

ELEKTRISCHE EN MAGNETISCHE VELDEN

NNV19

Elektriciteit en magnetisme beheersen ons leven. Een wereld zonder TV's, computers en mobiele telefoons is niet meer voor te stellen. Natuurlijk ontstaan dit soort apparaten niet vanzelf. Er is veel kennis van het 'gedrag' van elektriciteit en magnetisme voor nodig.

Een deel van die kennis zullen we in de komende hoofdstukken onthullen. Je zult zien wat er aan de basis ligt van elektrische en magnetische verschijnselen. Je zult zien hoe innig elektriciteit en magnetisme met elkaar verbonden zijn. En je zult zien hoe we beide kunnen inzetten tot het maken van de meest fantastische apparatuur!



In de kantlijn van de tekst staat af en toe dit pictogram. Dat geeft aan dat je op www.schoolsupport.nl/ninaweblinks een link naar een webpagina of andere informatie kunt vinden. De links op deze NiNaweblinks-pagina worden zoveel mogelijk up to date gehouden.

Colofon

Project	Nieuwe Natuurkunde
Auteurs	M.P. Huijbregtse, J.H. van der Schee, J.E. Frederik
M.m.v.	L.H. Arntzen, M.S.T. van de Kragt, A. Moerdijk, D.A. van de Straat, J.M. Thijssen, J.S. Seldenthuis
Redactie	Harrie Eijkelhof, Koos Kortland, Guus Mulder, Maarten Pieters, Chris van Weert, Fleur Zeldenrust
Versie	mei 2012

Copyright

©Stichting natuurkunde.nl, Enschede 2012

Alle rechten op het lesmateriaal dat voor de pilot Nieuwe Natuurkunde ontwikkeld is, zijn voorbehouden aan de Stichting natuurkunde.nl. Geen enkele openbaarmaking of verveelvoudiging is toegestaan, zoals verspreiden, verzenden, opnemen in een ander werk, netwerk of website, tijdelijke of permanente reproductie, vertalen of bewerken of anderszins, voor al of niet commercieel hergebruik.

Als uitzondering hierop is openbaarmaking of verveelvoudiging toegestaan

- voor eigen gebruik of voor gebruik in het eigen onderwijs aan leerlingen of studenten;
- als onderdeel van een ander werk, netwerk of website, tijdelijke of permanente reproductie, vertaald en/of bewerkt en/of verder ontwikkeld, voor al of niet commercieel hergebruik, mits hierbij voldaan is aan de volgende condities:

1. schriftelijke toestemming is verkregen van de Stichting natuurkunde.nl, met als contactadres de Nederlandse Natuurkundige Vereniging; verenigingsmanager@nnv.nl

2. bij hergebruik of verspreiding wordt door de gebruiker de bron correct vermeld, en de licentievoorzaken van dit werk kenbaar gemaakt.

Voor zover de Stichting natuurkunde.nl gebruik maakt van extern materiaal heeft zij getracht toestemming te verkrijgen van eventuele rechthebbenden. Mocht u desondanks van mening zijn dat u rechten kunt laten gelden op materiaal dat in deze reeks is gebruikt dan wordt u verzocht contact op te nemen met: verenigingsmanager@nnv.nl.

Het lesmateriaal is met zorg samengesteld en getest. De Stichting natuurkunde.nl, resp. de auteurs aanvaarden geen enkele aansprakelijkheid voor onjuistheden en/of onvolledigheden in de modules, noch enige aansprakelijkheid voor enige schade, voortkomend uit het gebruik van deze modules.

INHOUDSOPGAVE

1	Statische elektriciteit	5
1.1	Elektrische lading	5
1.2	Neutraal of geladen?	5
1.3	Elektrische krachten nader bekeken	6
1.4	Neutraal en geladen	7
1.5	Het elektrisch veld	8
1.6	Energie en veld	8
1.7	Velden tekenen: veldlijnen	10
1.8	Toepassing: Kijken naar het allerkleinste	12
2	Magnetisme	19
2.1	Magneten	19
2.2	Magnetisch veld en veldlijnen	19
2.3	Magnetiseren	21
2.4	Toepassing: Magnetisch geheugen	21
3	Elektromagneten	24
3.1	Stroomvoerende draden	24
3.2	Spoelen	24
3.3	Magneten en bewegende elektronen	25
3.4	Toepassing: Schakelen maar!	26
4	De Lorentzkracht	29
4.1	Lorentzkracht op een stroomvoerende draad	29
4.2	Elektromotor	29
4.3	Lorentzkracht op bewegende lading	30
4.4	Het Hall-effect	31
4.5	Toepassing: Zwevende treinen	32
5	Inductie	40
5.1	Magnetische flux	40
5.2	De wet van Faraday	41
5.3	De wet van Lenz	41
5.4	Generatoren	42
5.5	Transformatoren	43
5.6	Toepassing: Het moderne koken	44
6	Elektromagnetische golven	48
6.1	Het elektromagnetisch spectrum	48
6.2	Ontstaan van elektromagnetische golven	49
6.3	Voortplanting van elektromagnetische golven	49
6.4	Toepassing: Mensen scannen met MRI	50
7	Nog meer toepassingen	52
7.1	Beveiligingspoortjes	52
7.2	Afval scheiden met een magneet	53
7.3	Magnetisch koelen	53
7.4	Elektromotoren in huis	54
7.5	Detectielussen in het verkeer	54
7.6	Deeltjesversnellers	55
7.7	Magnetrons	55
7.8	Kernfusie	56
7.9	Geluid uit elektriciteit	56

Bijlage A: Appletopdrachten	57
A.1 John Travoltage	57
A.2 Geladen ballonnen	57
A.3 IJshockey met ladingen	57
A.4 Ladingen en velden	58
A.5 Staafmagneet	58
A.6 Elektromagneet	58
A.7 Spoel	58
A.8 Generator	59
A.9 Transformator	59
A.10 Radiogolven	59
A.11 MRI	59
Bijlage B: Practica	61
B.1 Rollende ballen	61
B.2 Veld van een spoel	61
B.3 Elektromotoren	62
B.4 Vallende ballen	62
Bijlage C: Procesbeschrijving groepsopdrachten	63
C.1 Werkverantwoording proces	65
C.2 Werkverantwoording algemene vaardigheden	66
C.3 Werkverantwoording resultaat	67
Bijlage D: Regels, regels, regels...	68

Voorkennis

Bij deze module gaan we er van uit dat je al een aantal dingen weet:

1. Je weet dat er twee soorten lading zijn en je kunt ze benoemen.
2. Je kunt de elektrische krachtwerking tussen de elektrische ladingen beschrijven.
3. Je weet van we onder de volgende zaken verstaan: permanente magneet, Noordpool, Zuidpool, magnetische aantrekking en afstoting.
4. Je kunt uitleggen waarom de Noordpool van een kompasnaald naar de Noordpool van de aarde wijst.
5. Je kent de geladen deeltjes die in een atoomkern voorkomen en weet waar deze deeltjes zich in het een atoom bevinden.
6. Je kunt uitleggen dat door wrijving van bepaalde stoffen statische lading kan worden opgehoopt.

1 Statistische elektriciteit

Misschien ken je het volgende proefje wel. Je neemt een plastic pen en wrijft deze een paar keer langs je trui. Als je de pen nu in de buurt van een hoopje papiersnippers houdt, zul je zien dat de snippers door de pen worden aange-trokken.

De oude Grieken hadden iets dergelijks al ontdekt bij het opwrijven van een stuk barnsteen met een wollen doek. Allerlei voorwerpen konden hierna door het barnsteen worden aangetrokken. Wat is dit toch voor mysterieuze kracht? En wat is de functie van het wrijven?

Hoofdstukvraag

Wat is elektrische lading en een elektrisch veld?

1.1

Elektrische lading

De kracht zoals hiervoor beschreven, lijkt wel een beetje op de gravitatie-kracht. Die werkt aantrekkend tussen objecten/voorwerpen met massa, ook als die zich op een afstand van elkaar bevinden. De massa's moet echter wel enorm zijn – bijvoorbeeld de aarde of de zon – om iets van de gravitatie-kracht te merken.

Tussen pen en papiersnippers is de gravitatiekracht verwaarloosbaar klein, dus blijkbaar is er naast massa nog 'iets anders' dat de aantrekkende kracht veroorzaakt. Dat 'iets anders' noemen we elektrische lading – of gewoon "lading".

Lading is er in twee soorten: positief en negatief. In tegenstelling tot de gra-vitatiekracht, kan de elektrische kracht behalve aantrekkend ook afstotend zijn. De algemene regel is:

Gelijksoortige ladingen stoten elkaar af, ongelijksoortige trekken elkaar aan.

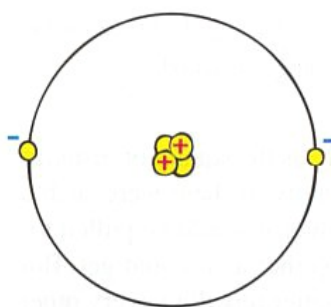
Net als massa en andere natuurkundige grootheden, heeft ook lading een eenheid: de Coulomb (C). Lading geven we aan met de letter q . Een lading van $1,6 \cdot 10^{-19}$ C wordt de elementaire lading genoemd. Deze lading heeft zijn eigen symbool (e) gekregen en is gelijk aan de lading van een proton: $q_{\text{proton}} = e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C. Ook elektronen bezitten de elementaire lading, maar dan negatief: $q_{\text{elektron}} = -e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

Kijkend naar de algemene regel voor elektrische krachten, kunnen we con-cluderen dat protonen en elektronen elkaar aantrekken. Het is dan ook de elektrische kracht die elektronen in hun baan rond de atoomkern houdt!.

1.2

Neutraal of geladen?

Elektrische krachten tussen voorwerpen zijn er lang niet altijd. De reden hiervoor is dat gelijke hoeveelheden positieve en negatieve lading elkaar als het ware opheffen. Aangezien een atoom (en dus het hele voorwerp) in prin-cipe evenveel protonen als elektronen bevat, heeft het als geheel geen netto



Figuur 1.1
Elektrische krachten houden elek-tronen in hun baan rond de atoom-kern.

Opgaven

Je kunt nu opgave 1 maken.



Figuur 1.2.
Laden en ontladen met de John Travoltage.

Opgaven

Je kunt nu opgaven **2, 3** en **4** maken.

Applet: John Travoltage



Bekijk de applet op [PhET Interactive Simulations; John Travoltage](https://phet.colorado.edu/en/simulation/JohnTravoltage) en maak de opdrachten uit bijlage A.1.

lading. Elektrisch neutraal noemen we dit ook wel. Neutrale voorwerpen oefenen geen elektrische kracht op elkaar uit.

