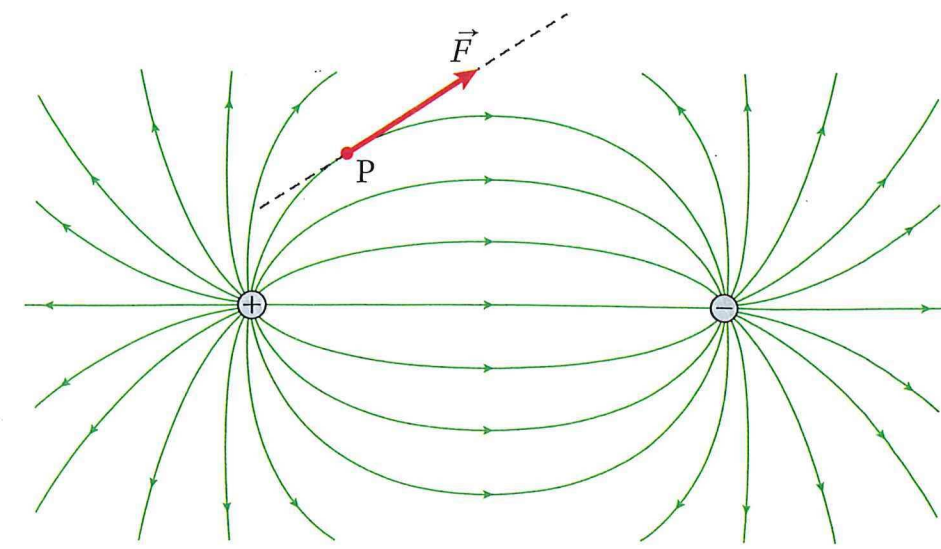
Een elektrisch veld kun je niet zien. De eigenschappen van een elektrisch veld kun je bepalen door een deeltje met een kleine lading in het veld te plaatsen en te kijken naar de grootte en de richting van de kracht op het deeltje. Zo'n klein geladen deeltje noem je een **proeflading**.

In figuur 10.4 zie je in punt P een positieve proeflading  $q$  in de buurt van twee even grote, maar tegengestelde ladingen  $Q_1$  en  $Q_2$ . De kracht  $\vec{F}_1$  is de elektrische kracht die  $q$  ondervindt vanwege  $Q_1$ . Kracht  $\vec{F}_2$  wordt veroorzaakt door  $Q_2$ . De resulterende kracht die  $q$  ondervindt, construeer je met de parallelogrammethode. De richting van het elektrisch veld in punt P heeft dan dezelfde richting als  $\vec{F}_{\text{res}}$ .



Figuur 10.4

In figuur 10.5 zijn de veldlijnen van het elektrisch veld tussen  $Q_1$  en  $Q_2$  weergegeven. De richting van de elektrische kracht die een proeflading  $q$  in punt P zal ondervinden, is gelijk aan de raaklijn aan de veldlijn in P. De veldlijnen geven dus het totale elektrisch veld van de ladingen weer.



Figuur 10.5

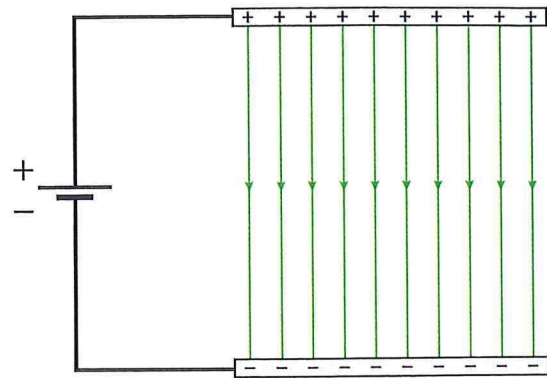
Veldlijnen hebben de volgende eigenschappen:

- De richting van de elektrische kracht in een bepaald punt wordt gegeven door de raaklijn aan de veldlijn door dat punt.
- De richting van de veldlijn is gelijk aan de richting van de kracht op een positieve proeflading.
- Een veldlijn loopt dus altijd van een positieve lading af en/of naar een negatieve lading toe.
- In een tekening is de dichtheid van de veldlijnen een maat voor de sterkte van het veld. Hoe dichter de veldlijnen bij elkaar liggen, des te groter is de elektrische kracht op een proeflading.
- Elektrische veldlijnen snijden elkaar nooit, want in een bepaald punt van het veld is er altijd maar één resulterende elektrische kracht.
- Veldlijnen staan loodrecht op geleiders.

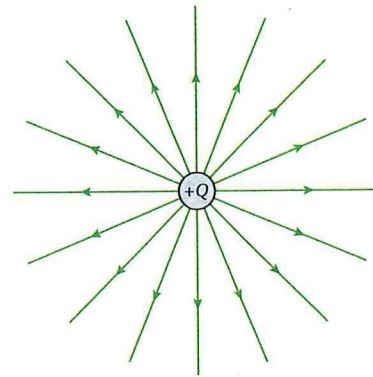
Aan de binnenkant van een geleider is het elektrisch veld altijd nul. Als bijvoorbeeld de buitenkant van een auto opgeladen is, dan merk je binnen in de auto niets van die lading. Houd je bij het uitstappen de auto vast, dan ontlad de auto via jou. En dat merk je wel.

## Radiaal veld en homogeen veld

Twee evenwijdige metalen platen die op een spanningsbron zijn aangesloten, noem je een **condensator**. Tussen de platen van een condensator bevindt zich een **homogeen elektrisch veld**. Zie figuur 10.6. De veldlijnen wijzen dezelfde kant op en zijn evenwijdig, op gelijke onderlinge afstand. De veldsterkte is dus overal even groot en wijst overal dezelfde kant op. Dit betekent dat de elektrische kracht op een proeflading overal even groot is en dezelfde richting heeft.



Figuur 10.6

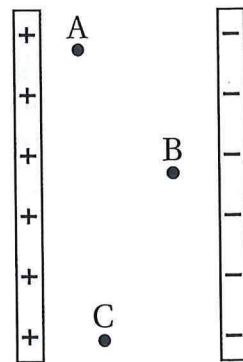


Figuur 10.7

In figuur 10.7 zie je een schematische weergave van een **radiaal veld**. In het midden van een plasmabool bewegen ladingen tussen het bolletje in het midden en de rand van de bol. Het elektrisch veld in een plasmabool is dus radiaal.

### Opgaven

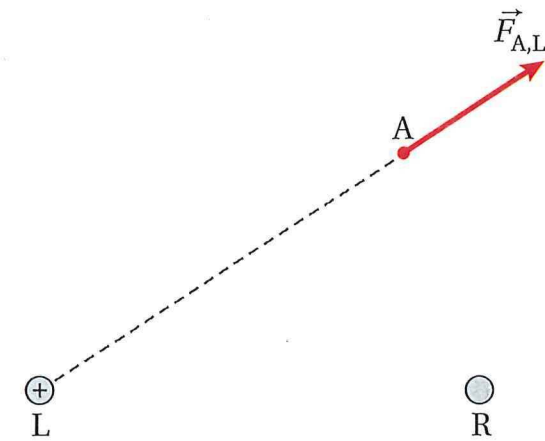
- Twee massieve koperen bollen hebben elk een massa van 0,59 kg. Hun middelpunten bevinden zich op 80 cm van elkaar. In gedachte breng je op beide bollen een lading van 1,0 C aan.
  - Bereken hoe groot de elektrische kracht tussen de bollen dan is.
  - Bereken hoeveel keer zo groot die elektrische kracht is, vergeleken met de gravitatiekracht tussen de bollen.
- Tussen twee geladen platen bevinden zich drie ionen. Zie figuur 10.8. In punt A en punt B bevindt zich een  $\text{Na}^+$ -ion en in punt C een  $\text{Pb}^{2+}$ -ion. Het  $\text{Na}^+$ -ion in punt A ondervindt een elektrische kracht van  $8,0 \cdot 10^{-16}$  N.
  - Toon aan dat de veldsterkte gelijk is aan 5,0 kN/C.
  - Is de kracht die het  $\text{Na}^+$ -ion in punt B ondervindt groter dan, kleiner dan of gelijk aan de kracht op het  $\text{Na}^+$ -ion in punt A? Licht je antwoord toe.
  - Is de versnelling die het  $\text{Pb}^{2+}$ -ion in punt C ondervindt groter dan, kleiner dan of gelijk aan de versnelling van het  $\text{Na}^+$ -ion in punt A. Licht je antwoord toe.



Figuur 10.8

- ▶ **werkblad** 3 Twee even grote metalen bolletjes L en R hebben een even grote maar tegengestelde lading. L is positief geladen. Zie figuur 10.9.

▶ **hulpblad**



Figuur 10.9

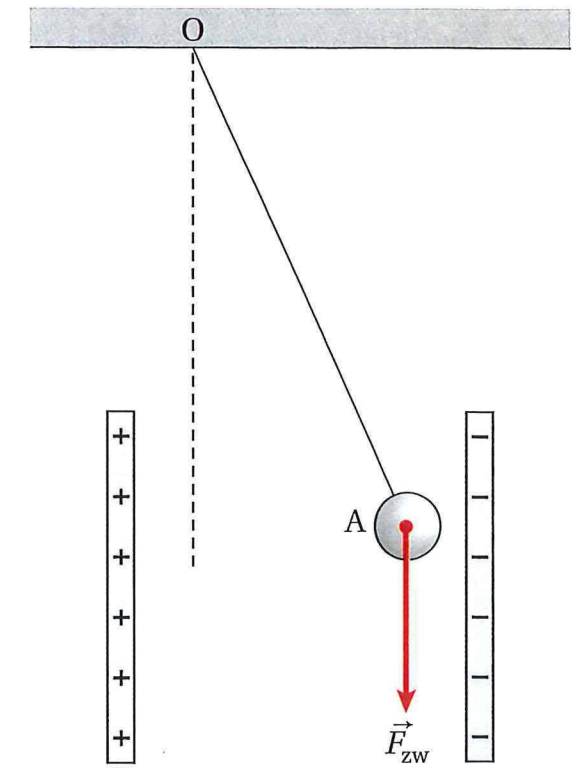
In punt A is een proeflading geplaatst. De kracht die L op de proeflading uitoefent, is getekend als vectorpijl.

- Is de proeflading in A positief of negatief geladen? Licht je antwoord toe.
- Toon aan dat  $F_{A,R}$  3,0 keer zo groot is als  $F_{A,L}$ .
- Construeer de kracht die R op de proeflading in A uitoefent.
- Construeer de resulterende kracht op de proeflading in A.

- ▶ **werkblad** 4 Een geladen metalen bolletje hangt aan een nyldraad in de ruimte tussen de platen van een geladen condensator. Zie figuur 10.10. Het bolletje heeft een massa van 9,2 gram. De afstand van het ophangpunt tot het zwaartepunt van het bolletje bedraagt 71,7 cm. Nadat aan het bolletje een lading is gegeven, gaat het (horizontaal gemeten) 4,3 cm opzij.

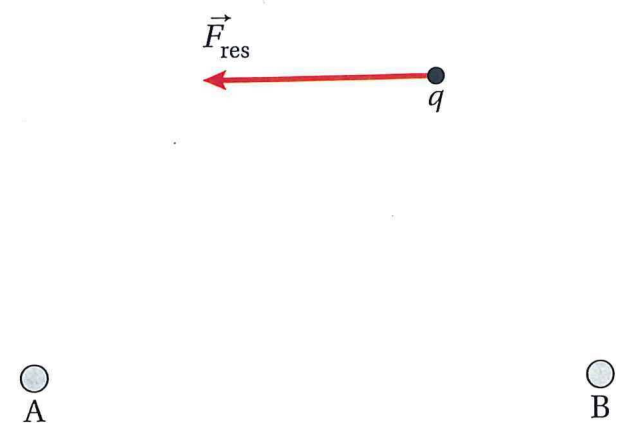
▶ **hulpblad**

- Construeer in figuur 10.10 de twee andere krachten die dan op het bolletje werken.
- Bereken de elektrische kracht die op het bolletje werkt. Met behulp van een geladen bolletje aan een draad toon je aan dat het elektrisch veld tussen de platen homogeen is.
- Leg dit uit.



Figuur 10.10

- **werkblad** 5 Proeflading  $q$  bevindt zich in de buurt van twee ladingen A en B. Zie figuur 10.11.  
 ► **hulpblad** De resulterende kracht op  $q$  is weergegeven. De lading van A is groter dan de lading van B. Lading A is negatief.



Figuur 10.11

- Leg uit of de lading van B positief of negatief is. Op  $q$  werkt een elektrische kracht  $F_A$  als gevolg van lading A en een elektrische kracht  $F_B$  als gevolg van lading B. De kracht  $F_A$  is groter dan de kracht  $F_B$ .
- Toon dit aan door in figuur 10.11 de resulterende kracht te ontbinden. Omdat de kracht  $F_A$  groter is dan de kracht  $F_B$ , is de lading van A groter dan de lading van B.
- Leg dit uit.
- Bepaal de verhouding tussen de lading van A en de lading van B.

In CERN worden protonen en ionen versneld om ze met zeer grote snelheden te laten botsen. Uit de botsingsproducten leiden natuurkundigen eigenschappen van elementaire deeltjes af. Hoe werkt zo'n deeltjesversneller?

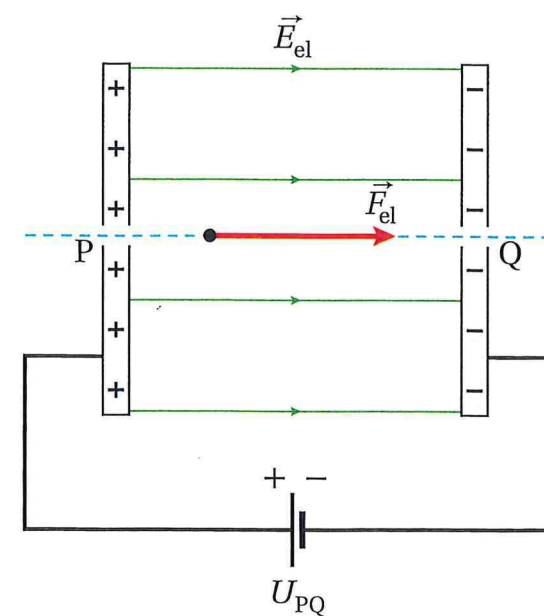


Figuur 10.12

## 10.2 Elektrische energie

### Potentiële energie en kinetische energie

Tussen de condensatorplaten van figuur 10.13 bevindt zich een homogeen elektrisch veld. In elke plaat zit een opening. Wanneer een proton bij P de condensator komt binnenvliegen, werkt een elektrische kracht op het proton. Het proton is positief, dus de elektrische kracht wijst in de richting van het elektrisch veld. De elektrische kracht is in deze situatie de resulterende kracht waardoor het proton versnelt. De snelheid van het proton bij punt Q zal hoger zijn dan de snelheid bij P. Als het proton een hogere snelheid heeft gekregen, is zijn **kinetische energie** toegenomen. Volgens de wet van behoud van energie is dan een vorm van **potentiële energie** afgenomen.



Figuur 10.13

Je kunt ook zeggen dat de kinetische energie van het proton is toegenomen omdat de elektrische kracht positieve arbeid heeft verricht. Als een kracht positieve arbeid verricht, neemt de erbij behorende energie af. In dit geval neemt de elektrische energie van het proton af bij de oversteek van P naar Q. De elektrische energie van het proton is hoger in P dan in Q. De toename van de kinetische energie is gelijk aan de afname van de **elektrische energie**.

Er geldt:

$$\Delta E_k = -\Delta E_{el}$$

- $\Delta E_k$  is de verandering van de kinetische energie.  

$$\Delta E_k = E_{\text{eind}} - E_{\text{begin}}$$
- $\Delta E_{el}$  is de verandering van de elektrische energie.  

$$\Delta E_{el} = E_{\text{el,eind}} - E_{\text{el,begin}}$$

De sterkte van het elektrisch veld hangt af van de grootte van de **spanning** die over de condensatorplaten staat. Hoe groter de spanning, des te sterker is het elektrisch veld. Bij een grotere spanning neemt de kinetische energie meer toe. De verandering van de elektrische energie hangt dus af van de spanning. Er geldt:

$$\Delta E_{el} = q \cdot U$$

- $\Delta E_{el}$  is de verandering van de elektrische energie in joule.
- $q$  is de lading in coulomb.
- $U$  is de spanning in volt.

Net als bij zwaarte-energie mag je zelf bepalen waar de energie 0 J is. Dat wil zeggen: welke plaat een spanning heeft van 0 V ten opzichte van de aarde. Gebruikelijk is dat de plaat verbonden is met de negatieve pool. Dat betekent dat de elektrische energie van een deeltje bij de negatieve plaat 0 J is.

De spanning van de positieve pool is dan altijd positief. Of de elektrische energie van een deeltje bij de positieve plaat positief of negatief is, hangt dan uitsluitend af van de lading van dat deeltje.

#### Voorbeeld

In figuur 10.13 heeft het proton bij punt P een snelheid van  $2,4 \cdot 10^5$  m/s. Over de condensatorplaten staat een spanning van 150 V. Bereken de snelheid waarmee het proton de condensatorruimte verlaat.

#### Uitwerking

$$\sum E_{\text{in}} = \sum E_{\text{uit}}$$

$$E_{k,P} + E_{el,P} = E_{k,Q} + E_{el,Q}$$

Punt Q is verbonden met de negatieve pool. Dus daar stel je de elektrische energie  $E_{el,Q}$  op 0 J. In BINAS tabel 7 vind je de massa en de lading van een proton.

$$\frac{1}{2} m \cdot v_P^2 + q \cdot U_P = \frac{1}{2} m \cdot v_Q^2$$

$$\frac{1}{2} \times 1,672 \cdot 10^{-27} \times (2,4 \cdot 10^5)^2 + 1,602 \cdot 10^{-19} \times 150 = \frac{1}{2} \times 1,672 \cdot 10^{-27} \times v_Q^2$$

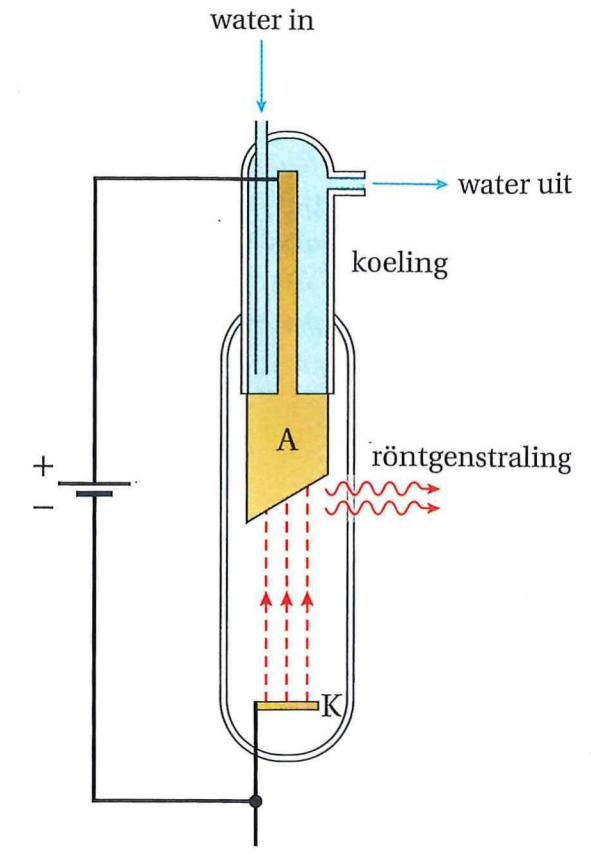
$$v_Q = 2,938 \cdot 10^5 \text{ m/s}$$

$$\text{Afgerond: } v_Q = 2,9 \cdot 10^5 \text{ m/s}$$

## Röntgenbuis

Een **röntgenapparaat** maakt gebruik van **röntgenstraling** om een afbeelding van bijvoorbeeld gebroken botten te maken. De röntgenstraling die daarvoor nodig is, wordt opgewekt in een **röntgenbuis**.