Om wel elektrische krachten tussen voorwerpen te hebben, zullen ze elektrisch geladen moeten zijn. Het wrijven van een pen langs je mouw is bijvoorbeeld een manier om de pen (en je mouw!) te laden. Door de wrijving ‘springen’ elektronen van je mouw naar de pen, waardoor de pen een netto negatieve lading krijgt. Je mouw blijft achter met een elektronentekort en raakt daardoor positief geladen.

Een geladen voorwerp is dus niks anders dan een voorwerp met een overschot of tekort aan elektronen. Vanzelfsprekend geldt: twee positief geladen voorwerpen stoten elkaar af, evenals twee negatief geladen voorwerpen. Een positief en een negatief geladen voorwerp trekken elkaar aan.

1.3

Elektrische krachten nader bekeken

In paragraaf 1 hebben we de elektrische kracht al vergeleken met de gravitatiekracht. De vergelijking is misschien nog wel treffender wanneer we de krachten in formulevorm gaan bekijken. Herinner je dat de gravitatiewet van Newton zegt:

$$F_g = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

Waarbij F_g de gravitatiekracht is die (bolvormige) massa m_1 op m_2 uitoefent en r de onderlinge afstand. G is de gravitatieconstante. (Natuurlijk is F_g ook de gravitatiekracht die massa m_2 uitoefent op m_1 ; actie = reactie!)

De Franse wetenschapper Coulomb heeft onderzocht hoe groot de elektrische kracht F_e is, die een (bolvormige) lading q_1 op een andere lading q_2 uitoefent, bij verschillende onderlinge afstanden r . Zijn bevindingen zijn samengevat in de **Wet van Coulomb**:

$$F_e = f \frac{|q_1| |q_2|}{r^2} \quad 1.1$$

Net als de gravitatiekracht neemt de elektrische kracht kwadratisch af met de afstand. Verder is de kracht evenredig met de ladingen, zoals de gravitatiekracht evenredig is met de massa's. De **constante van Coulomb** f heeft een waarde van $8,988 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$. (En natuurlijk geldt ook hier dat F_e tevens de kracht is die q_2 op q_1 uitoefent)

Opgaven

Je kunt nu opgaven **5**, **6**, **7** en **8** maken.

Afsluitend nog twee opmerkingen:

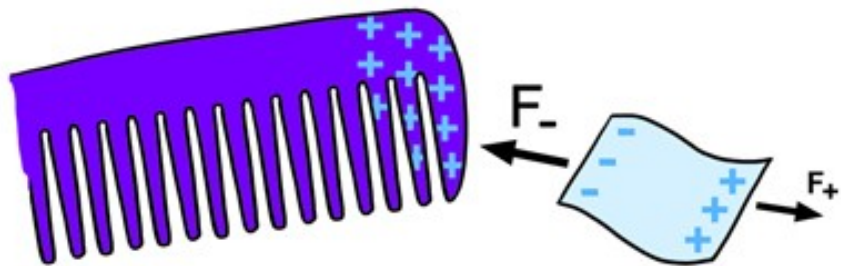
- Wanneer we spreken van “een lading”, bedoelen we eigenlijk “een voorwerp met een netto elektrische lading”. (Net zoals we met “een massa” eigenlijk “een voorwerp met massa” bedoelen)
- Vergelijking 1.1 voor F_e geeft alleen de grootte van de elektrische kracht. De richting – aantrekkend of afstotend – kun je bepalen met de algemene regel voor elektrische krachten.

1.4

Neutraal en geladen

Wat we nu nog niet kunnen begrijpen is het aantrekken van neutrale objecten/voorwerpen door geladen objecten/voorwerpen. De pen en papiersnippers zijn hier een voorbeeld van. De pen is weliswaar geladen, maar met de snippers is niets gebeurd. Toch worden ze door de pen aangetrokken.

We kunnen dit begrijpen door te bedenken dat de snippers – ondanks dat ze als geheel neutraal zijn – wel zijn opgebouwd uit geladen deeltjes: protonen en elektronen. Deze deeltjes ‘voelen’ de invloed van de (negatief) geladen pen als die in de buurt gebracht wordt. De positief geladen deeltjes zullen een beetje opschuiven in de richting van de pen, de negatief geladen deeltjes verwijderen zich juist van de pen (in figuur 1.3 zie je dit uitgebeeld met een geladen kam).



Figuur 1.3

Geladen deeltjes in de papiersnipper verplaatsen zich onder invloed van de positief geladen kam.

Er bevinden zich nu in de snippers gebiedjes met positieve lading dicht bij de pen, en gebiedjes met negatieve lading verder weg van de pen. De aantrekkende kracht op de nabije positieve lading overwint de afstotende kracht op de negatieve lading, die zich verder weg bevindt. Het resultaat is dat de snippers door de pen worden aangetrokken.

Opgaven

Je kunt nu opgaven **9** en **10** maken.

Geladen ballonnen



Bekijk de applet op [PhET Interactive Simulations; Balloons](#) en maak de opdrachten uit bijlage A.2.

1.5

Het elektrisch veld

Uit de formule voor F_e en ervaringen met bijvoorbeeld de geladen pen en papiersnippers, blijkt dat elektrische krachten *op afstand* merkbaar zijn. Iets soortgelijks geldt voor magnetische krachten en gravitatiekrachten. Om deze krachtwerking op afstand te kunnen beschrijven is het begrip **veld** ingevoerd. Zo kennen we elektrische, magnetische en gravitatievelden.

Een **elektrisch veld** ontstaat waar ladingen aanwezig zijn. Zo heeft een (bolvormige) lading q_1 een elektrisch veld met sterkte E om zich heen, waarvoor op afstand r van de lading geldt:

$$E = f \frac{|q_1|}{r^2} \quad 1.2$$

Een elektrisch veld heeft invloed op andere ladingen. Zodra een lading q_2 zich in een elektrisch veld E bevindt, ondervindt deze namelijk een elektrische kracht F_e waarvoor geldt:

$$F_e = |q_2| E \quad 1.3$$

Wanneer we vergelijkingen (1.2) en (1.3) combineren, dan zien we dat de kracht die q_2 ondervindt in het veld van q_1 gelijk is aan de elektrische kracht van q_1 op q_2 volgens vergelijking (1.1). Precies wat we verwachten!

Andersom heeft q_2 natuurlijk ook zijn ‘eigen’ elektrisch veld, waarin q_1 zich bevindt en een kracht F_e ondervindt. Velden houden dus keurig rekening met Newtons actie = reactie wet.

Net als kracht is de elektrische veldsterkte een *vector*: een grootte met grootte én richting. Als afspraak geldt: de richting van het veld in een bepaald punt is gelijk aan de richting van de kracht die een *positieve lading* in dat punt zou ondervinden.

Tot slot: misschien lijken velden op het eerste gezicht alleen een wiskundig trucje om de krachtwerking op afstand te kunnen beschrijven. Dat is niet zo. In de loop der jaren is men ervan overtuigd geraakt dat velden écht bestaan. Ondanks dat we ze niet kunnen zien, ruiken, horen, proeven of aanraken...

Opgaven

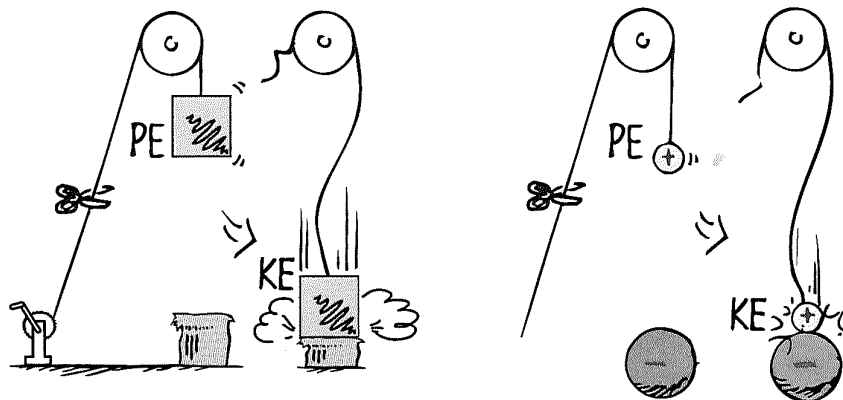
Je kunt nu opgaven **11**, **12** en **13** maken.

1.6

Energie en veld

Een massa aan een touwtje boven een andere massa (bijvoorbeeld de aarde) heeft potentiële energie, namelijk zwaarte-energie (E_z). Die energie kan omgezet worden in kinetische energie (E_k). Je kunt dit vergelijken met twee ladingen bij elkaar in de buurt. Een positieve lading op zekere afstand van een negatieve lading aan een touwtje bezit ook potentiële energie, namelijk elektrische energie (E_{el}), die in dit geval ook kan worden omgezet in kinetische energie (E_k) (Zie figuur 1.3a).

Als je hier langer over nadenkt is het toch wat vreemd. Hoe kan zo’n kracht nu eigenlijk op afstand werken? Als een voetballer tegen een bal schopt is er een direct contact tussen de voet en de bal. Maar ladingen en massa’s oefenen kennelijk krachten op elkaar uit, terwijl ze elkaar toch niet direct aanraken. Best geheimzinnig eigenlijk. Zowel een lading als een massa hebben een *krachtveld* om zich heen. Een *massa* is de bron van een *gravitatieveld* en een *lading* is de bron van een *elektrisch veld*. Het *elektrisch veld* E is nu een ruimte waarin een geladen deeltje een kracht ondervindt. Volgens formule 1.3 is het veld *de kracht per ladingseenheid* [N/C]



Figuur 1.3a

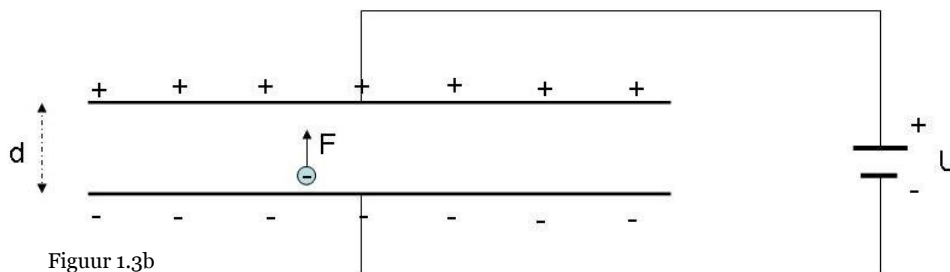
$$E = \frac{F_e}{q} \quad (1.3)$$

Een geladen deeltje is zelf dus de bron van een zo'n elektrisch veld, en de sterkte E is afhankelijk van de lading q [C] en de afstand tot deze lading r [m]

$$E = f \frac{q}{r^2}. \quad (1.4)$$

Hier is f de constante van Coulomb (zie wet van Coulomb, formule 1.1).

We kunnen in de praktijk een mooi homogeen elektrisch veld maken door twee metalen platen parallel (geïsoleerd en het liefst in vacuüm) op te stellen en een spanningsbron met potentiaalverschil U op de platen aan te sluiten.



Figuur 1.3b

Er verzamelt zich nu een overschot aan elektronen op de plaat die op de negatieve pool is aangesloten, en er ontstaat een tekort aan elektronen op de andere plaat. Tussen de platen ontstaat nu een elektrisch veld E . Ook hier zijn dus nog steeds *ladingen* de bron van *het elektrische veld*. De grootte van het elektrische veld tussen de platen is nu

$$E = \frac{U}{d} \quad (1.5)$$

met d de afstand tussen de platen. Als je goed naar deze formule kijkt zie je dat het elektrische veld dus hier als eenheid [V/m] heeft, terwijl 1.3 [N/C] als eenheid heeft.

Kennelijk is een [V/m] hetzelfde als een [N/C]. Dat klinkt gek, maar het is echt zo. Kijk maar

$$\frac{V}{m} = \frac{J}{Cm} = \frac{Nm}{Cm} = \frac{N}{C}. \quad (1.6)$$

Een geladen deeltje bezit dus potentiële energie (E_{el}) in dit veld. De potentiële energie neemt toe naarmate een (negatief) positief deeltje dichtert tegen de (negatieve) positieve plaat aanzit. Als we het deeltje loslaten, dan versnelt het richting tegenoverliggende plaat en wordt dus potentiële energie (E_{el}) omgezet in kinetische energie (E_k).

Voorbeeld

We nemen een spanningsbron $U = 100$ Volt en sluiten deze aan op twee parallel opgestelde metalen platen in vacuüm. De afstand tussen de platen is $d = 1,00$ cm.

We stellen ons nu de volgende vier vragen

1. Hoe groot is nu de elektrische veldsterkte tussen de platen?
2. Hoe groot is de kracht op een elektron tussen de platen?
3. Welke versnelling ondervindt dit elektron?
4. Hoe groot is de kinetische energie (KE) als het elektron aan de andere kant op de positieve plaat treft?

Uitwerking

1. Het elektrisch veld is $E = \frac{U}{d} = \frac{100}{0,0100} = 1,00 \cdot 10^4 \left[\frac{V}{m} \right]$
2. De kracht op het elektron
 $F_e = qE = eE = 1,60 \cdot 10^{-19} \cdot 1,0 \cdot 10^4 = 1,60 \cdot 10^{-15} \text{ N}$
3. De versnelling is $a = \frac{F}{m} = \frac{1,60 \cdot 10^{-15}}{9,11 \cdot 10^{-31}} = 1,76 \cdot 10^{15} \text{ ms}^{-2}$
4. De arbeid W door het veld verricht is
 $W = Fs = qEd = qU = 1,60 \cdot 10^{-19} \cdot 100 = 1,60 \cdot 10^{-17} \text{ Joule}$. De arbeid W door het veld verricht is gelijk aan E_k van het elektron.

Als een lading q versnelt in een veld en daarbij potentiaalverschil U doorloopt, krijgt het dus kinetische energie erbij:

$$\Delta E_k = q \cdot U$$

Dit is immers de door het veld verrichtte arbeid W ! Dus 1 C heeft na het doorlopen van 1 Volt precies 1 Joule kinetische energie!

Als een elektron ($q = e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$) een potentiaalverschil $U = 1,00$ Volt doorloopt, dan wint het dus $E_k = e \cdot U = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$ aan kinetische energie. Deze energiehoeveelheid noemen we (gewoon een afspraak) ook wel de elektronvolt (eV). Dit is een handige eenheid omdat de Joule een vrij grote eenheid is voor kleine deeltjes en energieën.

Per definitie is dus: $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$.

Opgaven

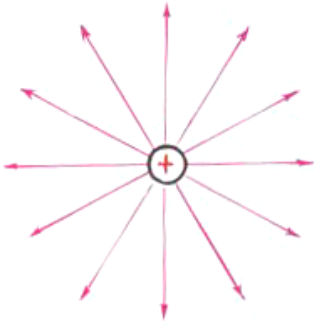
Je kunt nu opgave **14** maken.

1.7

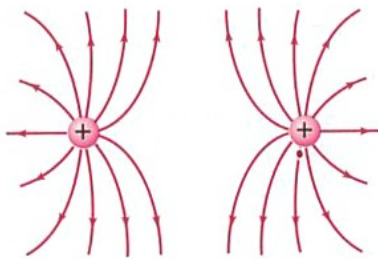
Velden tekenen: veldlijnen

Om meer grip op het 'onzichtbare' elektrisch veld te krijgen, is nagedacht over een manier om het veld te kunnen visualiseren. We gebruiken daarvoor de constructie van veldlijnen. Bekijk bijvoorbeeld de positieve lading q in figuur 1.4a.

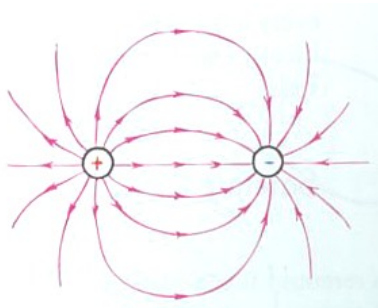
Om de lading heen zie je enkele veldlijnen getekend. Een veldlijn geeft de richting van de kracht aan die een (denkbeeldige) positieve lading zou ondervinden, als deze in het veld geplaatst wordt. In dit geval dus in een *rechte*



Figuur 1.4a
Veldlijnenpatroon rond een positieve lading.



Figuur 1.4b
Veldlijnenpatroon rond een tweetal positieve ladingen.



Figuur 1.4c
Veldlijnenpatroon rond een positieve en een negatieve lading.

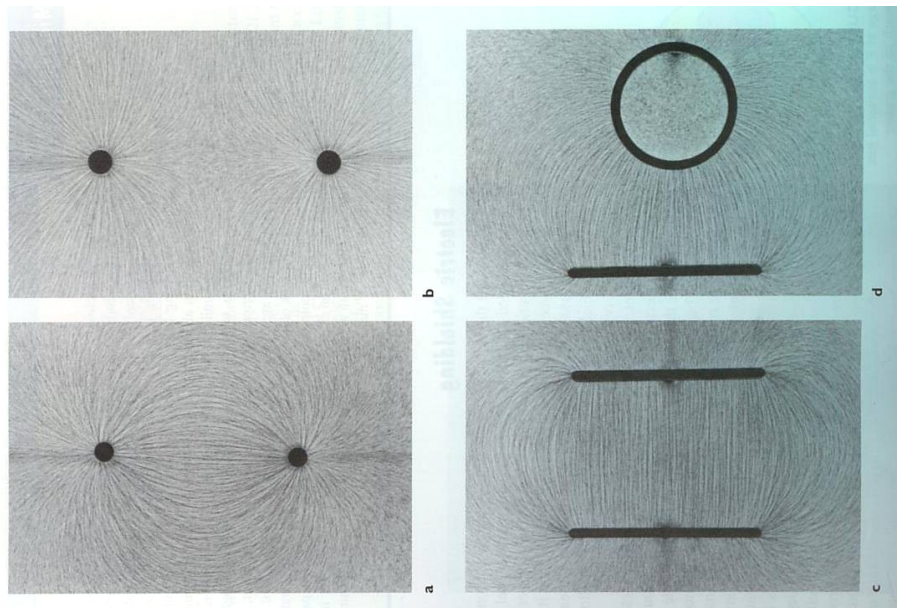
lijn – naar q toe als het een negatieve lading is, of van q vandaan als het een positieve lading is. Een pijlpunt in de veldlijnen geeft aan wat de richting van het elektrisch veld is, volgens de afspraak zoals die in de vorige paragraaf is uitgelegd.

Het elektrisch veld van twee of meer ladingen is in feite samengesteld uit de losse velden van de afzonderlijke ladingen. In figuur 1.4b zie je bijvoorbeeld het veldlijnenpatroon van twee positieve ladingen. Dat van een negatieve en een positieve lading staat in figuur 1.4c.

Al met al is er een viertal 'regels' waar een elektrisch veldlijnenpatroon aan moet voldoen:

- De richting van veldlijnen is altijd van positieve lading, naar negatieve lading.
- Veldlijnen snijden elkaar nooit.
- Veldlijnen staan loodrecht op het oppervlak van een lading.
- Hoe dichter de veldlijnen op elkaar staan, hoe sterker het veld daar is.

Het aantal veldlijnen dat je tekent, is niet bijzonder van belang. Zolang ze maar een goed beeld geven van het veld en natuurlijk aan de bovenstaande regels voldoen.



Figuur 1.5
Geladen griesmeeldeeltes richten zich in het elektrisch veld van diverse geladen voorwerpen en geven zo een beeld van het veldlijnenpatroon.

IJs hockey met ladingen



Bekijk de applet op [PhET Interactive Simulations; Electric Field Hockey](#) en maak de opdrachten uit bijlage A.3.

Opgaven

Je kunt nu opgaven **15**, **16** en **17** maken.

Ladingen en velden



Bekijk de applet op [PhET Interactive Simulations; Charges and Fields](#) en maak de opdrachten uit bijlage A.4.

1.8

Toepassing: Kijken naar het allerkleinste

Microscopen zijn al sinds de 16^e eeuw een belangrijk hulpmiddel in allerlei takken van wetenschap. De 'gewone' lichtmicroscop heeft echter zijn grens: de golflengte van het licht (ca. 500 nm). Objecten die veel kleiner zijn dan 500 nm zijn met een lichtmicroscop niet te onderscheiden. Nu is 500 nm behoorlijk klein, maar om bijvoorbeeld molecuulstructuren te bekijken is het nog lang niet voldoende!

In de twintiger jaren van de 20^e eeuw kwam er echter een doorbraak. Het bleek dat je ook met een bundel elektronen afbeeldingen kunt maken. Het duurde dan ook niet lang (1931) voordat de eerste **elektronenmicroscop** op de markt verscheen.

De resolutie van een elektronenmicroscop is vooral afhankelijk van de snelheid van de elektronen: als je ze maar hard genoeg laat gaan, kun je objecten bekijken die je met een lichtmicroscop nooit zal kunnen zien. Tot wel 0,1 nm aan toe! Om de elektronen op de juiste snelheid te krijgen, wordt een elektrisch veld gebruikt. Een gigantisch elektrisch veld, zoals je in de opgaven zult zien!

Opgaven

Je kunt nu opgaven **18** en **19** maken.