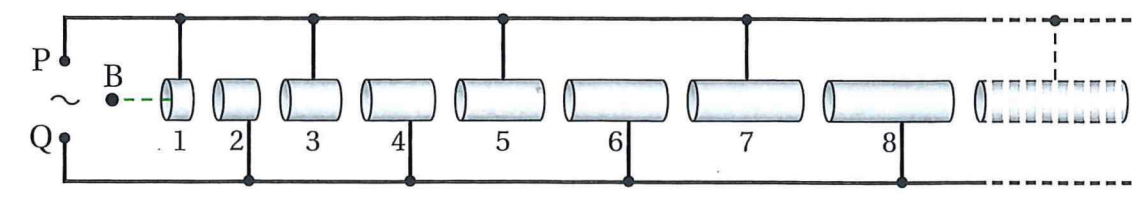
In een röntgenbuis worden elektronen versneld met behulp van een sterk elektrisch veld. Figuur 10.14 toont schematisch de werking van een röntgenbuis. De negatieve pool K wordt verhit waardoor elektronen losraken uit het metaal. De positieve pool A is een blok metaal van bijvoorbeeld koper. De spanning  $U_{AK}$  is enkele tientallen kilovolt. Elektronen botsen daardoor met een zeer hoge snelheid op blok A. Hierbij ontstaat röntgenstraling. Behalve röntgenstraling ontstaat ook veel warmte. Daarom moet je het blok koelen.



Figuur 10.14

## Lineaire versneller

Bij CERN krijgen protonen en ionen in een **lineaire versneller** bijna de lichtsnelheid. In theorie is daarvoor een spanning nodig van honderden miljoenen volt. Dat is praktisch onmogelijk. In een lineaire versneller worden daarom protonen in stappen versneld met behulp van een wisselend elektrisch veld. In figuur 10.15 zie je een schematische afbeelding van een lineaire versneller.



Figuur 10.15

Vanuit bron B komt een proton met een relatief lage snelheid in buis 1. Als het proton het rechteruiteinde van buis 1 heeft bereikt, is buis 1 positief en buis 2 negatief. Het proton wordt dus versneld als het van buis 1 naar buis 2 gaat.

Met de snelheid waarmee het proton buis 2 bereikt, doorloopt het ook buis 2. Op het proton werkt geen elektrische kracht, omdat binnenin een geleider geen elektrisch veld aanwezig is. Terwijl het proton buis 2 doorloopt, wordt de spanning omgedraaid. Daardoor wordt het proton weer versneld, tijdens de oversteek van buis 2 naar buis 3. Zo ondergaat het proton in de versneller meerdere keren de spanning  $U_{PQ}$ . Doordat de spanning telkens op het juiste moment wordt omgedraaid, neemt de kinetische energie tussen twee buizen telkens toe.

Hierbij geldt telkens  $\Delta E_k = q \cdot U_{PQ}$

Een nieuw proton kan vanuit de bron buis 1 binnenkomen zodra het eerste proton buis 3 binnenkomt. Beide buizen hebben dezelfde lading. Zo kunnen meerdere protonen versneld worden door, telkens als de protonen zich in de buizen bevinden, de spanning om te keren. De verblijftijd in een buis moet dus even lang zijn voordat de spanning wordt omgedraaid. Omdat de snelheid van de protonen steeds groter wordt, leggen de protonen een grotere afstand af tijdens de verblijftijd in de buis. Daarom zijn de buizen steeds langer.

### Elektronvolt

De energie van deeltjes druk je uit in joule. Een andere eenheid voor energie is elektronvolt. Er geldt:  $1,000 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ . De elektronvolt is een handige eenheid: een deeltje met de lading van een elektron dat een spanning van 1,000 volt doorloopt, krijgt een verandering in kinetische energie van:

$$\Delta E_{\text{kin}} = q \cdot U = 1,602 \cdot 10^{-19} \times 1,000 = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1,000 \text{ eV}$$

### Opgaven

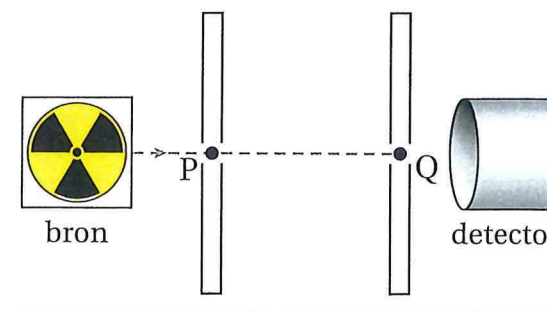
- 6 In de tekst staat: Om een proton tot bijna de lichtsnelheid te versnellen is een spanningsverschil nodig van honderden miljoenen volt.
- Toon dit aan.
  - Neem aan dat de spanning  $U_{PQ}$  in figuur 10.15 gelijk is aan 20 kV.
  - Toon aan dat de kinetische energie van het proton in buis 8 gelijk is aan 0,14 MeV.
- 7 Een proton bevindt zich in punt A op enige afstand van een positief geladen metalen bol. Het proton beweegt onder invloed van de elektrische kracht naar punt B dat verder van de geladen bol ligt dan A. De elektrische kracht verricht daarbij een arbeid  $W_p$ .
- Leg uit dat de arbeid  $W_p$  positief is. Je plaatst vervolgens in punt A een alfadeeltje. In vergelijking met een proton is de positieve lading van dit deeltje twee keer zo groot en de massa vier keer zo groot. Ook het alfadeeltje gaat van A naar B. De elektrische kracht verricht nu een arbeid  $W_\alpha$ .
  - Beredeneer hoe groot de verhouding  $\frac{W_\alpha}{W_p}$  is.

Tijdens de beweging van A naar B wordt elektrische energie omgezet in kinetische energie. In punt A is de snelheid van het proton en de snelheid van het alfadeeltje verwaarloosbaar.

c Is de snelheid van het alfadeeltje in punt B groter dan, kleiner dan of gelijk aan de snelheid van het proton in punt B? Licht je antwoord toe.

- 8 Een radioactieve bron zendt alfadeeltjes uit. In figuur 10.16 zie je een schematische weergave van de opstelling. Een alfadeeltje is een tweewaardig helium-ion  $\text{He}^{2+}$ . Tussen de radioactieve bron en een deeltjesdetector bevinden zich twee condensatorplaten met een opening. Vanaf een spanning van 2,6 MV over de condensatorplaten worden er geen alfadeeltjes meer gedetecteerd.

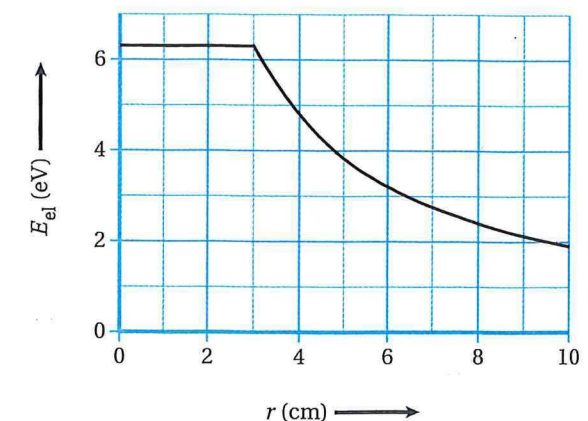
- Leg uit of de linkerplaat positief of negatief is.
- Bereken de beginsnelheid van de alfadeeltjes.



Figuur 10.16

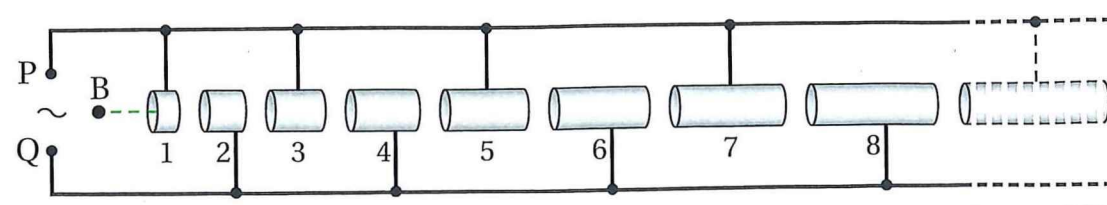
- **werkblad** 9 Wanneer op een metalen bol een grote negatieve lading wordt aangebracht, komen sommige elektronen los van de bol. In figuur 10.17 zie je de grootte van de elektrische energie van de elektronen als functie van de afstand tot het midden van de bol.

- Leg uit waarom de straal van de bol gelijk is aan 3,0 cm.
- Leg uit dat uit figuur 10.17 blijkt dat het elektron versnelt na het loskomen van de bol.
- Teken in figuur 10.17 het verloop van de grafiek van de kinetische energie in het diagram.
- Bereken de theoretisch maximale snelheid van het elektron.
- Noem een reden waarom het elektron deze snelheid nooit bereikt.



Figuur 10.17

- **werkblad** 10 In figuur 10.18 zie je een schematische lineaire versneller. B is een bron die protonen uitzendt. P en Q zijn de aansluitpunten van een wisselspanningsbron.
- **hulpblad**



Figuur 10.18

In figuur 10.19 is het verloop van de spanning  $U_{PQ}$  als functie van de tijd weergegeven. Hierbij is  $U_{PQ}$  de spanning van P ten opzichte van Q. De frequentie van de wisselspanning is constant. Op tijdstip  $t_1$  bevindt zich een proton midden tussen de eerste en de tweede buis.

- a Toon met behulp van figuur 10.18 en 10.19 aan dat het proton tijdens de oversteek van de tweede naar de derde buis wordt versneld.

Dit proton wordt tijdens elke oversteek versneld. Daarbij doorloopt het steeds een (gemiddeld) even grote spanning.

- b Geef in figuur 10.19 het tijdstip  $t_2$  aan waarop het proton zich midden tussen de tweede en de derde buis bevindt. Geef ook het tijdstip  $t_3$  aan waarop het proton zich midden tussen de derde en de vierde buis bevindt.

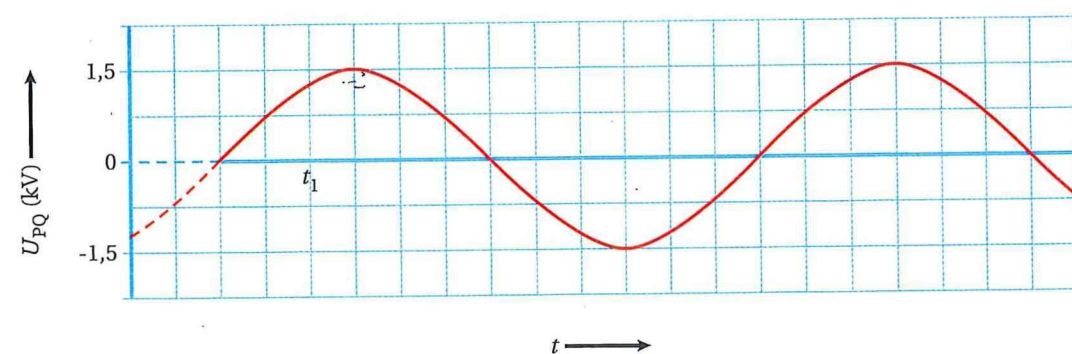
- c Leg uit waarom opeenvolgende buizen steeds langer moeten zijn.

Tijdens elke oversteek doorloopt het proton een spanning van gemiddeld 1,3 kV. Neem aan dat het proton de eerste buis met een te verwaarlozen snelheid verlaat.

- d Toon aan dat de snelheid waarmee het proton de vijfde buis doorloopt gelijk is aan  $1,0 \cdot 10^6$  m/s.

De wisselspanning heeft een frequentie van 2,0 MHz.

- e Bereken hoe lang de vijfde buis hoogstens kan zijn.



Figuur 10.19

Op een autokerkhof verplaatst men onderdelen van ijzer met een elektromagneet. Hoe wordt het magnetisch veld in een elektromagneet opgewekt? Welke eigenschappen heeft het magnetisch veld?



Figuur 10.20

## 10.3 Elektromagnetisme

### Magnetisch veld

In figuur 10.21 zie je een koelkastmagneet. Op de achterkant zit een magneet die is gemaakt van een magnetiseerbaar materiaal zoals ijzer. Maar ook nikkel en kobalt zijn magnetiseerbaar.

In een kompas zit een naaldvormige magneet. Zie figuur 10.22. De noordpool van de naald is rood. Houd je een andere magneet in de buurt van het kompas, dan gaat de naald draaien. Ook bij magneten is er een krachtwerking op afstand. De omgeving waarin de magnetische kracht merkbaar is, noem je het **magnetisch veld**.



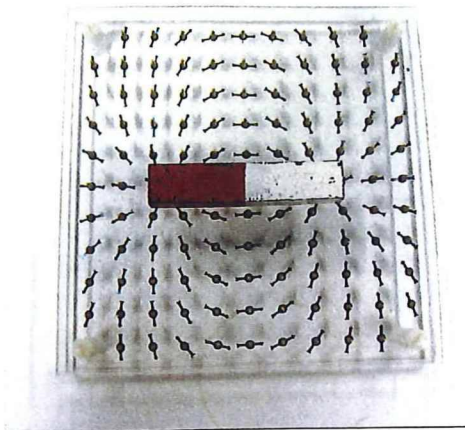
Figuur 10.21



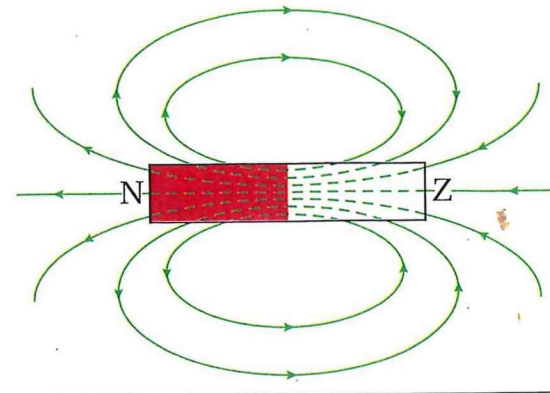
Figuur 10.22

De richting van het magnetisch veld kun je met een kompas bepalen. De naald van een kompas wijst altijd langs de **veldlijnen** van het magnetisch veld. Door meerdere kompasnaalden in de buurt van een magneet te plaatsen, breng je het veld van de magneet in kaart. Zie figuur 10.23.

In figuur 10.24 is het magnetisch veld van deze magneet met veldlijnen weergegeven.



Figuur 10.23



Figuur 10.24

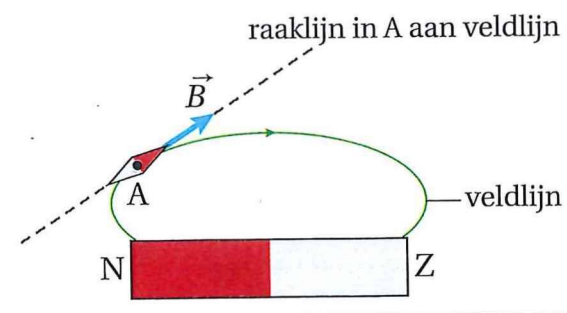
Veldlijnen van een magnetisch veld hebben de volgende eigenschappen:

- Veldlijnen zijn gesloten krommen. Buiten de magneet lopen ze van de noordpool naar de zuidpool.
- De richting van een veldlijn in een bepaald punt P (de richting van de raaklijn in P) geeft de richting aan van het magnetisch veld in P.
- Veldlijnen komen niet altijd loodrecht uit een magneet.
- Veldlijnen snijden elkaar nooit.
- Naarmate het magnetisch veld sterker is, lopen de veldlijnen dichter bij elkaar.

In een **homogeen magnetisch veld** is de sterkte van het veld overal gelijk en heeft het veld overal dezelfde richting. In een figuur worden de magnetische veldlijnen dan evenwijdig aan elkaar en op onderling gelijke afstanden getekend.

### Magnetische inductie

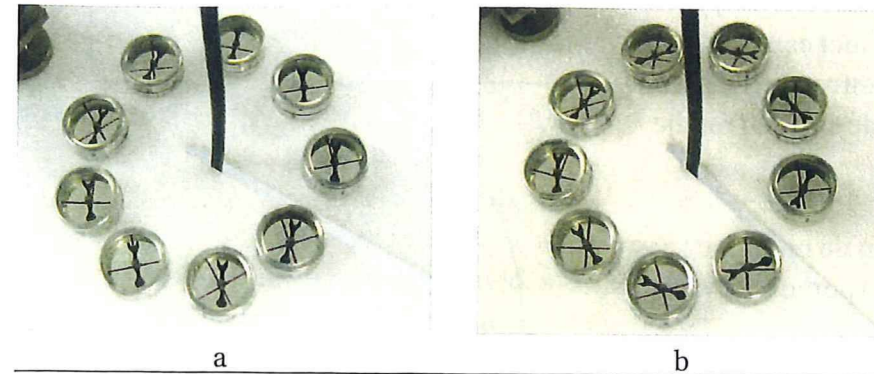
Bij een elektrisch veld spreek je over de elektrische veldsterkte  $E$ . Bij het magnetisch veld heet de sterkte de **magnetische inductie** met symbool  $B$ . De magnetische inductie  $B$  is een vectorgrootheid, want de sterkte van het magnetisch veld heeft een grootte en een richting. De richting van  $B$  is gelijk aan de richting van het magnetisch veld. Zie figuur 10.25. De eenheid van magnetische inductie is tesla met symbool T.