Samenvatting

Je kunt:

- Een omschrijving geven van elektrische lading
- Een manier noemen om voorwerpen elektrisch te laden (d.m.v. wrijving)
- De aard (aantrekkend of afstotend) van elektrische krachten bepalen
- Een omschrijving geven van het elektrische veld
- Een elektrisch veld visualiseren d.m.v. veldlijnen
- Aangeven hoe elektrische velden in elektronenmicroscopen worden toegepast

Opgaven § 1.1

1 Elektrische stroom

Elektrische stroom is in feite de hoeveelheid lading die per seconde 'langs stroomt':

$$I = \frac{q}{t}$$

- Schrijf de Coulomb in SI eenheden.
- Bereken de stroomsterkte in de schakeling in figuur 1.6.
- Bereken het aantal elektronen dat de batterij in 1 minuut door de schakeling stuwt.

Opgaven § 1.2

2 Geladen voorwerp

Waarom is het onmogelijk dat een voorwerp een netto lading van $2,5 \cdot 10^{-19}$ C heeft?



Figuur 1.6

3 Geladen kam

Stel dat je kam een netto lading van $-4,8 \cdot 10^{-9} \text{ C}$ krijgt als je hem door je haar haalt.

- Hoe groot is dan de lading van jouw lichaam?
- Leg uit hoe de kam aan zijn lading is gekomen.
- Bereken het aantal gram dat de kam in massa is toegenomen.

4 Ontladen

Na verloop van tijd raakt een geladen voorwerp zijn netto lading weer kwijt. We noemen dit ontladen. Ontlading kunnen we sneller laten verlopen door het geladen voorwerp in contact te brengen met een ander voorwerp; bij voorkeur een elektrische geleider (bijvoorbeeld iets van metaal).

- Leg uit wat er gebeurt als je een negatief geladen voorwerp in contact brengt met een elektrische geleider.
- Hoe kan het dat je soms een schokje voelt bij het aanraken van een metalen deurklink?

Ontlading zonder contact met een geleider vindt voornamelijk plaats via watermoleculen in de lucht.

- Leg uit dat de proef met de pen en papiersnippers niet snel zal lukken in een vochtige omgeving.

Opgaven § 1.3

5 Waterstofatoom

Het eenvoudigste waterstofatoom bestaat uit een proton met daaromheen cirkelend een elektron.

- Bereken de elektrische kracht die het atoom bij elkaar houdt, als het elektron zich op een afstand van $5,3 \cdot 10^{-2} \text{ nm}$ van het proton bevindt.

Deze kracht fungeert als middelpuntzoekende kracht.

- Bereken de snelheid waarmee het elektron beweegt.

Stel dat het elektron met dezelfde snelheid beweegt, maar het atoom slechts door de gravitatiekracht bij elkaar gehouden wordt.

- Bereken de afstand waarop het elektron zich in dit geval van het proton bevindt.



Figuur 1.8

6 Elektronen verwijderen

Geef twee redenen waarom de buitenste elektronen van een atoom gemakkelijker te verwijderen zijn dan de binnenste.

7 Elektrische krachten

In figuur 1.8 zie je twee ladingen getekend.

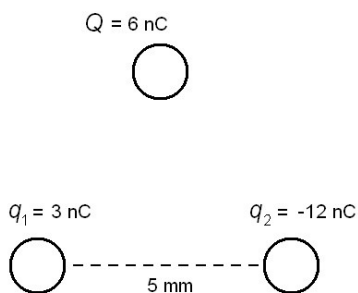
- Neem de figuur over en teken de elektrische kracht op lading q_2 met de juiste grootte en richting.

Bekijk figuur 1.9. De ladingen zitten op de hoekpunten van een denkbeeldige gelijkzijdige driehoek met zijden van 5 mm. Op tijdstip $t = 0$ laten we de ladingen vrij om te bewegen.

- Neem de figuur over en geef de richting aan waarin lading Q op $t = 0$ zal gaan bewegen.

Lading Q heeft een massa van 2,0 g.

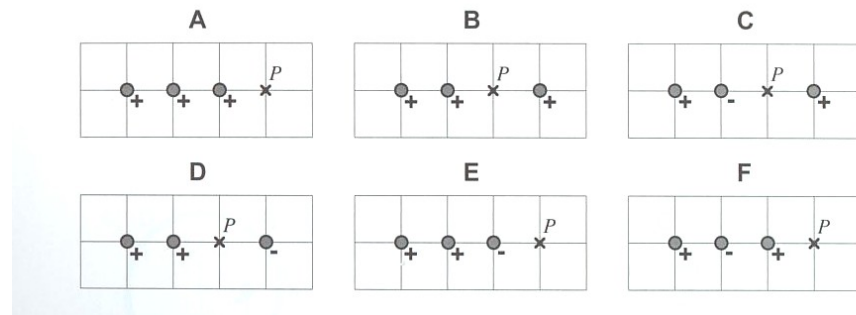
- Bereken de versnelling van lading Q op $t = 0$.



Figuur 1.9

8 Krachten rangschikken

In figuur 1.10 zijn telkens drie puntladingen getekend en een punt P. De ladingen zijn even groot, maar hebben soms een verschillend teken. Ze liggen op een rechte lijn op telkens dezelfde onderlinge afstand. Er zijn geen andere ladingen dan de getekende.



Figuur 1.10

Orden de situaties A, B, ..., F naar de grootte van de kracht op een denkbeeldige puntlading in P.

Grootste kracht ..., ..., ..., ..., ..., ... kleinste kracht.

In situatie(s) ..., ..., ..., ..., ..., ... is de kracht even groot.

Leg telkens duidelijk uit hoe je tot het antwoord komt.

Opgaven § 1.4

9 Elektroscoop

In figuur 1.7 zie je een elektroscoop. Met dit apparaat kan gecontroleerd worden of een voorwerp geladen is, door het tegen het bolvormige uitsteeksel van de elektroscoop aan te houden.

- De blaadjes in de elektroscoop zijn elektrisch geleidend. Leg uit dat de blaadjes uit elkaar gaan wanneer het voorwerp geladen is.
- Kun je uitmaken of het voorwerp positief of negatief geladen is?
- Leg uit waarom het eigenlijk al voldoende is om het voorwerp in de buurt van de elektroscoop te houden.



Figuur 1.7

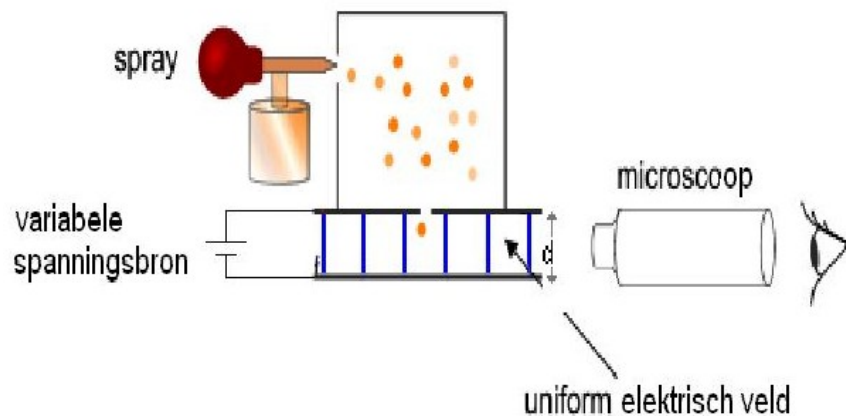
10 Papiersnippers

Leg uit waarom de meeste papiersnippers vrijwel meteen na aanraking met de pen weer 'wegspringen'.

Opgaven § 1.5

11 De proef van Millikan

De Amerikaanse wetenschapper Robert Millikan bepaalde aan het begin van de 20e eeuw de lading van het elektron met een verrassend simpel experiment. In figuur 1.11 zie je een vereenvoudigde weergave van zijn opstelling. Met een spray spoot Millikan oliedruppeltjes in een ruimte. Door wrijving



Figuur 1.11

met de spray raakten ze een beetje negatief geladen. Het ene druppeltje kreeg bijvoorbeeld een overschot van 2 elektronen, een andere van 3, enzovoort.

Onder invloed van de zwaartekracht zakten de druppeltjes langzaam naar beneden. Sommige druppeltjes kwamen hierdoor tussen de twee metalen platen terecht. Deze platen zijn aangesloten op een variabele spanningsbron. De spanningsbron zorgt ervoor dat er tussen de platen een vrijwel uniform elektrisch veld ontstaat, waarvoor geldt:

$$E = \frac{U}{d}$$

Hierin is U de bronspanning (in V) en d de afstand tussen de platen (in m).

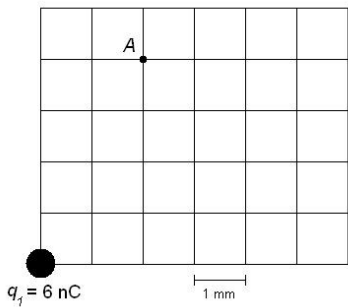
Met een microscoop hield Millikan een druppeltje in de gaten, terwijl hij de bronspanning aanpaste. Bij een bepaalde spanning bleef het druppeltje zweven.

- Welke krachten zijn in dat geval in evenwicht?
- Bepaal de richting van het elektrische veld tussen de metalen platen. Stel dat de dichtheid van de gebruikte olie 972 kg/m^3 is en het zwevende, bolvormige druppeltje een diameter heeft van $19 \cdot 10^{-7} \text{ m}$.
- Bereken de zwaartekracht op dit druppeltje (volume van een bol $= \frac{4}{3}\pi r^3$).

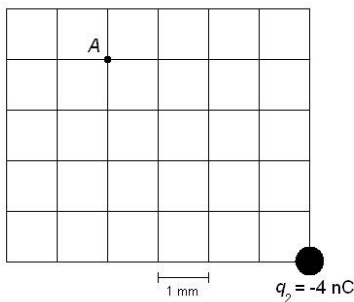
Bij een afstand d van 5,0 mm blijkt een bronspanning van 180 V nodig om het druppeltje te laten zweven.

- Bereken de lading van het druppeltje.

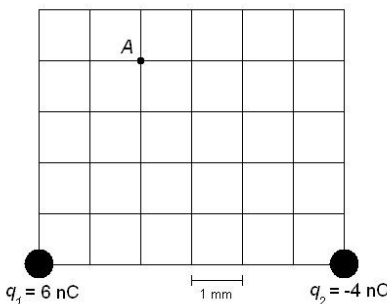
Door zijn proef te herhalen, bepaalde Millikan de lading van duizenden oliedruppeltjes.



Figuur 1.12



Figuur 1.13



Figuur 1.14

- e. Leg uit hoe Millikan hiermee uiteindelijk de lading van het elektron kon bepalen.

12 Elektrische velden

Bekijk figuur 1.12

- Bereken de sterkte van het elektrisch veld in punt A.
- Neem de figuur over en geef met een pijl de richting van het elektrisch veld in punt A aan.