Figuur 10.25

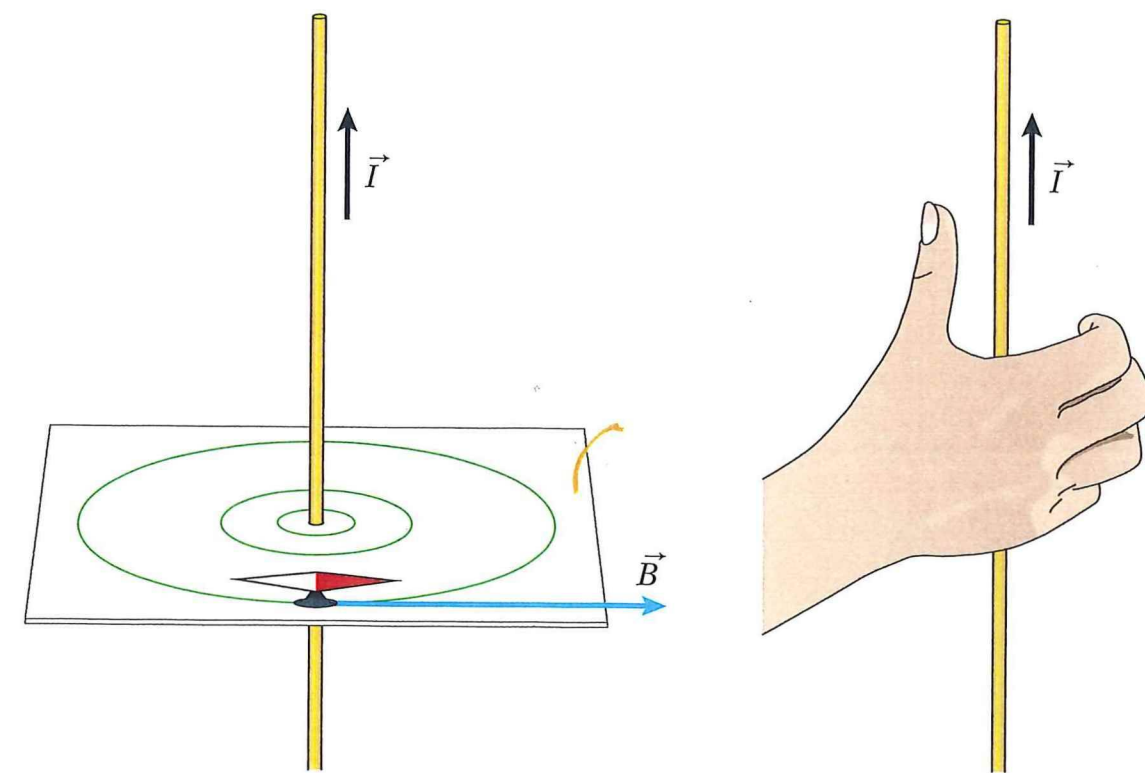
### Bewegende ladingen in een draad

Bewegende lading wekt een magnetisch veld op. Door een aantal kompasnaaldjes te plaatsen rond een stroomdraad, maak je het magnetisch veld van de stroomdraad zichtbaar. In figuur 10.26a loopt geen stroom door de draad. De kompasnaaldjes wijzen allemaal langs het magnetisch veld van de aarde. In figuur 10.26b loopt er stroom van beneden naar boven door de draad. Je ziet dat het veld van de draad om de draad heen loopt, tegen de wijzers van de klok in. Op een grotere afstand van de draad is het veld zwakker. Laat je de stroom in tegenovergestelde richting door de draad lopen, dan wijzen de kompasnaalden de andere kant op.



Figuur 10.26

Om de richting van het **magnetisch veld van een draad** te bepalen, gebruik je de **rechterhandregel**. Laat je de duim van je rechterhand met de stroom meewijzen, dan geven je vingers de richting van het magnetisch veld aan. Zie figuur 10.27.



Figuur 10.27

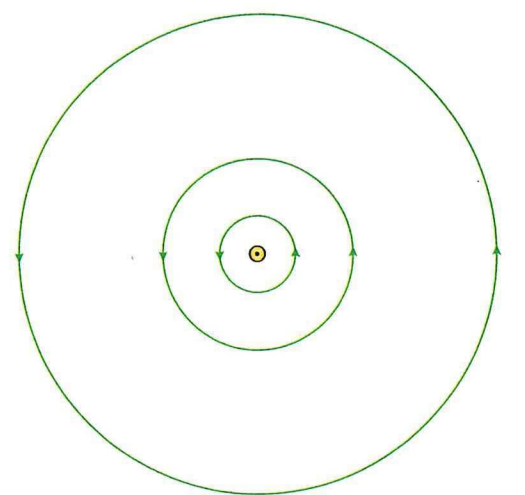
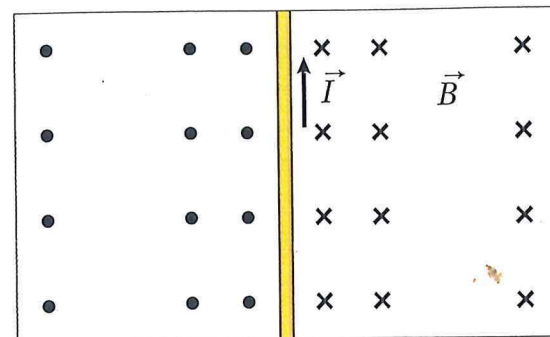


## Notatieregels voor richtingen

Als een stroom of een veldlijn loodrecht op het papier staat, is het lastig om eenduidig aan te geven of de stroom naar je toekomt of juist niet. Internationaal is daarom de volgende afspraak gemaakt:

- De richting loodrecht het papier in geef je aan met een kruisje.
- De richting loodrecht het papier uit geef je aan met een dikke stip.
- Bij elektrische stromen wordt om het kruisje of de stip een rondje gezet.

In figuur 10.28 zijn de notatieregels toegepast op de stroomdraad van figuur 27.

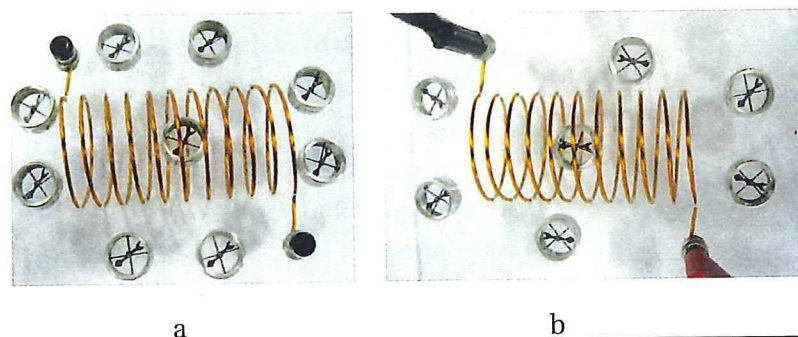


Figuur 10.28

## Bewegende ladingen in een spoel

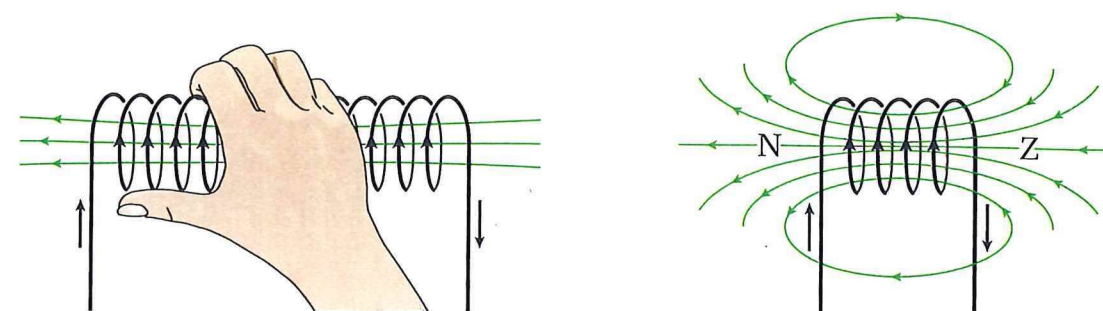
Aan de binnenkant van een spoel ontstaat een homogeen magnetisch veld zodra er stroom door de spoel loopt.

In figuur 10.29a loopt er nog geen stroom, de kompasnaaldjes wijzen langs het magnetisch veld van de aarde. In figuur 10.29b loopt er wel een stroom. Je ziet dat het veld dezelfde vorm heeft als het veld van een staafmagneet.



Figuur 10.29

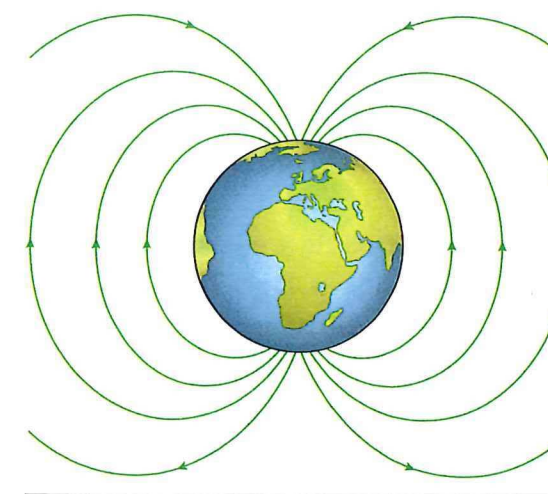
Om de richting van het **magnetisch veld in de spoel** te bepalen, gebruik je de **rechterhandregel** op een andere manier. Nu krullen je vingers met de stroomrichting mee, terwijl je duim langs de veldlijnen aan de binnenkant van de spoel is gericht. Je duim wijst dus naar de noordpool van het magnetisch veld in de spoel. Zie figuur 10.30.



Figuur 10.30

## Aardmagnetisch veld

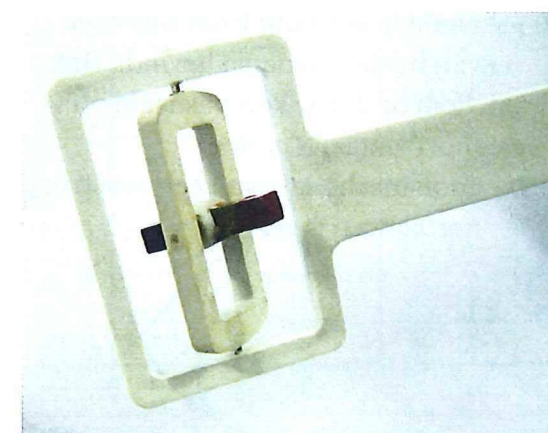
De noordpool van een kompasnaald wijst altijd naar het geografische noorden. Dat betekent dat de magnetische zuidpool van de aarde zich in de buurt van de Noordpool bevindt. In figuur 10.31 zie je het magnetisch veld van de aarde schematisch weergegeven. Op de evenaar loopt het magnetisch veld evenwijdig aan het oppervlak van de aarde. Hoe verder je van de evenaar af komt, des te groter is de component van het magnetisch veld loodrecht op het aardoppervlak.



Figuur 10.31

In figuur 10.32 zie je een driedimensionaal kompas waarmee je de richting van het magnetisch veld zichtbaar maakt.

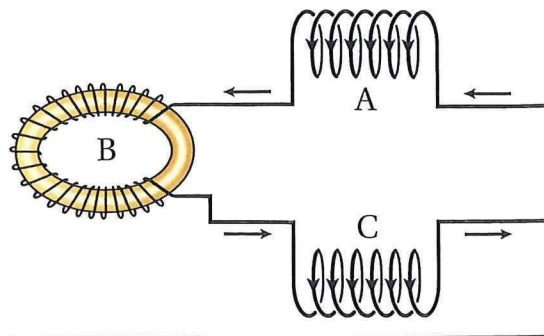
Het magnetisch veld van onze aarde wordt veroorzaakt door draaiende ladingen in de vloeibare aardkern. De aarde gedraagt zich dus als een spoel.



Figuur 10.32

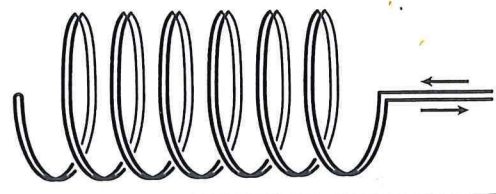
## Opgaven

- **werkblad** 11 In figuur 10.33 zie je drie stroomspoelen A, B en C. In figuur 10.34 zie je een zogenaamde dubbelgewonden stroomspoel.



Figuur 10.33

- Teken in figuur 10.33 voor elke spoel de richting van de veldlijnen binnen de spoel. Geef een toelichting op je antwoord.
- Geef in je tekening, indien mogelijk, aan waar de noord- en zuidpool van elke spoel liggen.
- Vertoont de dubbelgewonden stroomspoel in figuur 10.34 magnetische werking? Licht je antwoord toe.



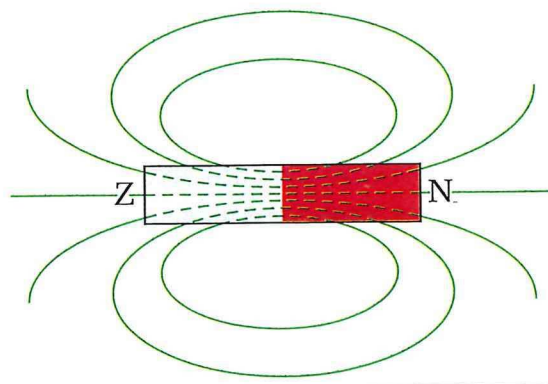
Figuur 10.34

- **werkblad** 12 In figuur 10.35 zie je een magneet met enkele veldlijnen. De richting van de veldlijnen is niet aangegeven.

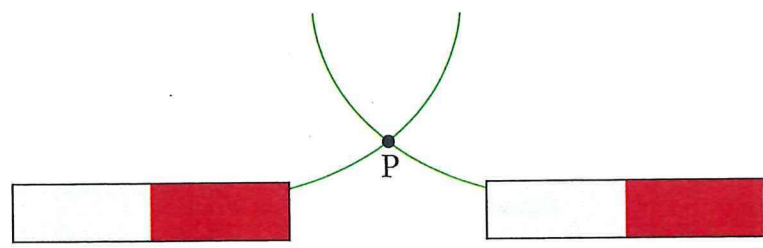
- Geef in figuur 10.35 de richting van de veldlijnen aan.

Auke plaatst twee even sterke magneten tegenover elkaar. In figuur 10.36 zie je nog een deel van een oorspronkelijke veldlijn. Auke plaatst een kompasnaald in een punt P dat zich even ver van beide magneten bevindt. Het valt hem op dat de kompasnaald precies horizontaal is gericht.

- Toon met behulp van een constructie aan dat de kompasnaald precies horizontaal is gericht.

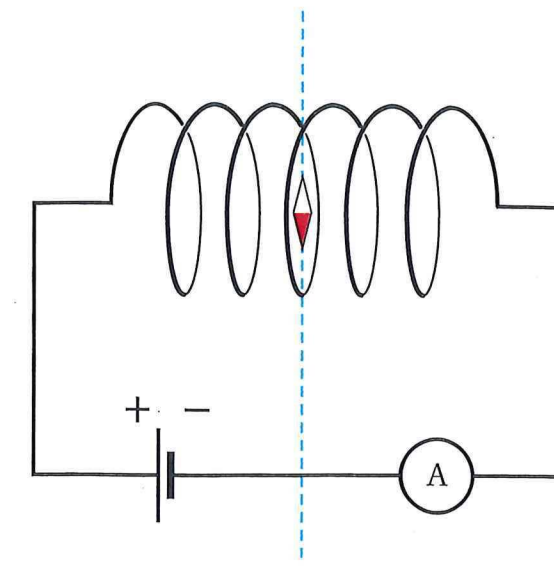


Figuur 10.35



Figuur 10.36

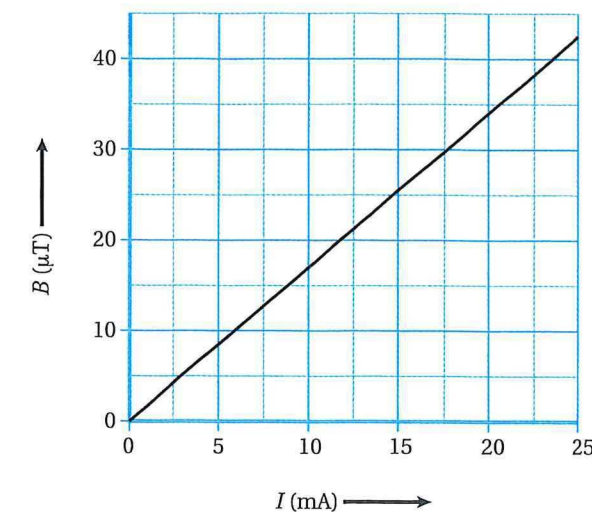
- **hulpblad** 13 Vincent wil de sterkte van de magnetische inductie in Nederland bepalen. Hij gebruikt daarvoor een kompas en een spoel. Hij plaatst het kompas in de spoel, en plaatst de spoel horizontaal op tafel. Vervolgens draait hij de spoel zodat de naald van het kompas loodrecht op de as van de spoel staat wanneer er geen stroom loopt. Zie figuur 10.37. Vincent weet hoe het magnetisch veld van de spoel afhangt van de stroomsterkte door de windingen van de spoel. Zie figuur 10.38.



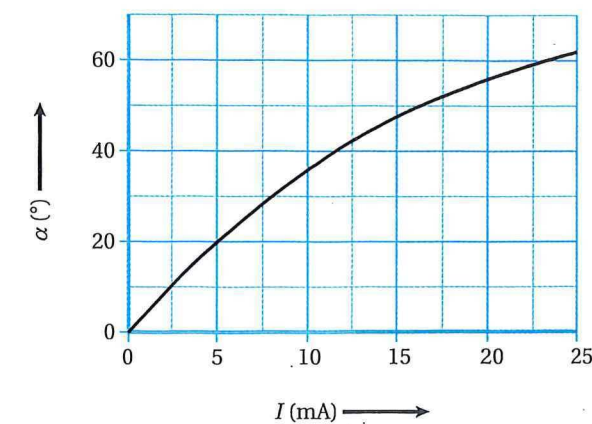
Figuur 10.37

Bij verschillende waarden van de stroomsterkte meet hij hoe groot de hoek van de kompasnaald ten opzichte van de originele stand is. Zijn meetresultaten heeft hij uitgezet in figuur 10.39. Aan de hand daarvan bepaalt Vincent de sterkte van het magnetisch veld in Nederland.

- Leg uit of de naald van het kompas met of tegen de wijzers van de klok draait als Vincent de spanningsbron inschakelt.
- Leg uit of de hoek van de kompasnaald steeds groter wordt of dat deze een grenswaarde heeft.
- Leg aan de hand van een constructie uit dat de waarde van het magnetisch veld van de aarde volgens de methode van Vincent gelijk is aan  $2,3 \cdot 10^{-5}$  T.
- Leg uit dat Vincent met deze aanpak een te lage waarde voor het magnetisch veld van de aarde vindt.



Figuur 10.38



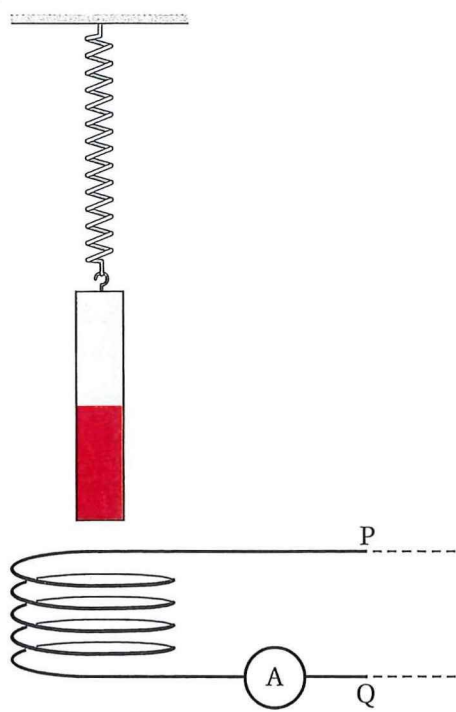
Figuur 10.39

- **werkblad** 14 Jessica heeft twee stroomdraden naast elkaar geplaatst. Eerst laat ze door de linkerdraad een stroom omhoog, en door de rechterdraad een stroom omlaag lopen. Zie figuur 40a. Ze bepaalt de sterkte van het magnetisch veld in P en Q. Vervolgens laat ze zowel de stroom door de linkerdraad en de stroom door de rechterdraad naar beneden lopen. Zie figuur 10.40b. Ze bepaalt de sterkte van het magnetisch veld in R en S.
- Bepaal in elk punt de richting van het magnetisch veld.
  - Sorteer de punten P, Q, R en S op volgorde van oplopende magnetische inductie.

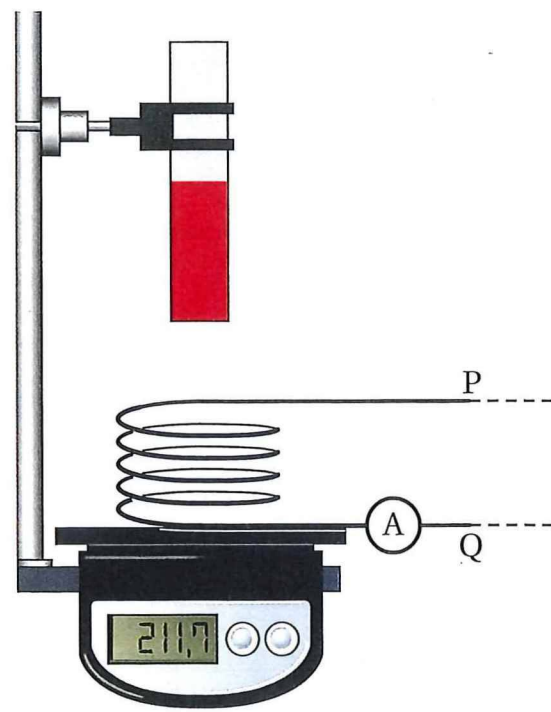


Figuur 10.40

- **werkblad** 15 Lotte wil het verband tussen de sterkte van het magnetisch veld van een spoel en de stroomsterkte door die spoel bepalen. Ze wil daarvoor de opstelling in figuur 10.41 gebruiken. De magneet wordt naar de spoel getrokken als zij de stroom inschakelt.
- Bepaal of de stroom van P naar Q loopt of van Q naar P. De magneet blijft niet in een evenwichtstoestand hangen maar gaat de spoel in. Er is geen stand waarin de magneet blijft hangen.
  - Leg uit waarom het vrijwel onmogelijk is om de magneet in een evenwichtsstand stil te laten hangen.



Figuur 10.41



Figuur 10.42

Lotte verbetert haar opstelling door de spoel op een weegschaal te zetten en de magneet in een statief boven de weegschaal te plaatsen. Zie figuur 10.42.

De zuidpool van de spoel PQ bevindt zich aan de bovenkant van de spoel.

c Geef in figuur 10.42 de stroomrichting aan in de spoel.

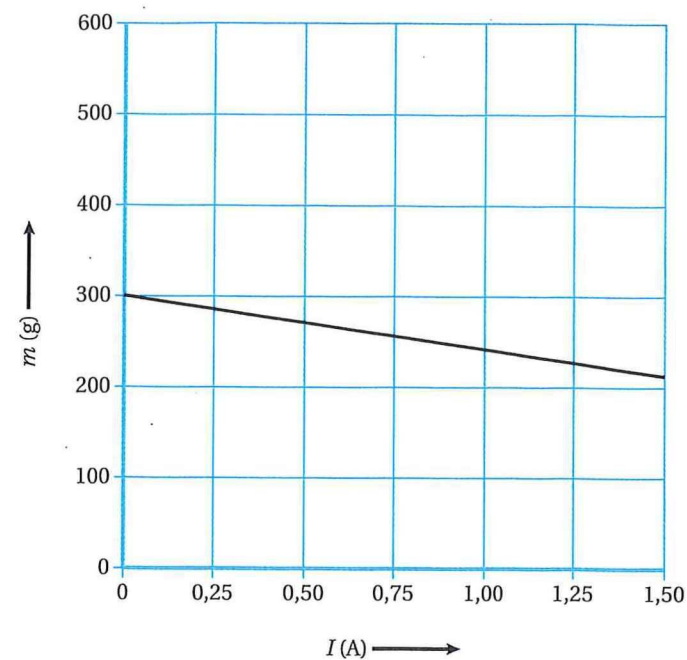
Bij verschillende stroomsterkten leest ze de weegschaal af. Van haar metingen heeft ze het diagram in figuur 10.43 gemaakt.

Lotte concludeert dat de magnetische inductie in de spoel recht evenredig is met de stroomsterkte.

d Let uit of je het met Lotte eens bent.

Door een ijzeren kern in de spoel te plaatsen, wordt het magnetisch veld van de spoel versterkt.

e Schets in figuur 10.43 het verband tussen de massa en de stroomsterkte als Lotte de meting herhaalt met de ijzeren kern in de spoel.



Figuur 10.43

De zon zendt geladen deeltjes uit die in onze dampkring botsen met moleculen van de lucht. Bij deze botsingen zenden de moleculen licht uit dat je waarneemt als het noorderlicht. Waarom zie je het noorderlicht alleen aan de polen?

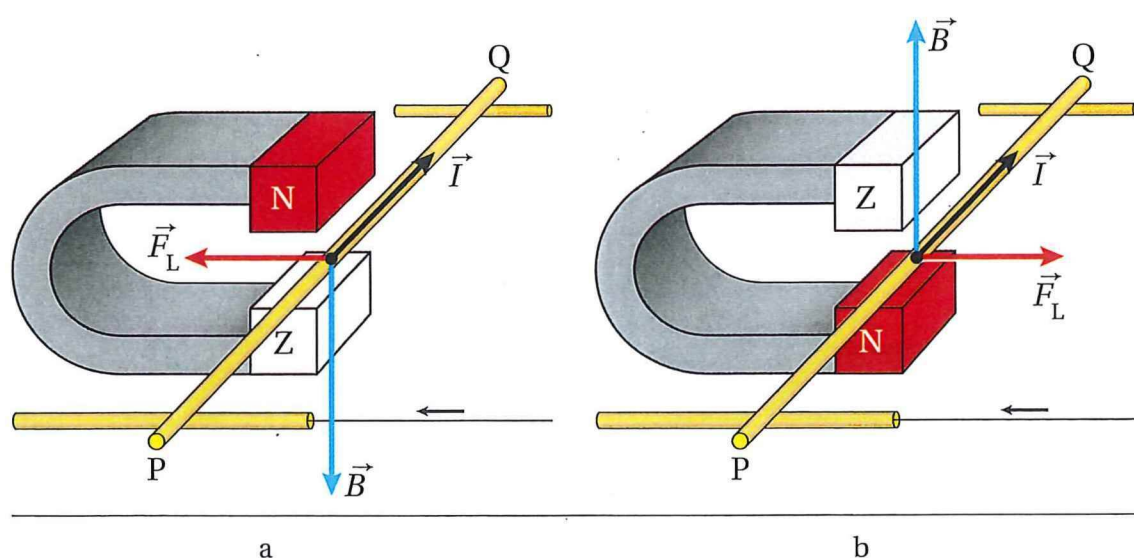


Figuur 10.44

## 10.4 Lorentzkracht

### Bewegende lading in een magnetisch veld

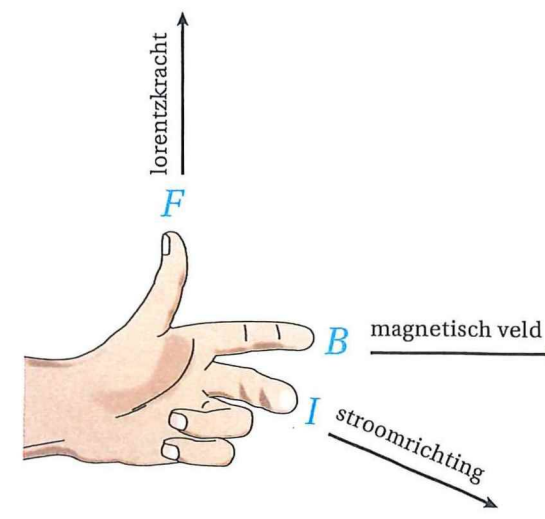
In figuur 10.45a zie je een hoefijzermagneet. Tussen de polen van zo'n magneet bevindt zich een homogeen magnetisch veld  $B$ . Op twee rails rust een ronde metalen staaf PQ. Als er een stroom door de staaf loopt van P naar Q, dan rolt de staaf naar links. Draai je de stroomrichting om dan rolt de staaf naar rechts. Ook als je alleen de magneet andersom houdt zoals in figuur 10.45b, dan rolt de staaf naar rechts. De staaf beweegt omdat het magnetisch veld van de staaf en het magnetisch veld van de hoefijzermagneet krachtwerking op elkaar uitoefenen. Die kracht noem je de **lorentzkracht** met symbool  $F_L$ .



Figuur 10.45

### Richting van de Lorentzkracht

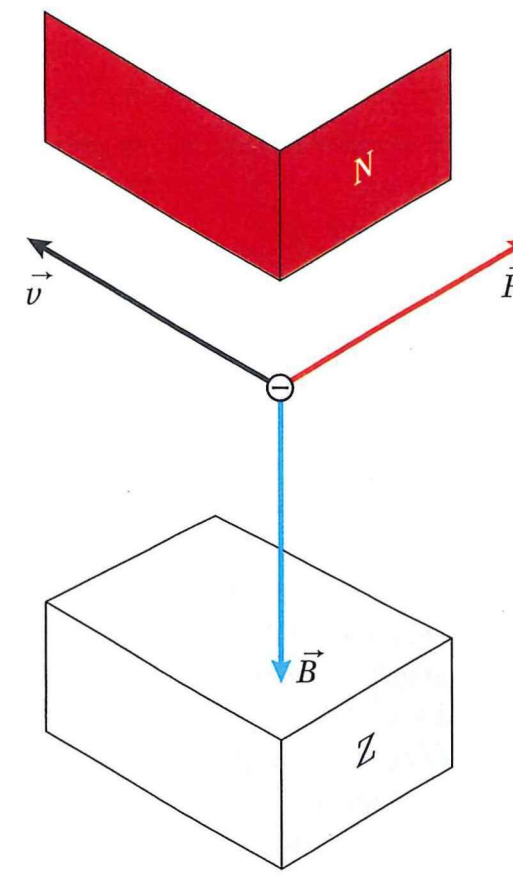
De Lorentzkracht staat loodrecht op het vlak gevormd door de richting van de stroom  $I$  en de richting van de magnetische inductie  $B$ . Met behulp van de **linkerhandregel** bepaal je de richting van de Lorentzkracht. Je houdt je linkerhand in de vorm van een pistool zodat de duim, wijsvinger en middelvinger loodrecht op elkaar staan. Zie figuur 10.46. De duim geeft de richting van Lorentzkracht  $F$  aan; de wijsvinger de richting van magnetische inductie  $B$  en de middelvinger de richting van stroomsterkte  $I$ . Denk hierbij aan 'FBI'. Je wijsvinger en je middelvinger vormen dus het vlak waar de Lorentzkracht loodrecht op staat. Controleer in figuur 10.45 dat de richtingen van 'FBI' overeenkomen met de linkerhandregel.



Figuur 10.46

De richting van  $I$  is volgens afspraak de richting waarin positieve deeltjes bewegen. In figuur 6.45 bewegen de elektronen dus in tegenovergestelde richting van de stroom  $I$ .

In figuur 10.47 beweegt een negatief deeltje met snelheid  $v$  naar links. De stroomrichting is dus naar rechts. Omdat het magnetisch veld naar beneden wijst, volgt uit de **FBI-regel** dat de Lorentzkracht het papier in wijst.



Figuur 10.47

### Lorentzkracht op een stroomdraad

Als ladingen bewegen in een magnetisch veld, werkt er een Lorentzkracht op de ladingen. Die Lorentzkracht is groter naarmate het magnetisch veld sterker is. De Lorentzkracht is ook groter als er meer ladingen tegelijkertijd bewegen. Dit is het geval als de stroomsterkte groter is, maar ook als een groter deel van de staaf zich in het magnetisch veld bevindt.

De grootte van de **lorentzkracht op een stroomdraad** bereken je met:

$$F_L = B \cdot I \cdot \ell \quad \text{mits } \vec{B} \perp \vec{I}$$

- $F_L$  is de lorentzkracht in N.
- $I$  is de stroomsterkte in A.
- $\ell$  is de lengte van de stroomdraad die zich in het magnetisch veld bevindt, in m.

### Lorentzkracht op geladen deeltje

Op elk elektron dat beweegt in het magnetisch veld, werkt een lorentzkracht. De lorentzkracht op een stroomdraad is de lorentzkracht op  $n$  geladen deeltjes die in het magnetisch veld bewegen. De lorentzkracht op één geladen deeltje leid je af volgt af uit de lorentzkracht op de stroomdraad.

$$n \cdot F_{L,\text{deeltje}} = F_{L,\text{draad}}$$

$$n \cdot F_{L,\text{deeltje}} = B \cdot I \cdot \ell \quad \text{met } I = \frac{Q}{t}$$

$$n \cdot F_{L,\text{deeltje}} = B \cdot \frac{Q}{t} \cdot \ell \quad \text{met } Q = n \cdot q$$

$$n \cdot F_{L,\text{deeltje}} = B \cdot n \cdot q \cdot \frac{\ell}{t} \quad \text{met } \frac{\ell}{t} = v$$

$$n \cdot F_{L,\text{deeltje}} = n \cdot B \cdot q \cdot v \quad \text{wegdelen van } n$$

Voor de **lorentzkracht op een geladen deeltje** geldt dus:

$$F_L = B \cdot q \cdot v \quad \text{mits } \vec{B} \perp \vec{v}$$

- $F_L$  is de lorentzkracht in N.
- $q$  is de lading van het deeltje in C.
- $v$  is de snelheid in m/s.

### Lorentzkracht als middelpuntzoekende kracht

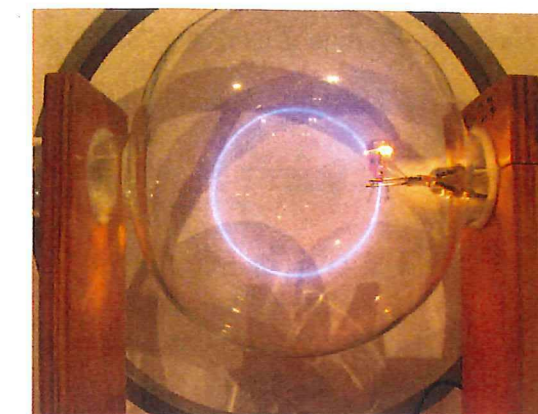
Figuur 10.48 is een toestel waarmee je het afbuigen van elektronen in een magnetisch veld laat zien. Tussen twee platte spoelen bevindt zich een glazen bol, gevuld met een kleine hoeveelheid waterstofgas. Als er een stroom door de spoelen loopt, ontstaat er een homogeen magnetisch veld tussen de spoelen. In figuur 10.48 is het veld tussen de spoelen 'van je af' gericht.

In de bol zit een apparaat dat elektronen recht omlaag wegschiet. Zodra de elektronen het apparaat verlaten, zorgt de lorentzkracht voor een afbuiging naar links. Staat op elk punt van de baan de lorentzkracht loodrecht op de baan, dan is de baan cirkelvormig. Zie figuur 10.49.

De baan is zichtbaar omdat elektronen het waterstofgas laten oplichten op de plaatsen waar ze botsen met waterstofmoleculen. Worden de elektronen een klein beetje schuin weggeschoten, dan ontstaat er een spiraalvormige baan.



Figuur 10.48



Figuur 10.49

Het **noorderlicht** ontstaat op eenzelfde manier als in het toestel hierboven. Geladen deeltjes van de zon komen richting de aarde. Zonder het magnetisch veld van de aarde zouden de deeltjes recht door onze atmosfeer gaan. Doordat het magnetisch veld van de aarde de deeltjes een gebogen baan geeft, komen de deeltjes in een spiraalbaan terecht. Doordat ze veel rondjes in de atmosfeer afleggen, botsen ze vaak op de moleculen van de lucht. Deze moleculen zenden daarbij licht uit.

#### Voorbeeld

De diameter van de blauwe cirkel in figuur 10.49 is 8,0 cm. De elektronen bewegen tegen de wijzers van de klok in.

- Leg uit wat de richting van de magnetische inductie is. De elektronen hebben een snelheid van  $2,0 \cdot 10^7$  m/s.
- Bereken de magnetische inductie.

#### Uitwerking

- De richting van de magnetische inductie leid je af met behulp van de FBI-regel in het hoogste punt van de cirkelbaan. De richting van de stroom  $I$  is daar naar links gericht omdat de elektronen in het hoogste punt naar rechts bewegen. De lorentzkracht is de middelpuntzoekende kracht en is altijd gericht naar het middelpunt van de cirkelbaan. De lorentzkracht is dus in het hoogste punt gericht naar de onderkant van het papier. Uit de FBI-regel volgt dat de richting van de magnetische inductie het papier in is.

b De lorentzkracht is gelijk aan de middelpuntzoekende kracht.

$$F_L = F_{mpz}$$

$$B \cdot q \cdot v = \frac{m \cdot v^2}{r}$$

$$q = 1,602 \cdot 10^{-19} \quad \text{Zie Binas tabel 7A}$$

$$m = 9,109 \cdot 10^{-31} \quad \text{Zie Binas tabel 7B}$$

$$r = \frac{1}{2} d = 4,0 \text{ cm} = 4,0 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

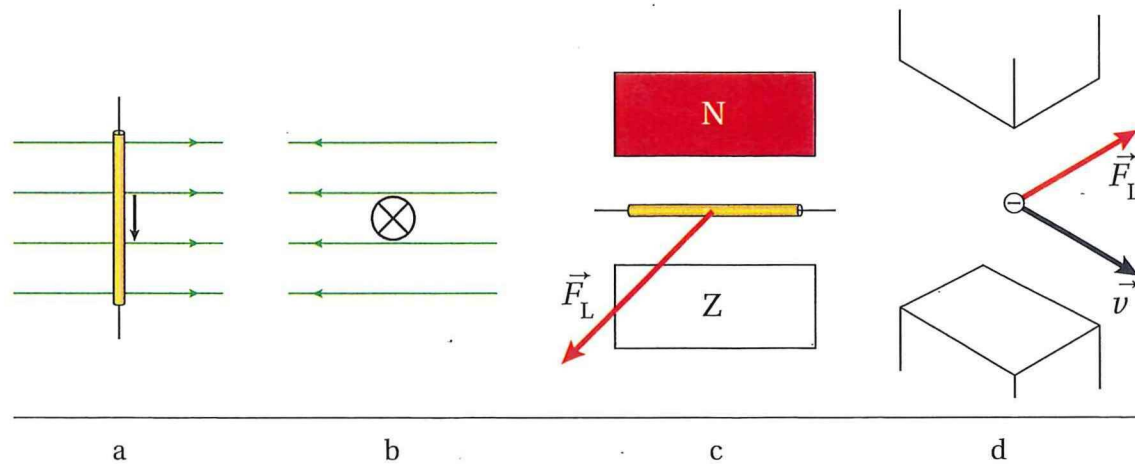
$$B \times 1,602 \cdot 10^{-19} \times 2,0 \cdot 10^7 = \frac{9,109 \cdot 10^{-31} \times (2,0 \cdot 10^7)^2}{4,0 \cdot 10^{-2}}$$

$$B = 2,84 \cdot 10^{-3} \text{ T}$$

$$\text{Afgerond: } B = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ T}$$

### Opgaven

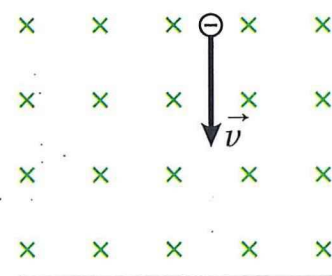
► **werkblad** 16 In figuur 10.50 zie je vier verschillende situaties waarin een lorentzkracht optreedt. Bepaal voor elke situatie de richting van de ontbrekende grootte  $\vec{F}_L$ ,  $\vec{B}$  of  $I$ .