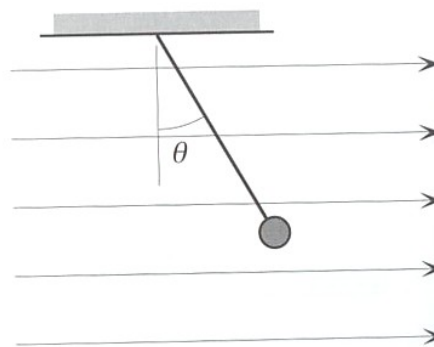
- Bekijk figuur 1.13 en beantwoordt dezelfde vragen als hierboven.

Ten slotte combineren we de twee ladingen (figuur 1.14).

- Leg uit hoe je in dit geval de grootte en richting van het elektrisch veld in punt A kunt bepalen (je hoeft de bepaling zelf niet te doen).

13 Hoeken rangschikken

Een elektrisch geladen bolletje hangt aan een draad in een uniform elektrisch veld – een veld dat overal even sterk is – waarvan de richting door pijlen wordt aangegeven. Zie figuur 1.15. Er heerst zwaartekracht. In de tabel staan zes combinaties van massa en lading. Het bolletje zal telkens een hoek θ met de verticaal maken.



	Mass	Charge
A	3 g	8 nC
B	6 g	4 nC
C	9 g	2 nC
D	3 g	2 nC
E	6 g	8 nC
F	9 g	4 nC

Figuur 1.15

Orden de situaties A, B, ..., F naar de grootte van de hoek θ met de verticaal.

Grootste θ ..., ..., ..., ..., kleinste θ .

In situatie(s) ..., ..., ..., ..., is θ even groot.

Leg telkens duidelijk uit hoe je tot het antwoord komt.

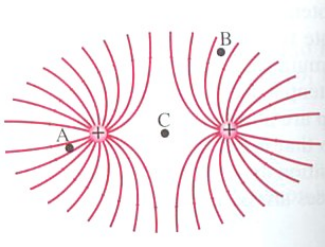
Opgaven § 1.6

14 Lading in een veld

Een oliedruppeltje met een massa van $1,0 \cdot 10^{-12}$ g is tweevoudig positief geladen ($Q = +2e$) en bevindt zich in een elektrisch veld E veroorzaakt door een potentiaalverschil tussen twee platen. Het druppeltje ondervindt een versnelling $a = 1,0 \cdot 10^4 \text{ ms}^{-2}$ en het geheel bevindt zich in vacuüm. De zwaartekracht is niet verwaarloosbaar. De elektrische kracht is in deze opgave precies tegengesteld aan de zwaartekracht.

- Teken de situatie. Teken ook de veldlijnen tussen de platen.
- Wat is de afstand tussen de platen als het potentiaalverschil 100 kV bedraagt?
- Wat is de energie die de druppel erbij krijgt (in eV) als deze van de ene plaat naar de andere beweegt?

Opgaven § 1.7



Figuur 1.16

15 Snijdende veldlijnen

Beredeneer waarom het onmogelijk is dat veldlijnen elkaar snijden.

16 Nog eens veldlijnen

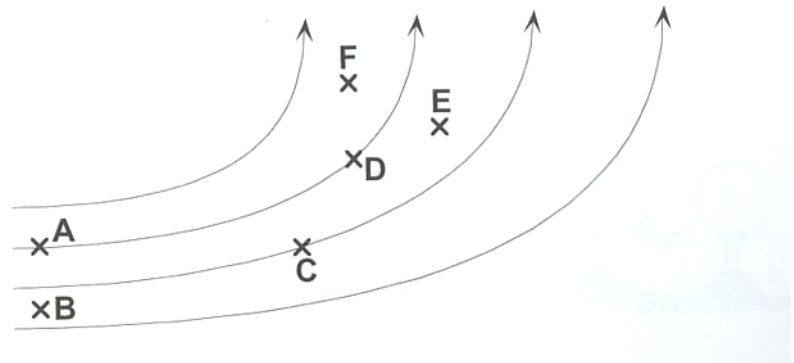
Bekijk het veldlijnenpatroon in figuur 1.16.

- Geef aan in welke richting de elektrische kracht op een positieve lading staat als die zich in punt A bevindt. En in punt B en C?
- Rangschik de punten A, B en C in volgorde van aflopende veldsterkte (dus het sterkste veld eerst).

17 Veldsterktes rangschikken

In figuur 1.17 zijn de veldlijnen van een niet-uniform elektrisch veld getekend.

Orden de veldsterkte in de punten A, B, ..., F van de hoogste waarde tot de laagste.



Figuur 1.17

Grootste veldsterkte ..., ..., ..., ..., ..., ... kleinste veldsterkte.

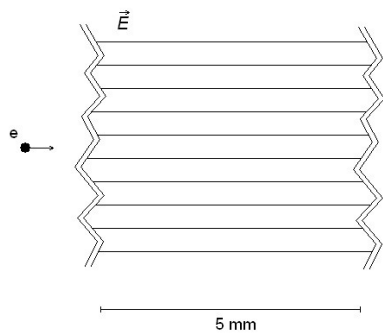
In situatie(s) ..., ..., ..., ..., ..., ... is de veldsterkte even groot.

Leg telkens duidelijk uit hoe je tot je antwoord komt.

Opgaven § 1.8

18 Elektronen versnellen

Het elektrisch veld waarmee elektronen in een elektronenmicroscop versneld worden is bij benadering uniform. Zie figuur 1.18.



Figuur 1.18

- a. Geef de richting aan van dat elektrisch veld als de elektronen van links binnenkomen.

Aan een elektron kunnen we ook een soort golflengte toekennen, die afhankelijk is van de snelheid van het elektron:

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

m is de massa van het elektron en v zijn snelheid. h is de zogenaamde constante van Planck, met waarde $6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$.

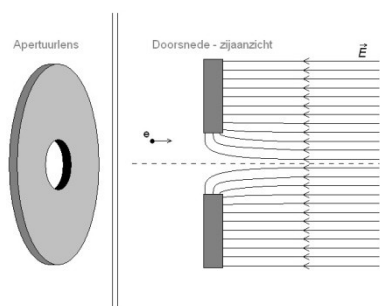
- b. Bereken de snelheid van een elektron met een golflengte gelijk aan die van groen licht.

De theoretisch maximale snelheid is die van het licht: $3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

- c. Bereken de golflengte van een elektron bij deze snelheid.

In de praktijk is de lichtsnelheid niet haalbaar, en hebben de elektronen een minimale golflengte van ongeveer $0,10 \text{ nm}$. We gebruiken het veld van figuur 1.18 om deze golflengte te bereiken. Het elektron bevindt zich over een afstand van 5 mm in dit veld.

- d. Bereken de versnelling die de elektronen in het elektrisch veld ondergaan. (Ga er vanuit dat een elektron vrijwel stilstaand het veld binnenkomt)
- e. Bereken de veldsterkte die nodig is voor deze versnelling.



Figuur 1.19

19 Lenzen

De lenzen in een elektronenmicroscop zijn nogal wat anders dan in een lichtmicroscop. In plaats van glas, worden elektrische (of magnetische) velden gebruikt om de elektronenbundel af te buigen. In figuur 1.19 zie je een voorbeeld van een elektronenlens: de apertuurlens. Deze bestaat uit een metalen plaat met een rond gat erin. Achter de plaat bevindt zich een elektrisch veld.

De apertuurlens heeft dezelfde werking voor elektronen als een rond gaatje (apertuur) heeft voor licht.

Neem het rechtergedeelte van de figuur over en laat aan de hand van het veldlijnenpatroon zien hoe het binnenkomende elektron door dit veld wordt afgebogen.

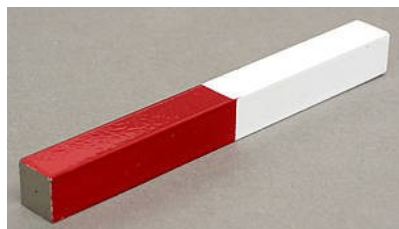
2 Magnetisme

Wie is er niet gefascineerd door magneten? Aantrekken, afstoten en dat allemaal zonder elkaar te raken. Voor velen vormen magneten de eerste bewuste kennismaking met krachtwerking op afstand. Een krachtwerking vergelijkbaar met die van elektrische krachten. De parallellen tussen magnetische en elektrische krachten zijn dan ook erg groot. Maar er zijn wel degelijk fundamentele verschillen!

Hoofdstukvraag

Wat is een magnetisch veld?

2.1



Figuur 2.1
Een staafmagneet.

Magneten

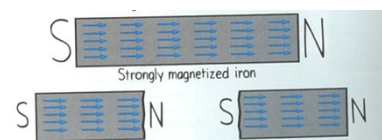
De meest eenvoudige en bekende magneet is waarschijnlijk de staafmagneet (zie figuur 2.1). Een staafmagneet is meestal verdeeld in twee helften met verschillende kleur. Dit is gedaan om aan te geven dat de magneet twee zogenaamde **polen** heeft. Wanneer je een magneet draaibaar opstelt wijst de noordpool naar het noorden. Het is dus een noord-zoekende pool. Die kant van de magneet is de **noordpool**, de andere kant de **zuidpool**.

Houden we een tweede staafmagneet in de buurt, dan zullen we merken dat de magneten een magnetische kracht op elkaar uitoefenen. Deze kan zowel aantrekkend, als afstotend zijn. Er geldt:

Gelijksoortige polen stoten elkaar af, ongelijksoortige trekken elkaar aan.

Je ziet dat dit erg veel lijkt op de regel voor krachten tussen elektrische ladingen. Zijn polen dan een soort 'magnetische lading'? Nee! Waar positieve en negatieve lading 'los' voor kunnen komen, horen noord- en zuidpool als voor- en achterkant bij elkaar. Er is geen noordpool zonder zuidpool en andersom.

Als we de staafmagneet in tweeën hakken, zullen we dan ook geen losse noord- en zuidpool overhouden. Wat we wel krijgen zijn twee volwaardige magneten, zoals in figuur 2.2 is aangegeven. Zelfs als we door blijven hakken tot aan de kleinste deeltjes van de staaf zullen we nooit een losse pool aantreffen! In hoofdstuk 3 zul je zien waardoor dit komt.



Figuur 2.2
Het doorhakken van een staafmagneet levert twee kleinere staafmagneten op.

Opgaven

Je kunt nu opgaven **20** en **21** maken.

Gaussian gun



Bekijk het filmpje op [YouTube: Double Gaussian Gun](#) eens een paar keer. De cilinders zijn magneetjes, de kogels 'gewoon' van metaal. Kun je de grote kinetische energie waarmee de kogel wegschiet verklaren?

2.2

Magnetisch veld en veldlijnen

Net als bij elektrische lading, kunnen we ons ook rondom een magneet een veld indenken: het **magnetisch veld**. Een voorwerp dat gevoelig is voor magnetisme, ondervindt een magnetische kracht in zo'n veld. De sterkte van een magnetisch veld geven we aan met de letter B . In tegenstelling tot het elektrisch veld, is het magnetisch veld niet 'zomaar' uit te rekenen met een

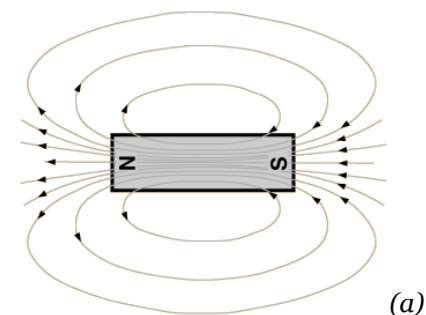
eenvoudige formule zoals vergelijking 1.2. In hoofdstuk 4 zullen we zien hoe we B wel kunnen bepalen.

Voor nu is het vooral van belang te weten dat we ook een magnetisch veld kunnen visualiseren met behulp van veldlijnen. In dit geval stelt een veldlijn het pad voor waarlangs een staafmagneetje zich zou richten in het magnetisch veld. Ook hier geven we met een pijlpunt in de veldlijn de richting van het veld aan, die overeenkomt met de richting waarin de noordpool van het staafmagneetje zou wijzen. Zie figuur 2.3 voor enkele voorbeelden van magnetische veldlijnenpatronen.

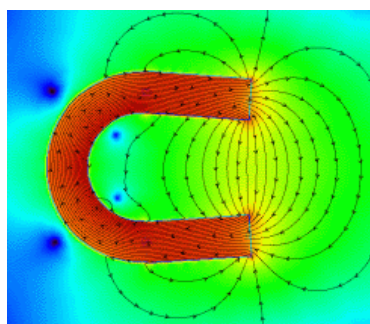
Zoals je kunt zien is er een belangrijk verschil met elektrische veldlijnen: ook binnenin een magneet tekenen we magnetische veldlijnen!

Verder zijn de 'regels' voor een magnetisch veldlijnenpatroon vrijwel hetzelfde als voor een elektrisch veldlijnenpatroon:

- Veldlijnen lopen buiten een magneet van noordpool naar zuidpool.
- Veldlijnen lopen binnen een magneet van zuidpool naar noordpool.
- Veldlijnen snijden elkaar nooit.
- Hoe dichter de veldlijnen op elkaar staan, hoe sterker het veld daar is.

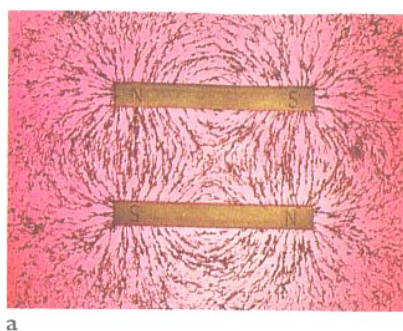


(a)

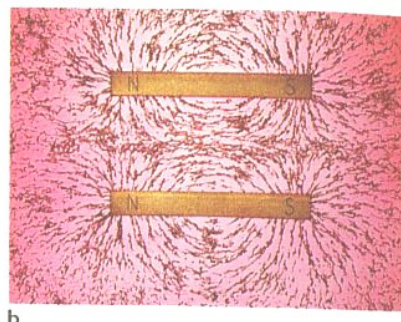


(b)

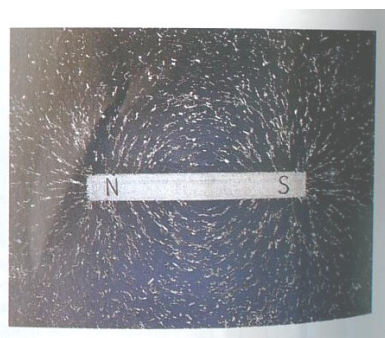
Figuur 2.3
Veldlijnenpatroon rond (a) een staafmagneet en (b) een hoefijzermagneet.



a



b



Figuur 2.4
IJzervijlsel richt zich in een magnetisch veld en geeft zo een beeld van het veldlijnenpatroon.

Opgaven

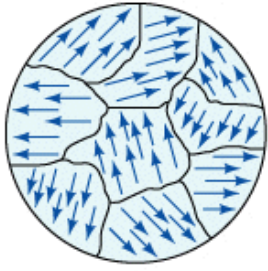
Je kunt nu opgave **22** maken.

Staafmagneet



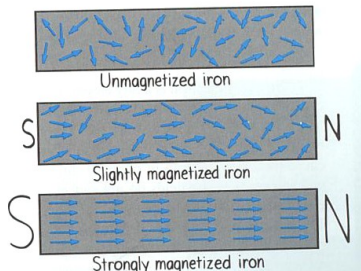
Bekijk de applet op

[PhET Interactive Simulations; Faraday's Electromagnetic Lab](#) en maak de opdrachten uit bijlage A.5.



2.3

Figuur 2.5
Ongeordende weissgebiedjes.



Figuur 2.6
Ijzer in verschillende stadia van magnetisatie.

Magnetiseren

Zoals je waarschijnlijk wel zult weten zijn er niet alleen krachten tussen magneten onderling, maar kunnen magneten bijvoorbeeld ook niet-magnetische stukken ijzer aantrekken. Dit is te vergelijken met de aantrekking van elektrisch neutrale voorwerpen door geladen voorwerpen.

Ook hier gaat de vergelijking echter niet volledig op. Waar alle neutrale objecten gevoelig zijn voor geladen objecten, zijn er genoeg niet-magnetische materialen te vinden die compleet ongevoelig zijn voor magnetische krachten. Een stuk hout bijvoorbeeld, of een glazen fles. Wat maakt ijzer zo onderscheidend van deze materialen?

Hoewel de eigenlijke uitleg pas in hoofdstuk 3 zal komen, kunnen we hier zeggen dat elk stuk ijzer is opgebouwd uit microscopisch kleine magnetische gebiedjes (zie figuur 2.5). Deze gebiedjes noemen we **weissgebiedjes**. Als zij allemaal gelijkgericht zijn, hebben we een magneet. In de meeste stukken ijzer zitten de gebiedjes echter willekeurig door elkaar, waardoor hun velden elkaar opheffen en het ijzer als geheel niet-magnetisch is.

Dat neemt niet weg dat het ijzer wel magnetisch kan worden. Door een magneet in de buurt te houden zullen de weissgebiedjes zich gaan richten, zodanig dat het ijzer door de magneet wordt aangetrokken. We zeggen dan ook wel dat het ijzer **gemagnetiseerd** is (zie ook figuur 2.6).

In een stuk hout of glas zitten geen weissgebiedjes. Zij kunnen dan ook niet gemagnetiseerd worden en zijn daardoor ongevoelig voor magneten.

Opgaven

Je kunt nu opgave **23** maken.

Practicum: Rollende ballen

Kogeltjes die van een helling afrollen, lijken weinig spannend. Maar als de kogeltjes gemagnetiseerd zijn, krijg je verrassende bewegingen! Zie de handleiding in bijlage B.1.

2.4



Figuur 2.7 Een harde schijf en een cassettebandje.

Toepassing: Magnetisch geheugen

Het opslaan van informatie gebeurt al sinds mensenheugenis. In onze eigen hersenen bijvoorbeeld, maar natuurlijk ook daarbuiten. Denk aan geschriften en tekeningen op muren, kleitabletten, papyrusrollen en later in boeken. Maar ook foto's en films op lichtgevoelig materiaal.

De hoeveelheid informatie is in de loop der eeuwen natuurlijk enorm gegroeid en daarmee de behoefte om alles toch op een compacte wijze op te kunnen slaan. Onder andere **magnetische geheugens** voorzien in die behoefte. De harde schijf in je computer is er waarschijnlijk het bekendste voorbeeld van, maar ook het 'ouderwetse' cassettebandje maakt er gebruik van.

Aan de hand van zo'n cassettebandje is de werking van magnetisch geheugen vrij eenvoudig te begrijpen. In de eerste plaats is er het bandje zelf, waar een rol tape in zit met een magnetiseerbaar laagje. Wat we verder nog nodig hebben is een elektromagneet; een magneet waarvan de sterkte met elektrische stroom te regelen is.

Om een stuk muziek op het bandje te zetten, moet het geluid eerst omgezet worden in een elektrisch signaal. Dit signaal varieert, net als het geluid, in

intensiteit. Door het signaal naar de elektromagneet te sturen, zal de sterkte van deze magneet dezelfde variatie vertonen. Als we de tape door het veld van de elektromagneet halen, raakt de tape gemagnetiseerd. Maar door de variërende veldsterkte is de magnetisatie niet op elk stuk van de tape hetzelfde: de tape is feitelijk een magnetische blauwdruk van het oorspronkelijke geluid!

Bij het afspelen van het bandje gaat alles in omgekeerde volgorde: het magnetisatie-patroon wordt omgezet in een elektrische stroom, die in de luidsprekers weer in een geluidssignaal wordt omgezet.

Een harde schijf is eigenlijk niks anders dan een geavanceerde versie van het cassettebandje. Het magnetiseerbare laagje is in dit geval op een schijf aangebracht die met ongekende snelheden kan ronddraaien. De elektromagneet zit verwerkt in een naaldje dat het ronddraaiende oppervlak afscaant, om informatie toe te voegen of uit te lezen.

Opgaven

Je kunt nu opgave **24** maken.

Samenvatting

Je kunt:

- De aard (aantrekkend of afstotend) van magnetische krachten bepalen
- Een omschrijving geven van het magnetisch veld
- Aangeven hoe het magnetisch veld van de aarde staat
- Uitleggen waarom de ene stof wel, en de andere niet te magnetiseren is
- In eigen woorden de werking van magnetische geheugens uitleggen



Figuur 2.8

Opgaven § 2.1

20 Magneetvragen

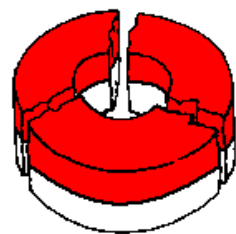
- a. Geef aan waar de polen zitten in een platte koelkastmagneet (figuur 2.8).
- b. Waarom is het onverstandig om een hoefijzermagneet (figuur 2.9) van buigzaam materiaal te maken?
- c. Bekijk de gebroken magneten in figuur 2.10. Waarom kun je de brokstukken van magneet A nog wel, maar die van magneet B niet meer tegen elkaar aanleggen?



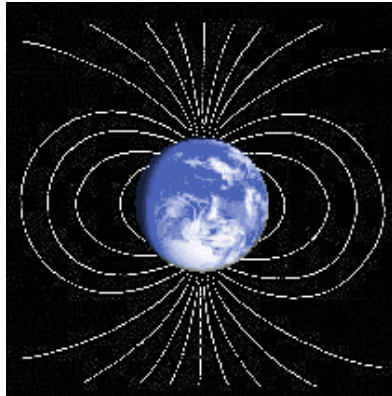
Figuur 2.9



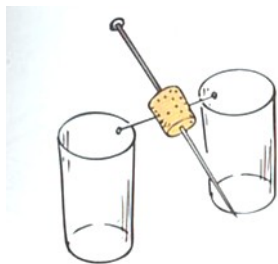
Figuur 2.10



B



Figuur 2.11



Figuur 2.12

21 Magnetische krachten

Magneet X is twee keer zo sterk als magneet Y en trekt met een kracht van 50 N aan magneet Y. Met welke kracht trekt magneet Y aan X?