Figuur 10.50

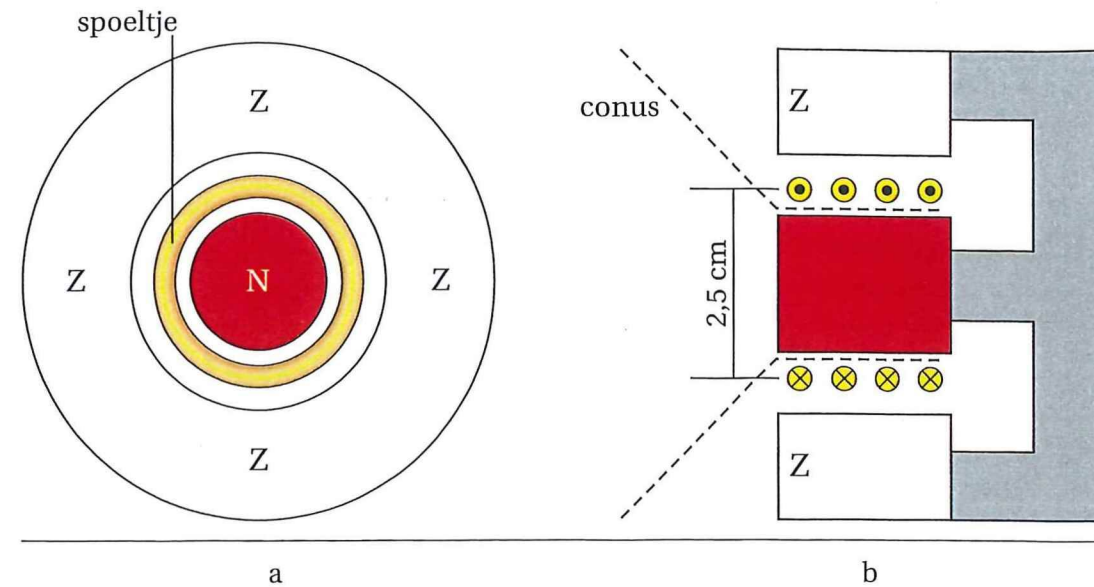
17 Een elektron komt met een snelheid van  $2,3 \cdot 10^7 \text{ m/s}$  een homogeen magnetisch veld binnen. De magnetische inductie bedraagt  $6,8 \cdot 10^{-3} \text{ T}$ .

- Bepaal voor de situatie in figuur 10.51 welke richting de lorentzkracht heeft.
- Bereken hoeveel maal de lorentzkracht groter is dan de zwaartekracht op het elektron.



Figuur 10.51

18 Een luidspreker bestaat onder andere uit een trechtvormige conus, een spoeltje en een permanente magneet. Zie ook de dwarsdoorsneden van figuur 52. Het spoeltje bevindt zich om de noordpool van de magneet. De hele ringvormige rand van de magneet vormt de zuidpool. De conus zit aan het spoeltje vast; ze zijn samen beweegbaar. Zodra er een stroom door het spoeltje loopt, wordt op het spoeltje een kracht uitgeoefend.



Figuur 10.52

- Bepaal aan de hand van figuur 10.52b de richting van die kracht. De conus is bevestigd aan de koker waarheen het spoeltje is gewikkeld. De conus volgt dus de beweging van het spoeltje. Hierdoor is het mogelijk de conus (in hoog tempo) een heen en weer gaande beweging te laten uitvoeren.
- Hoe bereik je dat de conus zo'n beweging uitvoert? Het spoeltje heeft 40 windingen en een diameter van 2,5 cm. De magnetische inductie bij het spoeltje bedraagt 0,35 T.
- Bereken de kracht die op het spoeltje wordt uitgeoefend als er door het spoeltje een stroom van 50 mA loopt.

► **werkblad** 19 Een positief geladen deeltje komt met een snelheid  $v$  een homogeen magnetisch veld binnen, waarbij die snelheid loodrecht op de veldlijnen staat. Het groene vlak in figuur 10.53 stelt een gedeelte van dat magnetische veld voor; cirkelboog ABC stelt de baan voor die het deeltje doorloopt.

► **hulpblad**

- Geef in figuur 10.53 met een pijl van 3,0 cm aan hoe de lorentzkracht op het deeltje is gericht als het deeltje zich in B bevindt.
- Bepaal de richting van het magnetisch veld.
- Leg uit waarom tijdens de beweging van het deeltje van A naar C de lorentzkracht geen arbeid heeft verricht.

Doordat de lorentzkracht geen arbeid verricht, verandert de kinetische energie van het deeltje niet.

- Leg uit waarom het deeltje een eenparige cirkelbeweging uitvoert.

Voor de straal van de cirkelbaan die een geladen deeltje in een magnetisch veld doorloopt geldt:

$$r = \frac{m \cdot v}{B \cdot q}$$

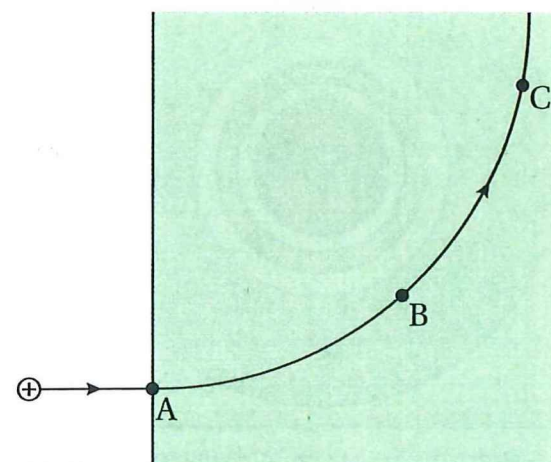
- $m$  is de massa van het deeltje.
- $q$  is de lading.
- $B$  is de magnetische inductie.
- $v$  de snelheid waarbij  $\vec{v} \perp \vec{B}$ .

De lorentzkracht treedt hier op als middelpuntzoekende kracht.

e Leid af dat  $r = \frac{m \cdot v}{B \cdot q}$ .

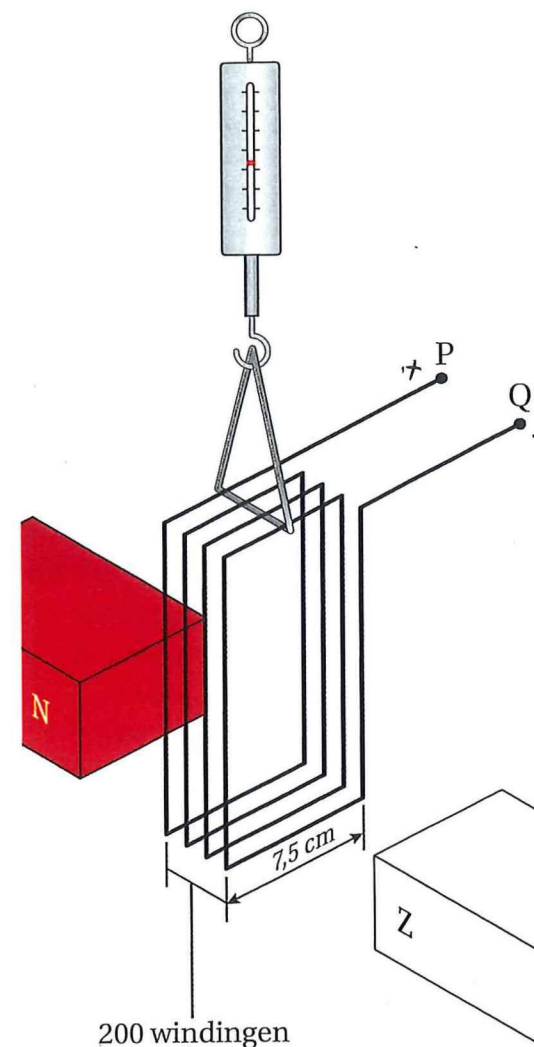
Je wilt een  $\text{He}^{2+}$ -kern even sterk afbuigen als een proton.

f Leg uit of je daar een even sterke, sterkere of zwakkere magnetische inductie voor nodig hebt.

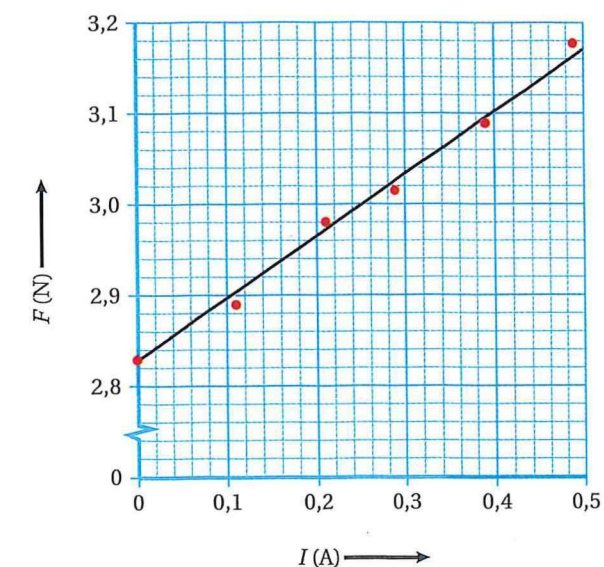


Figuur 10.53

- **hulpblad** 20 Dominique wil met behulp van de lorentzkracht op een stroomgeleider de magnetische inductie van een homogeen magnetisch veld bepalen. Ze hangt daartoe een rechthoekige spoel met 200 windingen aan een krachtmeter. Ze zorgt ervoor dat het onderste gedeelte van de spoel zich in het homogene magnetisch veld bevindt en dat de windingen ervan loodrecht op de veldlijnen staan. Zie figuur 10.54. Het onderste horizontale gedeelte van één zo'n winding heeft een lengte van 7,5 cm. Vervolgens sluit zij de spoel, in serie met een regelbare weerstand en een stroommeter, op een gelijkspanningsbron aan. Zij varieert de stroomsterkte en leest telkens de aanwijzing van de krachtmeter af. Van haar metingen maakt zij een diagram waarin de aanwijzing van de krachtmeter is uitgezet tegen de stroomsterkte. De grafiek blijkt een rechte te zijn. Zie figuur 10.55.
- a Welk aansluitpunt van de spoel (P of Q) heeft Dominique met de pluspool van de spanningsbron verbonden? Licht je antwoord toe.
  - b Leg uit waarom de rechte in het diagram niet door de oorsprong gaat.
  - c Toon aan dat die steilheid van de grafieklijn gelijk is aan  $N \cdot B \cdot \ell$ . Hierin is  $N$  het aantal windingen van de spoel.
  - d Bepaal de magnetische inductie met behulp van de steilheid van de grafieklijn.

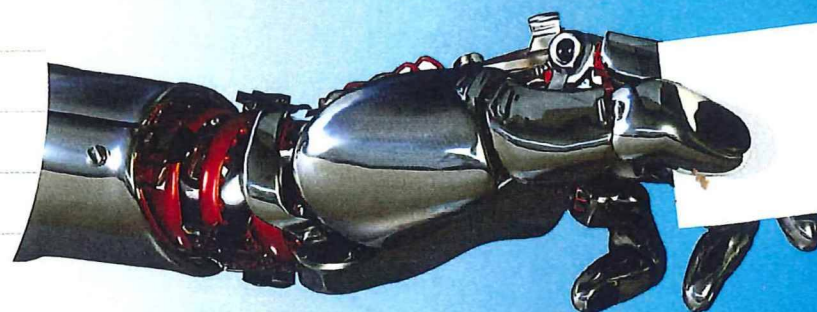


Figuur 10.54



Figuur 10.55

Een handprothese kan allerlei complexe bewegingen uitvoeren. Deze bewegingen zijn mogelijk door elektromotoren. Hoe werkt een elektromotor?



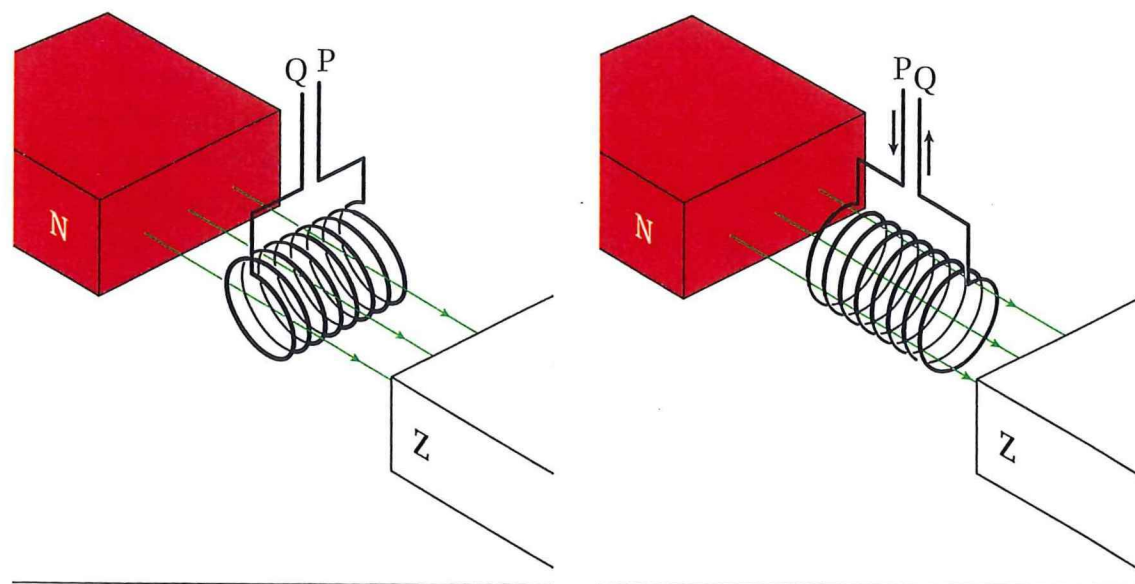
Figuur 10.56

## 10.5 Elektromotor

### Kracht op een spoel

Een elektromagneet ontstaat als er stroom loopt door een spoel. De spoel heeft dan een noordpool en een zuidpool. In een tweede magnetische veld ondervindt de elektromagneet een kracht. Door deze kracht handig te gebruiken, maak je een elektromotor. Elektromotoren drijven treinen en metro's aan, laten dvd's draaien en je telefoon trillen.

In figuur 10.57a zie je een schematische weergave van een spoel in een magnetisch veld.



Figuur 10.57

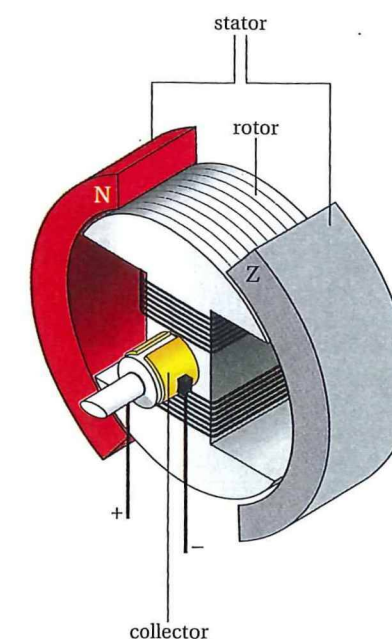
a

b

Wanneer een stroom van P naar Q door de spoel loopt, wordt de linkerkant van de spoel een noordpool. Dit leid je af met de rechterhandregel. De noordpool van de spoel wordt door de zuidpool van de permanente magneet aangetrokken. De spoel draait en beweegt heen en weer om de stand getekend in figuur 10.57b. Als de spoel tot stilstand is gekomen, bevindt zich de noordpool van de elektromagneet tegenover de zuidpool van de permanente magneet. Gebruik je weer de rechterhandregel, dan zie je dat het veld in de spoel dezelfde richting heeft als het veld van de permanente magneten.

### Werking elektromotor

Ook een **elektromotor** bevat een spoel in een magnetisch veld. Is de elektromotor ingeschakeld, dan blijft de spoel steeds in dezelfde richting ronddraaien. Daarvoor is een **collector** nodig. Zie figuur 10.58. Behalve de collector zijn ook de **rotor** en de **stator** aangegeven. De rotor is het gedeelte van de motor dat draait, dus de spoel. De stator is het deel dat blijft stilstaan, dus de uitwendige magneten. De collector draait de stroomrichting om wanneer het veld van de spoel dezelfde richting heeft als het veld van de uitwendige magneten.