Opgaven § 2.2

22 De aarde als magneet

Onze aarde kan gezien worden als een reusachtige magneet (figuur 2.11). De magnetische Zuidpool bevindt zich vlakbij de geografische Noordpool (verwarrend...) en andersom.

- Neem de figuur globaal over en geef met pijlpunten in de veldlijnen de richting van het aardmagnetisch veld aan.

Een kompasnaald is in feite een klein staafmagneetje, dat zich richt naar het aardmagnetisch veld.

- Draait een kompasnaald om bij het passeren van de evenaar? Leg uit.

Als we een spijker magnetiseren en ophangen als in figuur 2.12, zal deze zich ook in het aardmagnetisch veld gaan richten.

- Waar hangt de spijker vrijwel horizontaal?
- En verticaal?

Opgaven § 2.3

23 Rake klappen

- Als een magneet hard valt, kan hij zijn magnetisatie kwijtraken. Leg uit waardoor dit komt (*Hint: wat gebeurt er met de weissgebiedjes?*)
- Schepen kunnen tijdens hun bouw – waar flink wat hamerslagen bij komen kijken – juist gemagnetiseerd raken. Verklaar ook dit.

Opgaven § 2.4

24 Cassettebandje of harde schijf

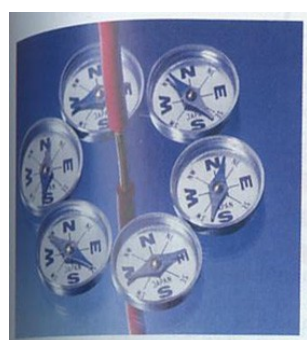
Noem een drietal voordelen van de harde schijf t.o.v. een cassettebandje.

3 Elektromagneten

In de eerste hoofdstukken hebben we elektrische en magnetische verschijnselen afzonderlijk bekeken. Experimenten aan het begin van de 19e eeuw toonden echter aan dat elektriciteit en magnetisme nauw met elkaar verbonden zijn. In de komende hoofdstukken zul je zien waar dit allemaal toe kan leiden.

Hoofdstukvraag

Wat is een elektromagneet en hoe gedraagt deze zich?



3.1

Stroomvoerende draden

De verbondenheid tussen elektriciteit en magnetisme bleek voor het eerst toen onderzoek gedaan werd aan draden waar een elektrische stroom doorheen loopt. We noemen dit ook wel *stroomvoerende draden*.

In figuur 3.1 zie je een rechte stroomvoerende draad, met in de buurt een aantal kompasjes. En wat blijkt? De naaldjes gaan zich richten! En wel langs denkbeeldige cirkels rondom de draad. We kunnen niet anders dan de volgende conclusie trekken:

Een elektrische stroom wekt een magnetisch veld op.

De veldlijnen van dit magnetisch veld vormen cirkels met de draad als middelpunt. Verder geldt:

- Hoe groter de stroom, hoe sterker het magnetisch veld.
- Hoe verder van de draad vandaan, hoe zwakker het magnetisch veld.
- De richting van het magnetisch veld hangt af van de richting van de stroom (zie bijlage D).

Opgaven

Je kunt nu opgaven **25** en **26** maken.

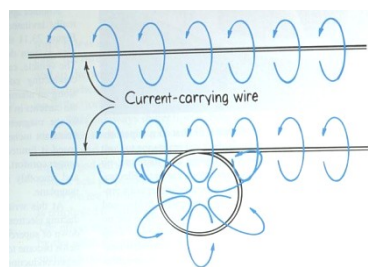
3.2

Spoelen

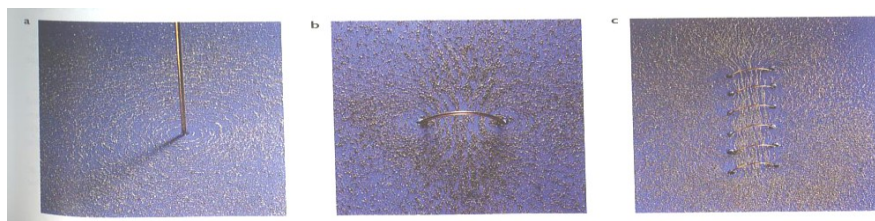
We kunnen de rechte stroomvoerende draad ombuigen en zo een cirkelvormige winding maken (figuur 3.2). De veldlijnen blijven nog steeds in cirkels rondom de draad staan. In het bovenaanzicht in figuur 3.3b kun je zien dat dit leidt tot een magnetisch veld dat erg veel lijkt op dat van een staafmagneet.

Een spoel bestaat uit een groot aantal windingen achter elkaar. Bekijken we in dit geval het magnetisch veld (figuur 3.3c) dan zien we dat de overeenkomsten met een staafmagneet nog groter worden.

Een stroomvoerende spoel werkt als een magneet.



Figuur 3.2
Een stroomvoerende draad zonder (boven) en met (onder) winding.



Figuur 3.3

IJzervijzel rond (a) een stroomvoerende draad, (b) een winding en (c) een spoel onthult het magnetisch veld.

We spreken in dit geval ook wel van een **elektromagneet**, omdat we een elektrische stroom gebruiken om de magnetische eigenschappen te creëren. Ten opzichte van ‘gewone’ magneten heeft een elektromagneet veel voordelen. Zo is de magneet in en uit te schakelen wanneer je maar wilt (door de stroom in of uit te schakelen). Ook kan de sterkte eenvoudig geregeld worden door de stroom door de spoel te vergroten of verkleinen.

De plaats van de noord- en zuidpool van een elektromagneet wordt bepaald door de richting van de stroom (zie bijlage D).

Practicum: Veld van een spoel

Ontdek welke factoren van invloed zijn op de sterkte van het magnetisch veld van een spoel. Zie de handleiding in bijlage B.2.

Opgaven

Je kunt nu opgaven **27** en **28** maken.

Elektromagneet



Bekijk de applet op [PhET Interactive Simulations: Faraday's Electromagnetic Lab](#) en maak de opdrachten uit bijlage A.6.

3.3

Magneten en bewegende elektronen

Elektrische stroom wekt dus een magneetveld op. Maar wat is stroom ook alweer? Juist: bewegende elektronen. Ook in de atomen van de voorwerpen om ons heen bewegen elektronen. Ze cirkelen immers rond de atoomkern, een beetje zoals onze aarde om de zon draait. De aarde maakt echter nog een andere beweging: ze draait ook om haar eigen as. Elektronen doen iets soortgelijks, een eigenschap die we spin noemen.

Al deze beweging zorgt ervoor dat elk elektron eigenlijk een minuscuul magneetje is. Toch zijn de meeste stoffen als geheel niet-magnetisch. Dit komt doordat de elektronen zodanig bewegen, dat hun magnetische velden tegengesteld staan en elkaar opheffen.

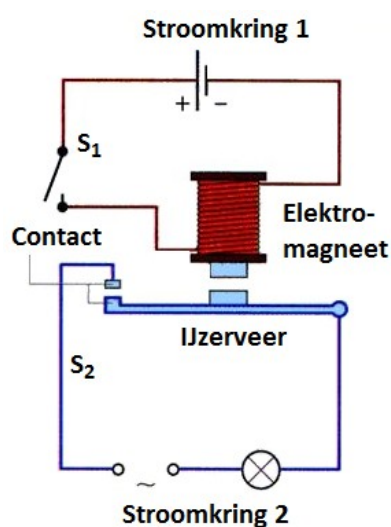
In ijzer, nikkel en kobalt (en enkele zeldzame metalen) is dat echter niet het geval. Hier heffen de magnetische velden van de elektronen elkaar niet volledig op, waardoor in die stoffen elk atoom op zijn beurt een mini-magneet is.

Vaak vormen de atomen groepjes waarin alle magnetische velden gelijkgericht zijn: de weissgebiedjes die we in hoofdstuk 2 al zagen. Als ook de magnetische velden van deze weissgebiedjes elkaar niet opheffen, hebben we te maken met een ‘echte’ magneet.

Opgaven

Je kunt nu opgaven **29** en **30** maken.

3.4



Figuur 3.4
Schakelen in twee stappen met een relais.

Opgaven

Je kunt nu opgave **31** maken.

Toepassing: Schakelen maar!

We staan er vaak niet bij stil hoeveel schakelaars we in de loop van een dag omzetten. TV aan, computer aan, licht aan, oven aan... ja, zelfs bij het indrukken van een deurbel zet je een stroomkring in werking. Om al dat geschakel veiliger te maken, is het relais ontwikkeld.

Een relais bestaat uit een elektromagneet en een stuk ijzer aan een veer. Het zorgt er feitelijk voor dat het inschakelen van apparatuur in twee stappen verloopt (figuur 3.4):

1. Via een 'gewone' schakelaar wordt stroomkring 1 gesloten. Stroom gaat nu door de elektromagneet lopen.
2. Het ijzer wordt door de elektromagneet aangetrokken en sluit stroomkring 2, waarin het apparaat is opgenomen.

Zodra de stroom door de elektromagneet wegvalt, zorgt de veer ervoor dat het ijzer weer loskomt en dus ook de stroom door het apparaat wordt uitgeschakeld.

Samenvatting

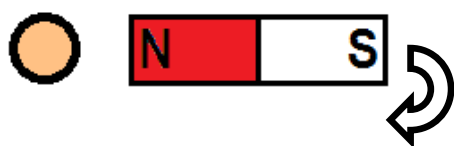
Je kunt:

- Het magnetisch veld van een stroomdraad en een spoel tekenen
- Uitleggen hoe een elektromagneet m.b.v. een stroomdraad gemaakt kan worden
- Uitleggen welke functie elektronen hebben bij permanente magneten
- In eigen woorden de werking van een relais uitleggen

Opgaven § 3.1

25 Actie = reactie

Bekijk figuur 3.5. De stroomvoerende draad staat vast en steekt loodrecht uit de pagina, terwijl het magneetje vrij is om te draaien. Zie bijlage D voor de tekenconstructie van de stroomkring.