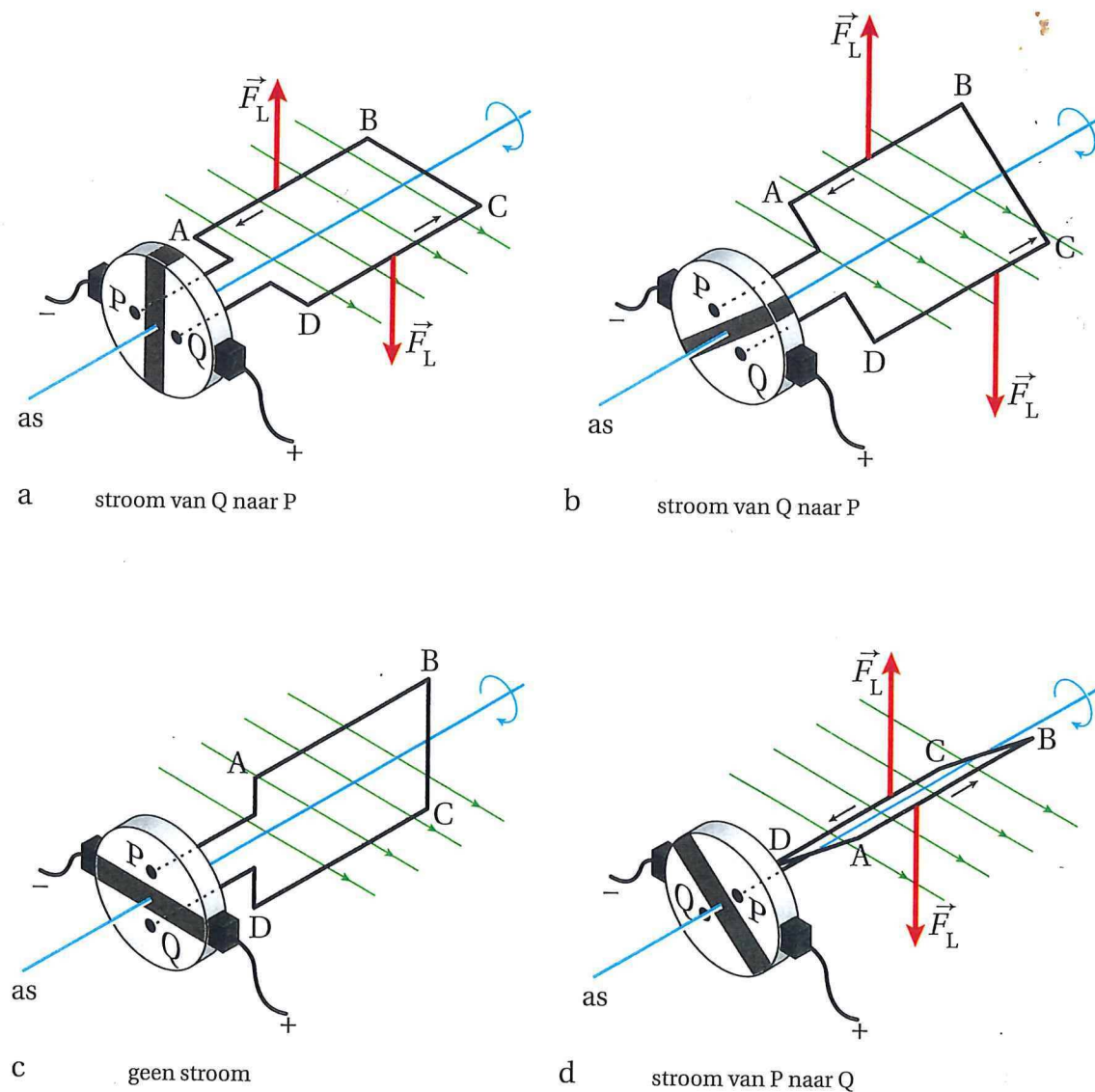
Figuur 10.58

In figuur 10.59 zie je waarom de spoel van een elektromotor blijft draaien als de stroom is ingeschakeld. Voor een goed overzicht zijn in figuur 10.59 de externe magneten weggelaten en is slechts één winding van de spoel getekend. De collector bestaat uit twee metalen halve schijven, gescheiden door isolatiemateriaal. In figuur 10.59a zie je dat de winding is aangesloten op de collector in de punten P en Q. De collector maakt door middel van twee koolborstels contact met de plus- en de minpool van de spanningsbron. Koolborstels geleiden elektriciteit en slepen langs de draaiende collector.

In de situatie van figuur 10.59a loopt de stroom van Q naar P. Op de zijde AB en zijde CD werkt dan een lorentzkracht. De lorentzkracht op AB is even groot als de lorentzkracht op CD maar tegengesteld gericht. Daarom gaat de winding draaien. Deze draaiing gaat door totdat de winding verticaal staat, zoals in figuur 10.59c. Op dat moment maakt de collector geen contact meer met de spanningsbron: de isolerende laag tussen P en Q geleidt geen stroom. De situatie in figuur 10.59c is het dode punt van een elektromotor. Doordat de winding een draaisnelheid heeft, staat hij niet meteen stil, maar draait nog een stukje verder.



Zodra het dode punt gepasseerd is, maakt P contact met de pluspool van de spanningsbron en Q met de minpool, zoals in figuur 10.59d. De stroom loopt nu andersom: van P naar Q. Daardoor zijn de lorentzkrachten op AB en CD omgekeerd van richting en de winding draait verder. Staat de winding weer verticaal, dan verandert de stroom weer van richting, zodat de draaiing doorgaat.

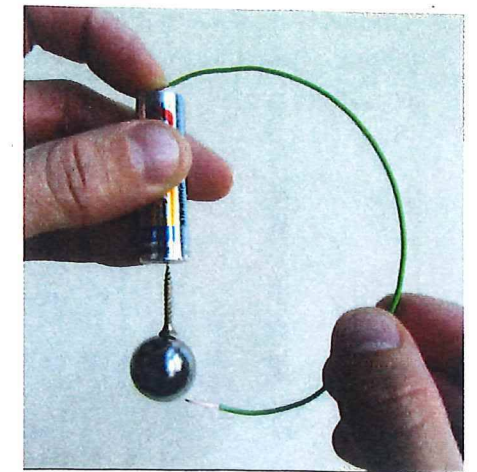


Figuur 10.59

### Opgaven

- 21 In figuur 10.59 loopt er ook stroom door de zijde BC. Deze zijde bevindt zich ook in het uitwendige magnetische veld.
- Leg uit in welke van de figuren 10.59abcd er geen lorentzkracht op zijde BC werkt. Werkt er wel een lorentzkracht op zijde BC, dan is deze even groot en tegengesteld gericht aan de lorentzkracht in zijde AD.
  - Leg dit uit.

- **hulpblad** 22 In figuur 10.60 zie je een primitieve elektromotor. Een bolvormige magneet is via een schroef met de onderkant van een batterij verbonden. Via een snoetje loopt er stroom van de bovenkant van de batterij via de zijkant van de magneet naar de bovenkant van de magneet. De voorzijde van de magneet draait in figuur 10.60 naar rechts.

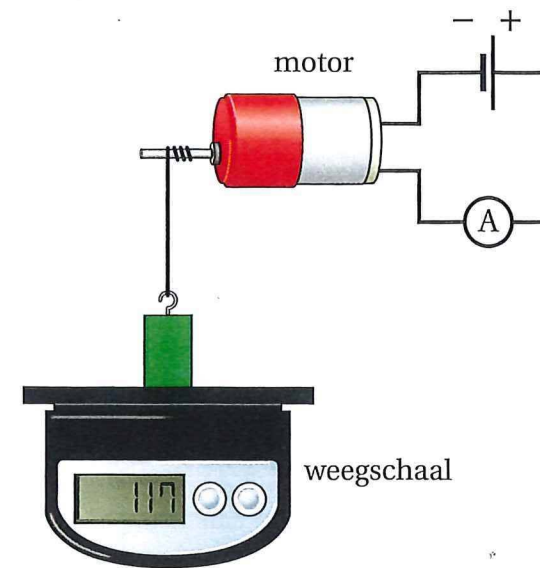


Figuur 10.60

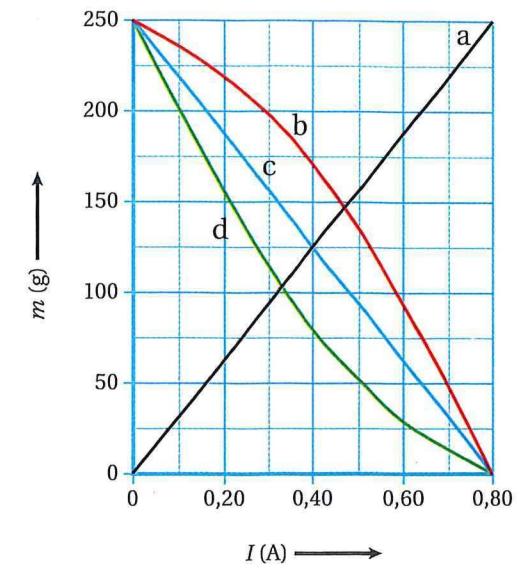
- Bevindt de noordpool van de magneet zich aan de bovenkant of aan de onderkant van de bol? Licht je antwoord toe.
- Noem twee manieren om de draairichting van deze elektromotor om te draaien.

- 23 Demi doet onderzoek naar een elektromotor. Ze maakt de opstelling van figuur 10.61. Een blok van 250 g is verbonden met de draai-as van de elektromotor. Demi laat de stroomsterkte in stappen toenemen en leest telkens de waarde af die de weegschaal aangeeft. Bij een stroomsterkte van 0,80 A komt het blok los van de weegschaal. Van haar meetwaarden maakt Demi een  $(m, I)$ -diagram.

- Leg uit welke  $(m, I)$ -grafiek uit figuur 10.62 overeenkomt met haar meting.
- Leg van de overige grafieken uit waarom die niet kloppen.



Figuur 10.61

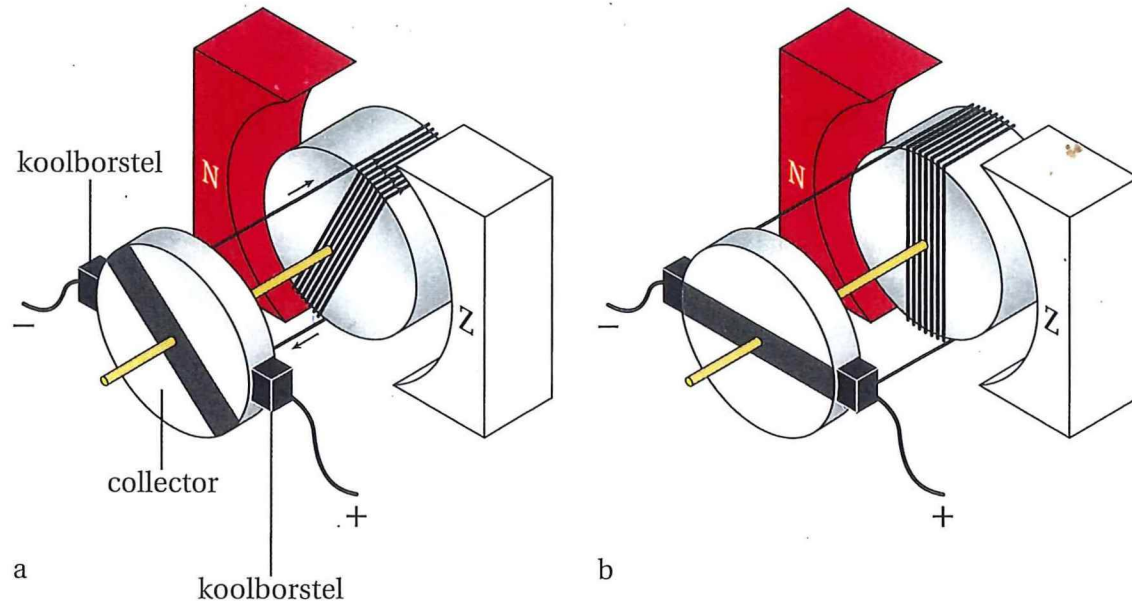


Figuur 10.62

- 24 Figuur 10.63a is een schematische weergave van een elektromotor.
- Bepaal de draairichting van de motor-as. In een huisinstallatie staat een wisselspanning op de aansluitpunten van een stopcontact. Dit betekent dat de aansluitpunten afwisselend veranderen van pluspool in minpool en andersom.
  - Werkt de motor van figuur 10.63a ook als je hem op een wisselspanningsbron aansluit? Licht je antwoord toe.

Schakel je de stroom uit, dan kan de spoel tot stilstand komen in de stand van figuur 10.63b. Als je daarna de stroom opnieuw inschakelt, gaat de motor-as niet draaien.

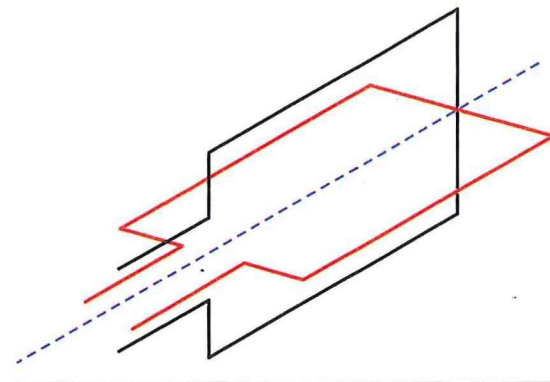
c Leg dit uit.



Figuur 10.63

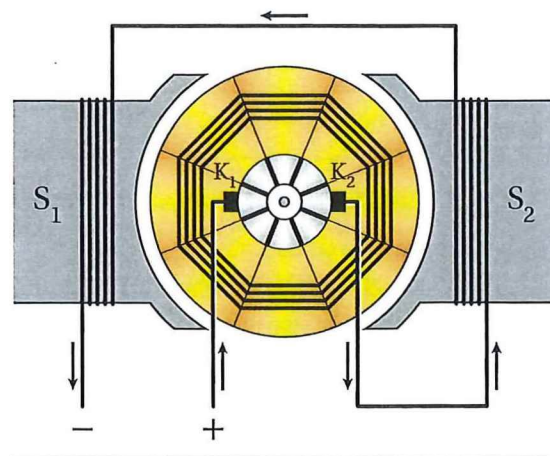
Dit probleem voorkom je als je twee spoelen om de cilinder wikkelt die loodrecht op elkaar staan. In figuur 10.64 is dat voor twee windingen getekend. De collector moet je dan aanpassen.

- d Beschrijf en/of schets hoe de aangepaste collector eruitziet.
- e Leg uit waarom de motor-as nu altijd zal gaan draaien bij het inschakelen van de stroom.



Figuur 10.64

- ▶ werkblad 25 In een seriemotor zijn de permanente magneten vervangen door elektromagneten. Zie figuur 10.65. Bij een seriemotor gaat de stroom niet alleen door de spoelen die om de cilinder zijn gewikkeld, maar ook door de spoelen  $S_1$  en  $S_2$  die op de poolschoenen zijn aangebracht.  $K_1$  en  $K_2$  zijn de koolborstels.
- a Hoe kun je de draairichting van de as van een seriemotor omkeren?
- b Leg uit dat deze motor ook werkt als je hem op een wisselspanningsbron aansluit.



Figuur 10.65

Onderaan een stuwdam laat het stromende water de as van een dynamo draaien. De dynamo zet die beweging om in elektrische energie. Hoe wordt beweging omgezet in elektrische energie?



Figuur 10.66

## 10.6 Elektromagnetische inductie

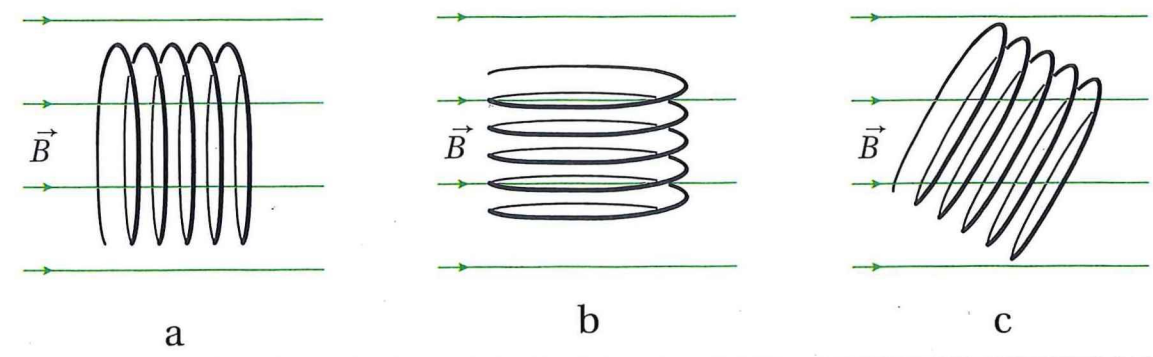
### Inductiespanning

Een elektromotor zet elektriciteit om in beweging. Het omgekeerde kan ook: als je aan de as van een elektromotor draait, komt een spanning op de aansluitpunten van de elektromotor te staan. Met behulp van een spoel en een magneet wek je een elektrische spanning op. Die spanning heet **inductiespanning**.

In een turbine onderaan een stuwdam zit een schoepenrad. Het water laat de schoepen draaien waardoor de as van een dynamo draait.

### Flux

Om te begrijpen hoe een magneet een spanning kan opwekken in een spoel, heb je het begrip **flux** nodig. De flux is een maat voor het aantal veldlijnen dat door de windingen van de spoel heen gaat. De eenheid van flux is weber met symbool Wb.



Figuur 10.67

In figuur 10.67a zie je een spoel. De spoel bevindt zich in een homogeen magnetisch veld. De veldlijnen van het magnetisch veld wijzen door de windingen van de spoel. De flux is in dit geval maximaal.

In figuur 10.67b zie je dezelfde spoel, maar dan 90° gedraaid. Geen enkele veldlijn gaat door de windingen van de spoel. De flux is nu gelijk aan 0 Wb.

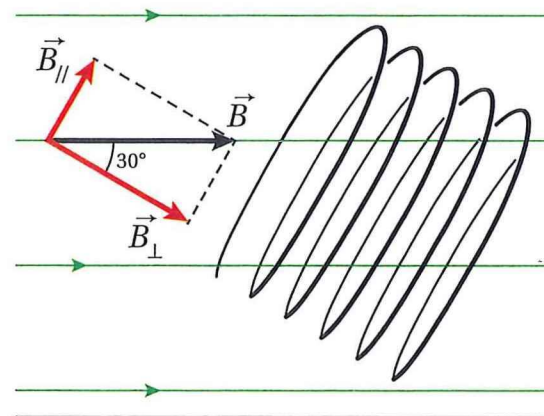
In figuur 10.67c is de spoel 30° gedraaid in vergelijking met figuur 10.67a. De veldlijnen gaan maar voor een deel door de windingen van de spoel. Dit is de component van de magnetische inductie loodrecht op de spoel. De flux is nu niet zo groot als in figuur 10.67a, maar wel groter dan 0 Wb.

De flux is gedefinieerd met de formule:

$$\Phi = B_{\perp} \cdot A$$

- $\Phi$  is de flux in Wb.
- $B_{\perp}$  is de component van de magnetische inductie die loodrecht op de windingen van de spoel staat, in T.
- $A$  is de oppervlakte van de windingen van de spoel in m<sup>2</sup>.

Staat de magnetische inductie niet loodrecht op de windingen van de spoel, dan ontbind je de magnetische inductie in een evenwijdige en een loodrechte component. In figuur 10.68 is dat gedaan voor de situatie van figuur 10.67c. Omdat de spoel over 30° is gedraaid ten opzichte van figuur 10.67a weet je dat de hoek tussen  $\vec{B}$  en  $\vec{B}_{\perp}$  gelijk is aan 30°.



Figuur 10.68

#### Voorbeeld

In figuur 10.68 is de magnetische inductie 3,0 mT. De binnendiameter van de spoel bedraagt 3,0 cm.

Bereken de flux door de spoel.

#### Uitwerking

De flux bereken je met de loodrechte component van de magnetische inductie en de oppervlakte van de windingen.

Voor de loodrechte component van de magnetische inductie geldt:

$$\cos(30^\circ) = \frac{B_{\perp}}{B}$$

$$B_{\perp} = B \cdot \cos(30^\circ) = 3,0 \cdot 10^{-3} \times 0,866 = 2,598 \cdot 10^{-3} \text{ T}$$

De oppervlakte van de windingen van de spoel is cirkelvormig:

$$A = \pi r^2 = \frac{1}{4} \pi d^2$$

$$A = \frac{1}{4} \times 3,1415 \times (3,0 \cdot 10^{-2})^2$$

$$A = 7,068 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

De flux door de spoel is dan gelijk aan:

$$\Phi = B_{\perp} \cdot A$$

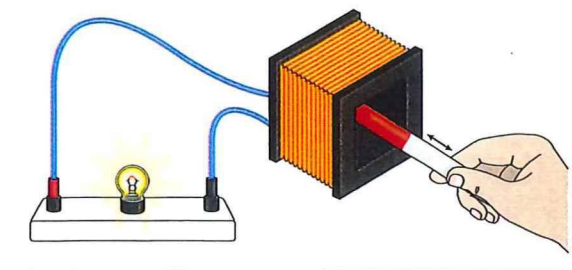
$$\Phi = 2,598 \cdot 10^{-3} \times 7,068 \cdot 10^{-4}$$

$$\Phi = 1,836 \cdot 10^{-6} \text{ Wb}$$

$$\text{Afgerond: } \Phi = 1,8 \cdot 10^{-6} \text{ Wb}$$

## Fluxverandering

In figuur 10.69 zie je een opstelling waarmee je inductiespanning kunt onderzoeken. Beweeg je de magneet heen en weer, dan ontstaat over de aansluitpunten van het lampje een spanning. De spanning ontstaat als je de flux door de windingen van de spoel verandert.



Figuur 10.69

Het lampje brandt feller als de spoel meer windingen heeft. Er zijn dan meer windingen waarin de flux verandert en dus is de **inductiespanning** groter. De inductiespanning is recht evenredig met het aantal windingen in de spoel.

$$U_{\text{ind}} \propto N$$

- $U_{\text{ind}}$  is de inductiespanning in V.
- $N$  is het aantal windingen van de spoel.

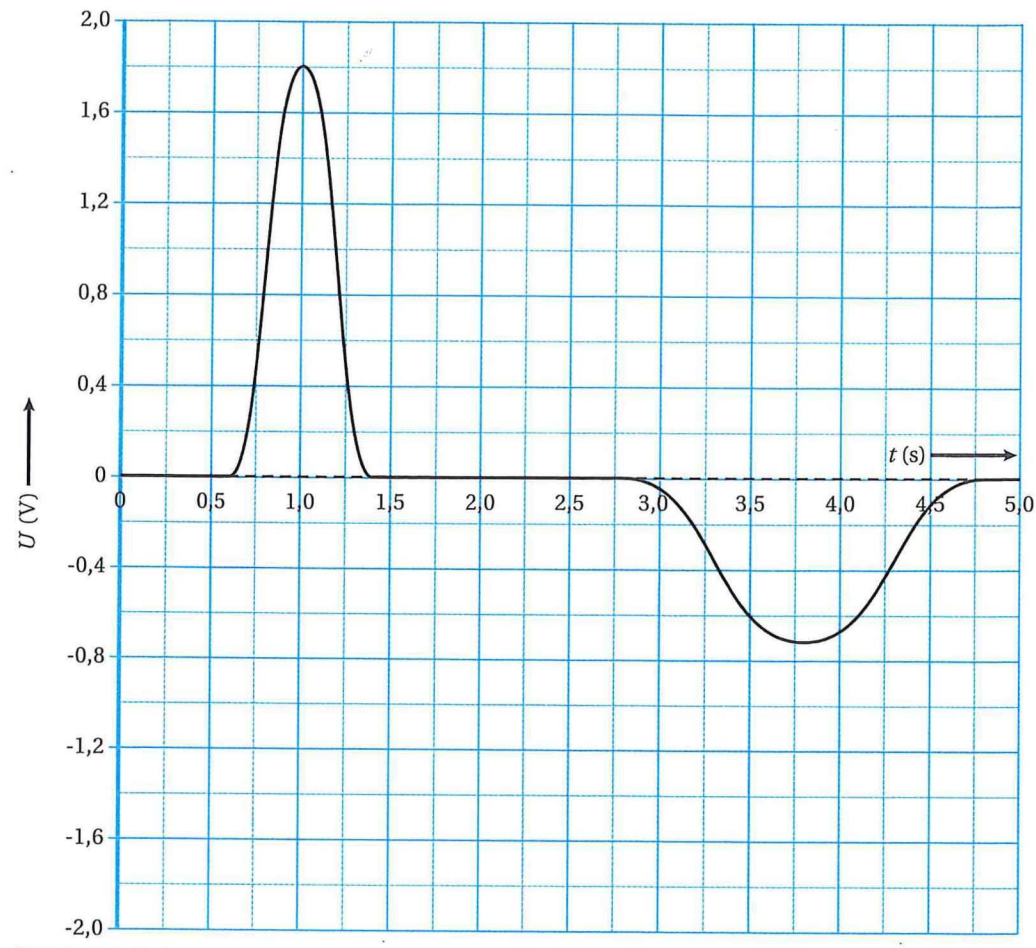
Ook als je de magneet sneller heen en weer beweegt, gaat het lampje feller branden. De flux verandert dan in een kortere tijd. Ook de fluxverandering per tijdseenheid is recht evenredig met de **inductiespanning**.

$$U_{\text{ind}} \propto \frac{d\Phi}{dt}$$

- $U_{\text{ind}}$  is de inductiespanning in V.
- $\frac{d\Phi}{dt}$  is de fluxverandering in Wb/s.

### (Spanning, tijd)-diagram

Tijdens het bewegen van de staaf brandt het lampje niet even fel. Houd je de staaf stil in de spoel, dan brandt het lampje helemaal niet. Wil je de inductiespanning als functie van de tijd onderzoeken, dan vervang je in figuur 10.69 het lampje door een aansluiting op een computer. Je beweegt eerst de magneet naar de spoel toe, houdt de magneet even stil en beweegt vervolgens de magneet van de spoel af. In figuur 10.70 staat het schermbeeld van deze proef.

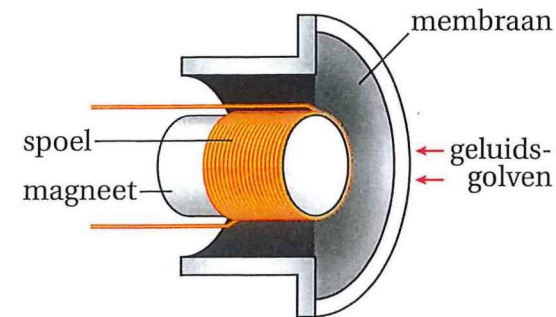


Figuur 10.70

Beweeg je de staaf niet, dan is er geen fluxverandering. Dus is de inductiespanning 0 V. Een toename van de flux geeft een positieve spanning; een afname van de flux geeft een negatieve spanning. Dit heeft te maken met de richting waarin de stroom loopt. Je ziet dat de oppervlakten van de twee pieken gelijk zijn. Beweeg je de magneet langzamer, dan is er gedurende langere tijd een inductiespanning maar de maximale waarde is kleiner.

### Microfoon

Een microfoon zet geluid om in een inductiespanning. Figuur 10.71 toont een doorsnede van een microfoon. Een geluidsgolf laat het membraan aan de voorzijde van de microfoon trillen. Aan dit membraan is een erg lichte spoel bevestigd. De spoel kan vrij over een permanente magneet heen en weer bewegen.



Figuur 10.71

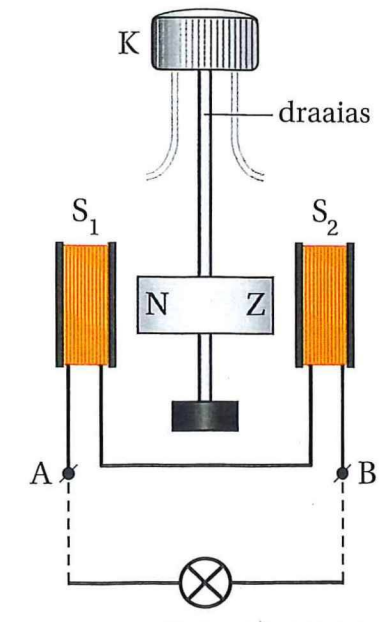
Wanneer het membraan beweegt, dan verandert de magnetische flux door de spoel. Het gevolg is dat er een inductiespanning ontstaat. Die inductiespanning komt overeen met het originele geluidssignaal en draagt alle muzikale informatie van het geluid.

### Dynamo

In een fietsdynamo bevindt zich een magneet tussen twee spoelen. Zie figuur 10.72. Als de magneet draait, dan verandert de flux door de spoelen en ontstaat er een inductiespanning over de aansluitpunten A en B van de spoel. Een lampje aangesloten op A en B brandt dan.

#### Opmerking

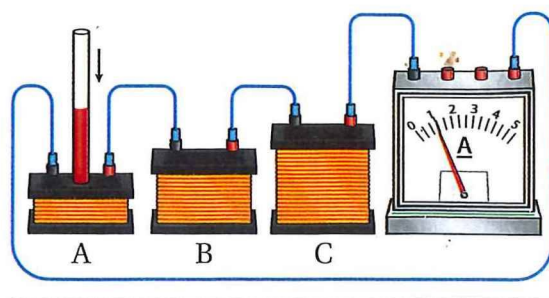
Bij een microfoon beweegt een spoel in een magnetisch veld. Bij een dynamo beweegt een magneet tussen twee spoelen. In beide gevallen verandert de magnetische flux door de windingen van een spoel en ontstaat er een inductiespanning.



Figuur 10.72

## Opgaven

- 26 Marlou heeft drie spoelen in serie geschakeld met een stroommeter. Zie figuur 10.73. Ze beweegt een magneet achtereenvolgens in spoel A, spoel B en spoel C. In tabel 10.1 staat bij elke spoel het aantal windingen en de maximale stroomsterkte die ze heeft gemeten.



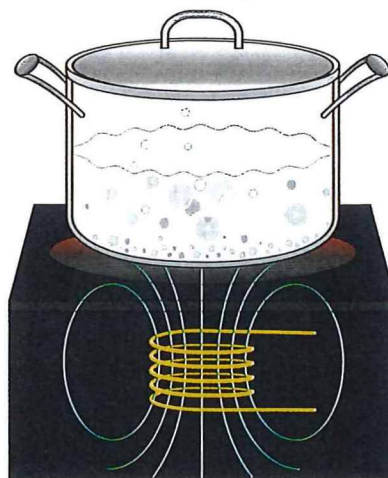
Figuur 10.73

spoel	maximale stroomsterkte (mA)	aantal windingen
A	1,4	1000
B	2,8	2000
C	5,3	3000

Tabel 10.1

- a Waarom zijn de drie spoelen in serie aangesloten op de stroommeter? Marlou heeft de proef niet goed uitgevoerd. Zij heeft de magneet bij spoel C niet met dezelfde gemiddelde snelheid heen en weer bewogen als bij de spoelen A en B.
- b Welke stroomsterkte verwacht je bij spoel C? Licht je antwoord toe.
- c Was de gemiddelde snelheid bij spoel C groter of kleiner dan bij spoelen A en B? Licht je antwoord toe.
- Marlou wil een grotere stroomsterkte opwekken.
- d Noem twee aanpassingen die ze kan doen om de stroomsterkte te vergroten.

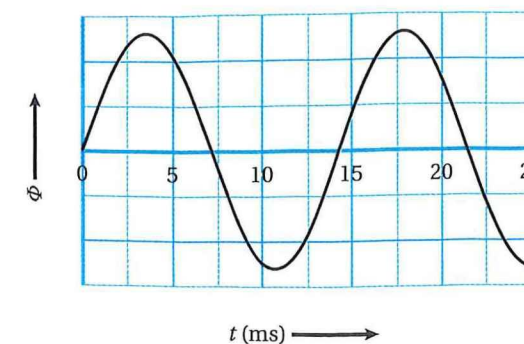
- 27 In figuur 10.74 zie je een pan met kokend water op een inductiekookplaat. Door de spoel loopt een wisselstroom. Er ontstaat een inductiestroom in de bodem van de pan waardoor de bodem van de pan heet wordt.



Figuur 10.74

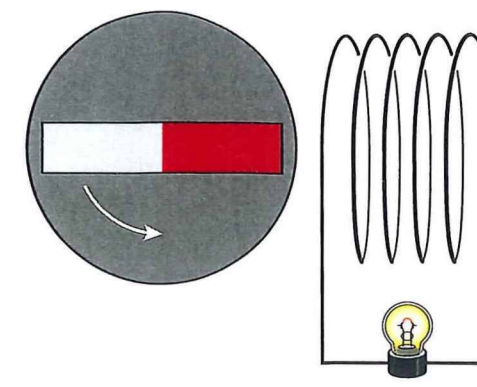
- a Leg uit dat er een wisselend magnetisch veld wordt opgewekt door de spoel.
- b Leg uit dat een inductiestroom door de bodem van de pan gaat lopen.
- c Leg uit waarom inductiekoken niet mogelijk is met gelijkstroom.

- 28 In figuur 10.75 staat het verloop van de flux door de spoel van een dynamo.
- a Leg uit dat de inductiespanning 0 V is als de flux maximaal is.
- b Leg uit dat de inductiespanning maximaal is als de flux gelijk is aan 0 Wb.



Figuur 10.75

- 29 Arjen plaatst een magneet op een draaiende schijf. Naast de schijf plaatst hij een spoel waar hij een lampje op aansluit. Zie figuur 10.76. De schijf heeft een omlooptijd van 0,40 s. Arjen ziet dat het lampje knippert met een vaste frequentie.



Figuur 10.76

- a Bereken de frequentie waarmee het lampje knippert.
- Arjen wil het lampje zo fel mogelijk laten branden. Hij bedenkt de volgende vier verbanden tussen de inductiespanning  $U_{\text{ind}}$ , de omlooptijd  $T$ , de magnetische inductie van de magneet  $B$  en het aantal windingen van de spoel  $N$ .

A  $U_{\text{ind}} \propto B \cdot T \cdot N$

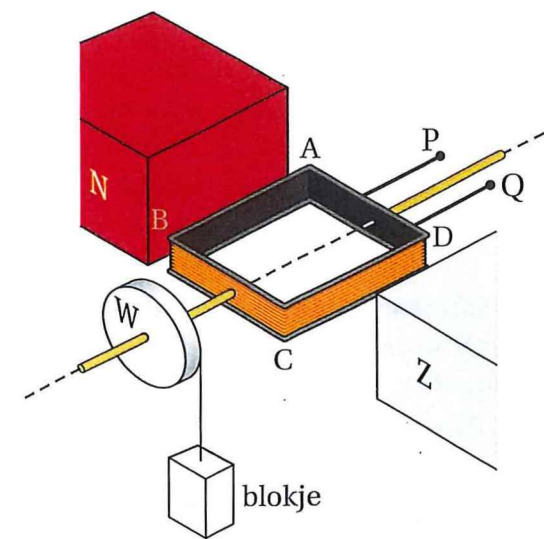
B  $U_{\text{ind}} \propto \frac{B \cdot N}{T}$

C  $U_{\text{ind}} \propto \frac{B \cdot T}{N}$

D  $U_{\text{ind}} \propto \frac{T \cdot N}{B}$

- b Leg uit welk verband juist is.

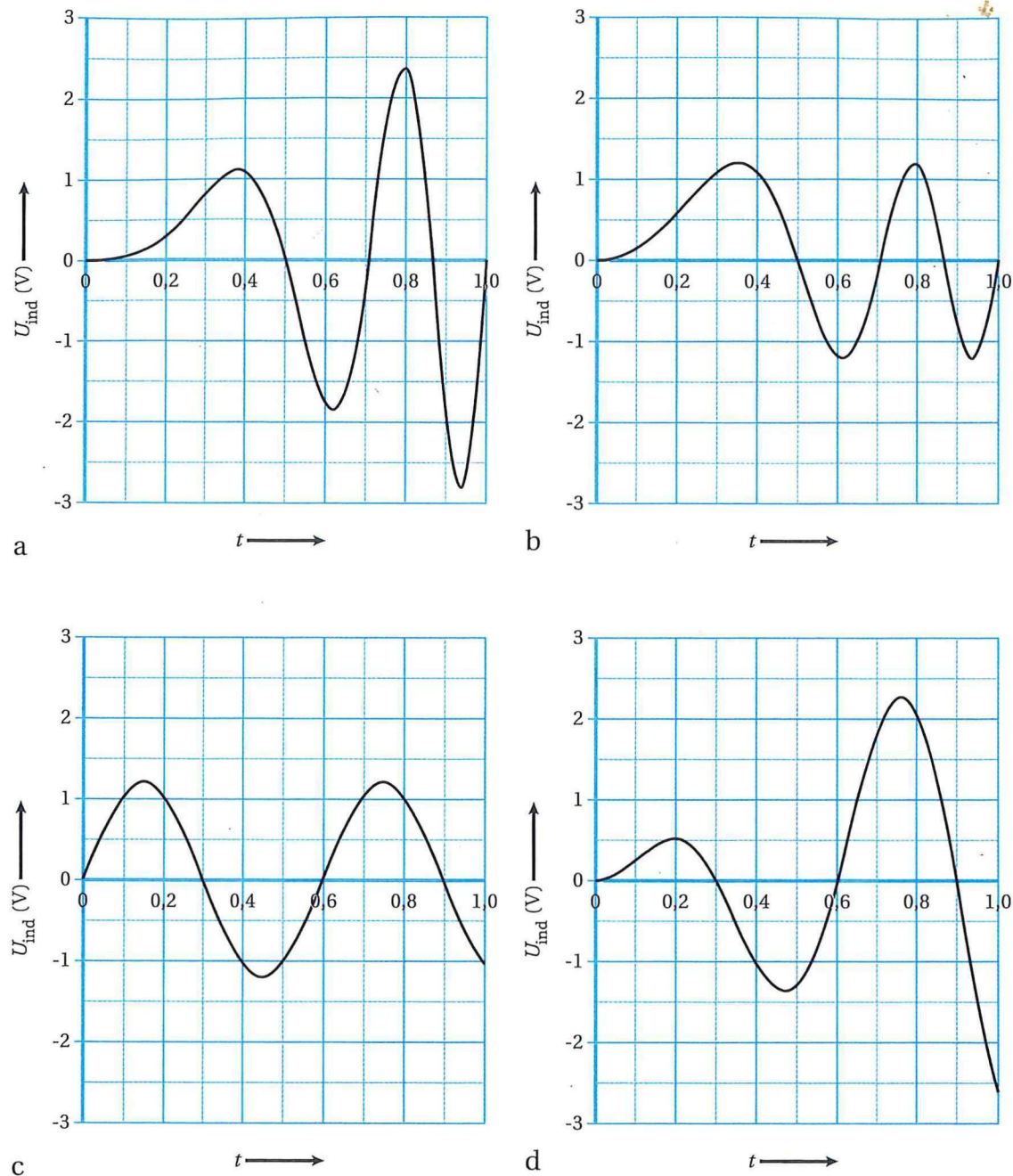
- **hulpblad** 30 In figuur 10.77 zie je een spoel die om een as kan draaien in een magnetisch veld. De magnetische inductie is 3,2 mT. Een blokje laat de as en de spoel draaien. Op  $t = 0,0$  s wordt het blokje losgelaten en staat de spoel in de stand van figuur 10.76. Op  $t = 0,4$  s is de spoel  $30^\circ$  gedraaid. De oppervlakte van de spoel is  $8,0 \text{ cm}^2$ .



Figuur 10.77

- a Bereken de flux door de spoel op  $t = 0,0$  s.
- b Bereken de flux door de spoel op  $t = 0,4$  s.
- c Leg uit dat de grootte van de inductiespanning over de spoel een wisselspanning is.

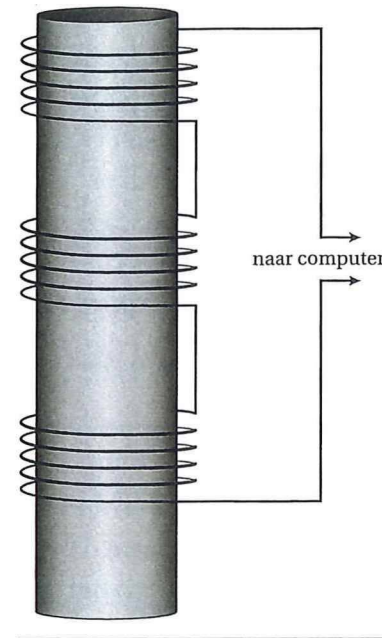
In figuur 10.77 zie je vier mogelijke (inductiespanning, tijd)-diagrammen.  
 d Leg uit welk diagram overeenkomt met dit experiment.



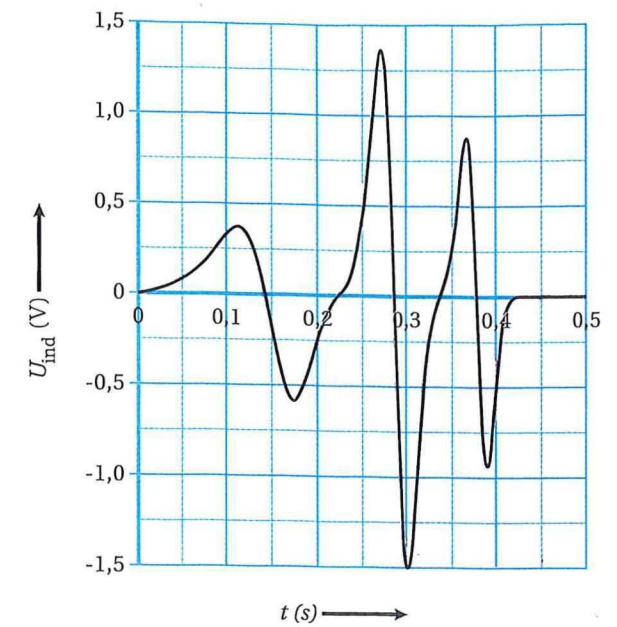
Figuur 10.78

- **hulpblad** 31 René laat een magneet door een buis vallen. Om de buis zijn drie spoelen geplaatst die in serie zijn geschakeld. Zie figuur 10.79. Met behulp van een computer meet René de totale spanning die de spoelen afgeven.  
 In figuur 10.80 staat het (inductiespanning, tijd)-diagram dat René heeft gekregen. Op  $t = 0,143$  s bevindt de magneet zich midden in de eerste spoel. Op dat moment is de inductiespanning gelijk aan nul.

a Leg uit dat de inductiespanning gelijk is aan nul als de magneet zich midden in een spoel bevindt.

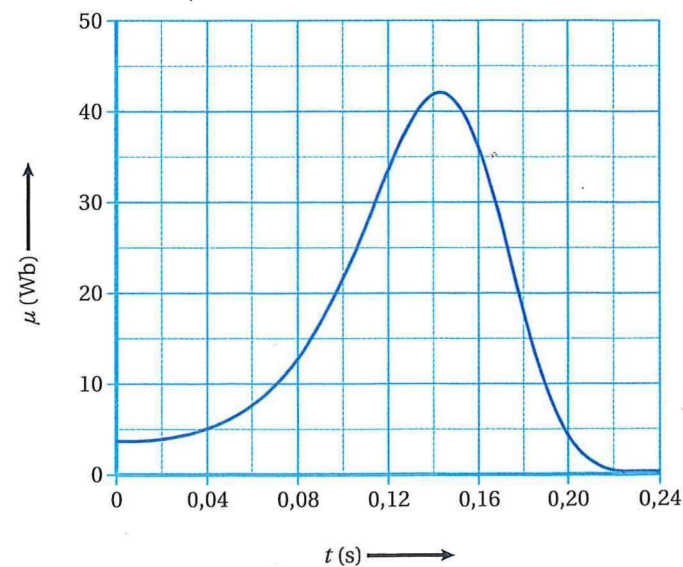


Figuur 10.79



Figuur 10.80

- Op  $t = 0,0$  s heeft René de magneet losgelaten. De magneet maakt een vrije val. Voor de snelheid op elk tijdstip geldt:  $v = g \cdot t$ . De maximale inductiespanning is recht-evenredig met de snelheid van de magneet.  
 De tweede spoel bevat 600 windingen.  
 b Bepaal het aantal windingen van de eerste en van de derde spoel.  
 De inductiespanning op  $t = 0,11$  s is kleiner dan de inductiespanning op  $t = 0,17$  s. De grootte van de flux door de eerste spoel als functie van de tijd zie je in figuur 10.81.  
 c Leg uit dat uit figuur 10.81 blijkt dat de inductiespanning op  $t = 0,11$  s kleiner is dan de inductiespanning op  $t = 0,17$  s.



Figuur 10.81

## 10.7 Afsluiting

### Samenvatting

Een elektrisch veld is de omgeving van een lading waarin een geladen deeltje een elektrische kracht ondervindt. Het elektrisch veld tussen twee condensatorplaten is homogeen. Een losse lading en een geladen bol hebben een radiaal elektrisch veld.

Een elektrisch veld geef je weer met veldlijnen. Dit zijn denkbeeldige lijnen waarlangs een proeflading beweegt als het losgelaten wordt in het veld.

De richting van de kracht op een positief deeltje komt overeen met de raaklijn aan de veldlijn. De grootte van de elektrische kracht is evenredig met de lading van dat deeltje en met de sterkte van het elektrisch veld.

Voor puntvormige ladingen kun je de kracht ook berekenen met de wet van Coulomb.

Wanneer een geladen deeltje in een elektrisch veld van het ene punt naar een ander punt beweegt, veranderen de elektrische energie en de kinetische energie van dat deeltje. De verandering van de elektrische energie hangt af van de lading van het bewegende deeltje en de elektrische spanning tussen die twee punten.

In een röntgenbuis versnel je elektronen. Bij de botsing van de elektronen op de positieve pool ontstaat röntgenstraling.

Een lineaire versneller bestaat uit een groot aantal buizen waartussen geladen deeltjes worden versneld. Hierbij gebruik je een wisselspanning die op het juiste moment van teken verandert.

Een magnetisch veld is de omgeving waarin een kompasnaald een krachtwerking ondervindt. De richting van het magnetisch veld is de richting waarin de noordpool van de kompasnaald wijst. De richting van het magnetisch veld om een stroomdraad of in een stroomspoel bepaal je met de rechterhandregel.

De aarde heeft een permanent magnetisch veld. De magnetische zuidpool bevindt zich in de buurt van de geografische Noordpool.

Een geladen deeltje dat in een magnetisch veld beweegt, ervaart een lorentzkracht. De richting van de lorentzkracht vind je met de FBI-regel.

Wanneer een stroom door een spoel loopt die zich in een magnetisch veld bevindt, gaat die spoel zo draaien dat de richtingen van de twee velden met elkaar overeen komen.

In een elektromotor blijft de spoel doordraaien omdat de collector ervoor zorgt dat de richting van de stroom op het juiste moment omdraait. Daardoor verandert de richting van de lorentzkracht en blijft de spoel verder draaien.

De magnetische flux is een maat voor het aantal veldlijnen dat door een oppervlak gaat. Een verandering in flux levert een inductiespanning op. De grootte van de inductiespanning bij een spoel is recht evenredig met het aantal windingen van de spoel en recht evenredig met de grootte van de fluxverandering.

### Gegevens die betrekking hebben op dit hoofdstuk

De formules die in dit hoofdstuk besproken zijn, staan hieronder bij elkaar.

wet van Coulomb	$F_{\text{el}} = f \cdot \frac{q \cdot Q}{r^2}$
elektrische veldkracht	$\vec{F}_{\text{el}} = q \cdot \vec{E}$
verandering elektrische energie	$\Delta E_{\text{el}} = q \cdot U$
verandering kinetische energie in elektrisch veld	$\Delta E_{\text{k}} = -\Delta E_{\text{el}}$
lorentzkracht op stroomvoerende draad	$F_{\text{L}} = B \cdot I \cdot \ell$
lorentzkracht op bewegend geladen deeltje	$F_{\text{L}} = B \cdot q \cdot v$
magnetische flux	$\Phi = B_{\perp} \cdot A$
inductiespanning	$U_{\text{ind}} \propto N$ $U_{\text{ind}} \propto \frac{d\Phi}{dt}$

De formules kun je terugvinden in BINAS tabel 35 D Elektriciteit en Magnetisme. In BINAS tabel 7A en B staan gegevens die je nodig hebt bij het oplossen van vragen in dit hoofdstuk.

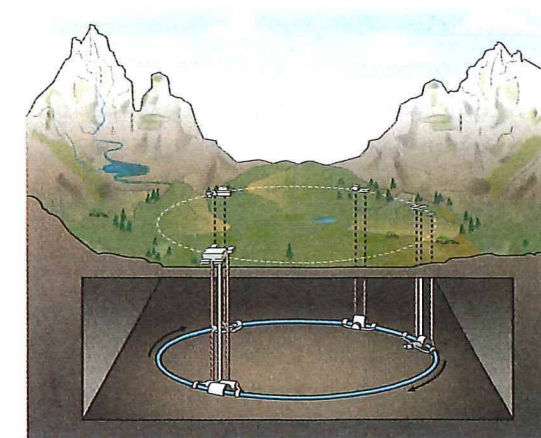
### Opgaven

- 32 In de buurt van Genève bevindt zich de LHC (Large Hadron Collider). Zie figuur 10.82. Deze ondergrondse deeltjesversneller is met een diameter van 8,4858 km de grootste ter wereld. De LHC bestaat uit een ondergrondse ring met daarin twee cirkelvormige buizen dicht naast elkaar. In de twee buizen gaan twee bundels protonen rond in tegengestelde richting.

Als de protonen door het versnellen een energie van 7,0 TeV (tera-elektronvolt) hebben gekregen, laten de wetenschappers deze protonen in een detector tegen elkaar botsen.

Voordat de protonen in de ring van de LHC binnenkomen, worden ze eerst in een lineaire versneller versneld. Daarbij doorlopen de protonen een groot aantal malen een elektrische spanning van 5,0 kV.

- a Bereken hoe vaak de protonen deze spanning moeten doorlopen om vanuit stilstand een snelheid van  $1,2 \cdot 10^7 \text{ m s}^{-1}$  te krijgen.

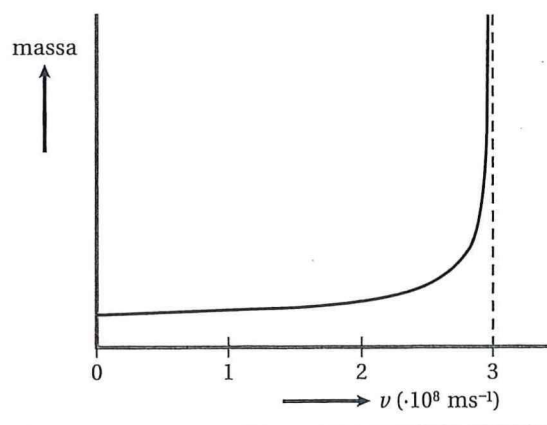


Figuur 10.82

Voordat de protonen in de grote ring komen, worden ze in twee bundels gesplitst. Daarna worden de protonen versneld totdat ze 11245 maal per seconde de ring doorlopen.

b Bereken hoeveel procent de snelheid van de protonen dan verschilt van de lichtsnelheid.

Als je de kinetische energie van 7,0 TeV omrekent naar de snelheid van het proton vind je een waarde die veel groter is dan de lichtsnelheid. Volgens de relativiteitstheorie zal dit niet gebeuren, omdat de massa van een deeltje tot oneindig toeneemt als het deeltje de lichtsnelheid bereikt. Dit is weergegeven in figuur 10.83.

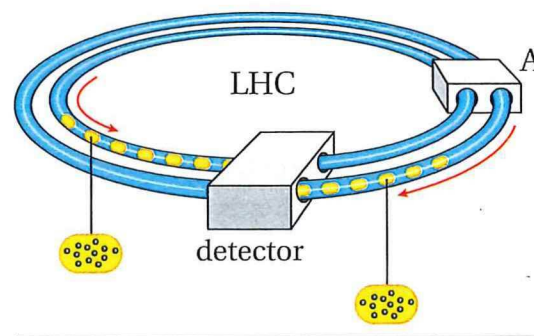


Figuur 10.83

Bij elke omwenteling neemt de kinetische energie van een proton toe.

c Leg uit aan de hand van figuur 10.83 uit dat een proton nooit de lichtsnelheid bereikt, hoe groot de kinetische energie ook is.

In de ring bevinden zich twee buizen waarin de protonen in tegengestelde richting bewegen. Dit is schematisch weergegeven in figuur 10.84.



Figuur 10.84

De protonen worden in de buizen in een cirkelbaan gehouden door sterke elektromagneten om de buizen. In figuur 10.84 is aangegeven dat de protonen in de rechterbuis naar je toe bewegen en in de linkerbuis van je af.

d Bepaal de richting van het magnetische veld in zowel de binnenste als de buitenste buis.

In één buis bewegen 2808 groepjes protonen. Hierdoor is in die buis de stroomsterkte gelijk aan 0,582 A.

e Bereken hoeveel protonen er in één groepje zitten.

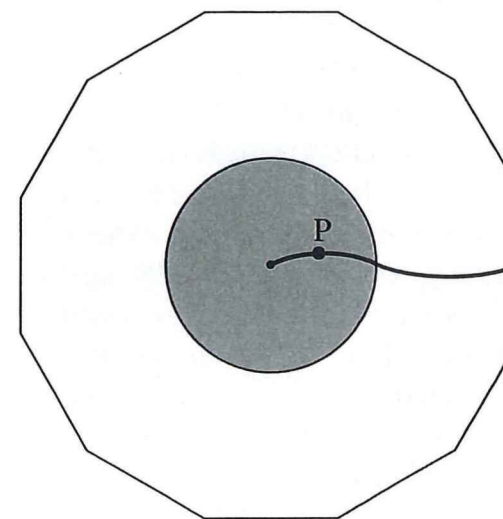
32 In de LHC laten natuurkundigen protonen met een zeer hoge snelheid op elkaar botsen. Er ontstaan daarbij verschillende deeltjes. Op deze manier toont men het zogenaamde higgs-deeltje aan. Het higgs-deeltje is niet rechtstreeks te detecteren. Soms valt het higgs-deeltje uiteen in twee muonen en twee antimuonen.

Een muon heeft dezelfde lading als een elektron, maar is veel zwaarder. Een antimuon is even zwaar als een muon, maar heeft een tegengestelde lading.

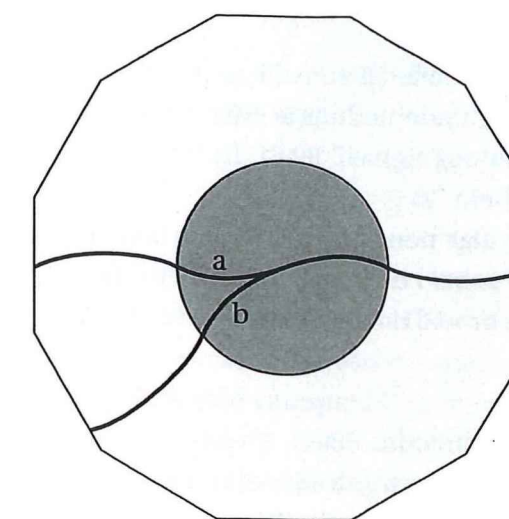
De (anti-)muonen worden waargenomen in een detector. Deze 14 meter hoge cilindervormige detector bestaat uit vele lagen waarin de banen van de deeltjes worden vastgelegd.

In figuur 10.85 is de dwarsdoorsnede van de detector getekend. De cirkel stelt een spoel voor. Daarbinnen (aangegeven met donkergrijs) heerst een homogeen magne-

tisch veld. Midden in deze cirkel vindt de botsing plaats. De veldlijnen in die cirkel staan loodrecht op het vlak van tekening en zijn het papier in gericht. Ook buiten de spoel heerst een magnetisch veld (aangegeven met lichtgrijs). Je ziet de baan van een wegschietend deeltje binnen en buiten de spoel.



Figuur 10.85



Figuur 10.86

a Leg uit of het deeltje een muon of een anti-muon is. Teken daartoe in figuur 10.85 de richtingen van het magnetisch veld en van de lorentzkracht in punt P.

In figuur 10.86 zijn twee banen getekend van een ander wegschietend deeltje. Dit deeltje is het antideeltje van het deeltje uit vraag a en heeft dezelfde energie maar een tegengestelde beginrichting.

b Leg uit welke van de aangegeven banen de juiste is. Voor een wegschietend deeltje geldt:

$$E = B \cdot q \cdot c \cdot r$$

- $E$  is de totale energie van het deeltje in J.
- $B$  is de sterkte van het magnetisch veld in T.
- $q$  is de lading van het deeltje in C.
- $c$  is de lichtsnelheid in m/s.
- $r$  is de straal van het deeltje in m.

c Toon aan dat het deel van de formule links van het = teken dezelfde eenheid heeft als het deel rechts van het = teken.

In figuur 10.85 is te zien dat buiten de spoel de straal van de cirkelbaan groter is dan binnen de spoel. Twee onderzoekers noemen hiervoor een oorzaak.

Oorzaak I: De deeltjes hebben buiten de spoel een kleinere snelheid omdat ze door botsingen met de materie van de detector zijn afgeremd.

Oorzaak II: Het magnetisch veld buiten de spoel is kleiner dan het magnetisch veld binnen de spoel.

d Leg voor beide oorzaken uit of ze de grotere straal van de cirkelbaan verklaren.