Figuur 3.5

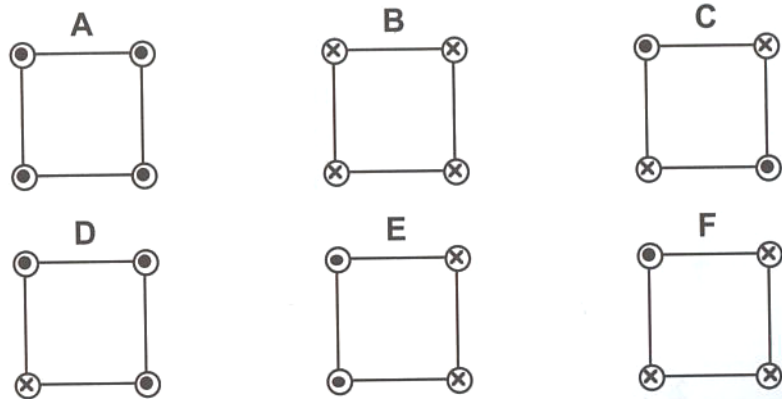
- a. Neem de figuur over en teken hoe het magneetje zich gaat richten.

Stel dat we nu het magneetje vasthouden en de stroomvoerende draad vrij laten om te bewegen.

- b. Teken met een pijl de richting waarin de draad zal gaan bewegen. (Hint: actie = reactie!)

26 Veldsterktes ordenen

In figuur 3.6 zijn zes situaties getekend waarbij stroomdraden in de hoeken van het vierkant loodrecht op het papier staan. De stroom door de draden is telkens even groot, maar gaat ofwel het papier in, ofwel het papier uit.



Figuur 3.6

Orden de figuren A, B, ..., F naar de magnetische veldsterkte in het snijpunt van de diagonalen van groot naar klein.

Grootste veldsterkte ..., ..., ..., ..., ... kleinste veldsterkte.

In de situaties ..., ..., ..., ..., ... is de veldsterkte even groot.

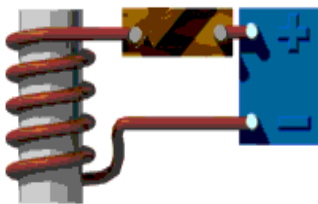
Leg telkens duidelijk uit hoe je aan je antwoord komt.

Opgaven § 3.2

27 Weekijzeren kern

Weekijzer is ijzer dat gemakkelijk magnetiseerbaar is door een magneet, maar zijn magnetisatie ook weer snel kwijtraakt als de magneet weggehaald wordt. Vaak is er een weekijzeren kern in een elektromagneet aanwezig, zoals in figuur 3.7.

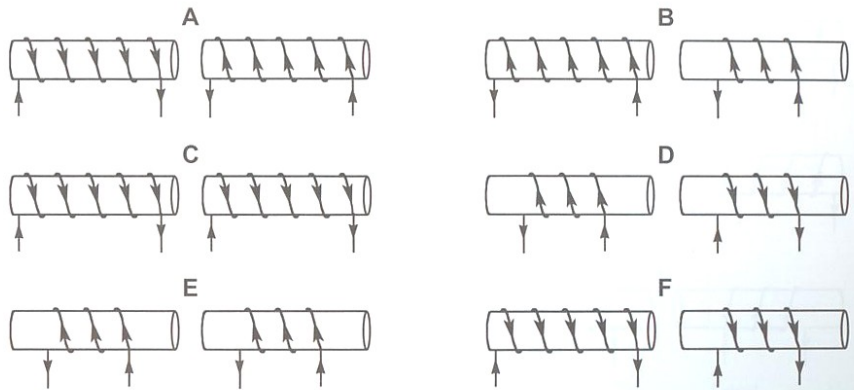
- Leg uit wat er met het stuk weekijzer gebeurt als de stroom wordt ingeschakeld.
- Leg uit waarom dit een gunstige invloed op de kracht van de elektromagneet heeft.



Figuur 3.7

28 Krachten rangschikken

In figuur 3.8 zijn zes paren elektromagneten getekend. De stroomsterkte is telkens even groot, de elektromagneten staan telkens op dezelfde afstand van elkaar en hebben dezelfde lengte en diameter. Het aantal windingen en de richting van de stroom zijn wel verschillend.



Figuur 3.8

Orden de magneetparen A, B, ..., F naar de kracht die ze op elkaar uitoefenen. Plaats de grootste aantrekkende kracht als eerste en de grootste afstotende kracht als laatste.

Meest aantrekkend ..., ..., ..., ..., ..., ... meest afstotend.

De paren in situatie(s) ..., ..., ..., ..., ..., ... oefenen een even grote kracht op elkaar uit.

Leg je redenering duidelijk uit.

Opgaven § 3.3

29 Elektromagneten?

In welk opzicht is elke magneet een elektromagneet?

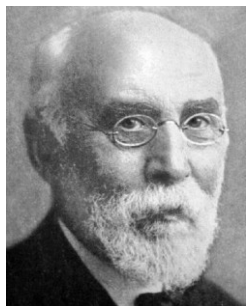
30 Curietemperatuur

Als we een magnetisch materiaal tot boven zijn *curietemperatuur* verhitten, raakt het zijn magnetisatie kwijt. Leg uit hoe dit kan. (*Hint: wat gebeurt er met de atomen als we de temperatuur verhogen?*)

Opgaven § 3.4

31 Veilig met een relais

Leg uit waarom schakelen met behulp van een relais veiliger is dan met een gewone schakelaar.



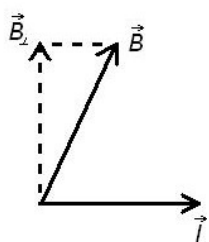
Figuur 4.1
Hendrik Antoon Lorentz

4 De Lorentzkracht

In het vorige hoofdstuk hebben we gezien dat een elektrische stroom een magnetisch veld opwekt. Een stroomvoerende draad kan hierdoor magnetische krachten uitoefenen op voorwerpen die daarvoor gevoelig zijn. Maar wat als we de situatie omdraaien? Kan een magneet ook kracht uitoefenen op een stroomvoerende draad?

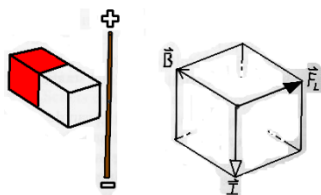
Hoofdstukvraag

Wat is de Lorentzkracht en hoe kunnen we er gebruik van maken?



4.1

Figuur 4.2
Bepaal eerst de component van B die loodrecht op de stroomrichting staat.



Figuur 4.3
De Lorentzkracht staat loodrecht op B en I .

Lorentzkracht op een stroomvoerende draad

We hoeven er niet lang omheen te draaien. Experimenten laten zien dat magneten inderdaad kracht kunnen uitoefenen op stroomvoerende draden. Anders gezegd:

Een stroomvoerende draad ondervindt een kracht in een magnetisch veld.

Deze kracht heeft een aparte naam gekregen: de Lorentzkracht (F_L). In formulevorm kunnen we voor de Lorentzkracht schrijven:

$$F_L = BIl$$

4.1

Hierbij is I de stroom in A en l de lengte van de draad in m. B is de sterkte van het magnetisch veld waarin de draad zich bevindt. De eenheid is $\text{N/A}\cdot\text{m}$, die de eigen naam “Tesla” (afgekort: T) heeft gekregen.

Maar let op! Er schuilen nog twee addertjes onder het gras bij het uitrekenen van de Lorentzkracht:

- In formule 4.1 telt alleen de component van B die loodrecht op de stroomrichting staat. Zie bijvoorbeeld figuur 4.2.
- Ten tweede heeft de Lorentzkracht behalve een grootte natuurlijk ook een richting. Hiervoor geldt: F_L staat loodrecht op het vlak waarin B en de stroomrichting liggen (zie figuur 4.3 en bijlage D)

Opgaven

Je kunt nu opgaven **32**, **33**, **34** en **35** maken.

4.2

Elektromotor

Bekijk de opstelling in figuur 4.4. Als de stroom gaat lopen, draait het draadraam linksom door de Lorentzkracht. Na een kwartslag gedraaid te hebben, zal de Lorentzkracht het draadraam echter weer rechtsom laten draaien. Na wat heen-en-weer hobbelen zal het draadraam uiteindelijk stil komen te staan.

Het metaal zal linksom gaan draaien.

Dit is het principe achter de **elektromotor**. Een elektromotor zet elektrische energie om in bewegingsenergie.

Practicum: Elektromotoren

4.3

We hebben al eerder geconstateerd dat stroom niets anders is dan bewegende elektronen. Net als een stroomvoerende draad ondervinden bewegende elektronen dan ook een Lorentzkracht in een magnetisch veld. En niet alleen elektronen. Op elke lading die beweegt in een magnetisch veld werkt een Lorentzkracht. Is de lading q (in C) en beweegt deze met snelheid v (in m/s) door een magnetisch veld met sterkte B (in T), dan geldt voor de Lorentzkracht op die lading:

$$F_l = Bqv \quad 4.2$$

- Alleen de component van B die loodrecht op de bewegingsrichting staat, telt mee.
- F_L staat loodrecht op het vlak waarin B en de bewegingsrichting liggen.

Opgaven

Je kunt nu opgaven **36, 37, 38, 39, 40** en **41** maken.

Dit laatste betekent dat F_L loodrecht op de snelheid van de bewegende lading staat. Iets wat we kennen van de middelpuntzoekende kracht ($F_{mpz} = \frac{mv^2}{r}$)!

Er geldt dan ook:

Een bewegende lading in een magnetisch veld maakt een cirkelbeweging.

De Lorentzkracht fungeert hierbij als middelpuntzoekende kracht.

4.4

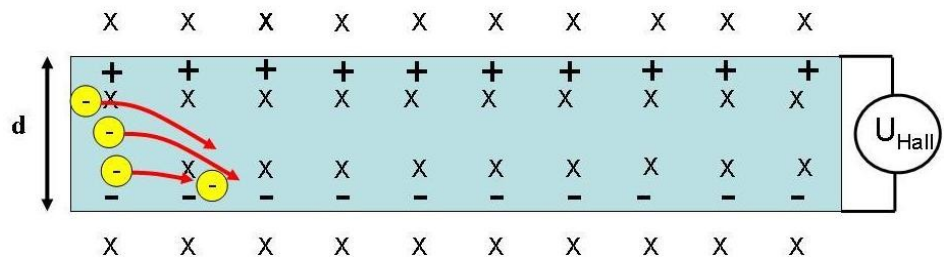
Het Hall-effect

In de vorige paragrafen heb je kennis gemaakt met de Lorentzkracht F_L .

Op een bewegende lading in een magnetisch veld B werkt een kracht. In veel toepassingen vinden we de invloed van deze kracht terug. In de elektromotor, de dynamo, de draaispoelmeter, de massaspectrometer (zie opgave 41) en ook in een stroomvoerende draad.

We gaan nu wat dieper in op de stroomvoerende draad in een magneetveld. Edwin Hall (1855-1938) ontdekte in 1879 dat er een potentiaalverschil U_{Hall} ontstaat over een stroomvoerende draad in het magneetveld B . Dit potentiaalverschil U_{Hall} bleek evenredig met het magneetveld B , en evenredig met de dikte van de draad.

Om dit verschijnsel beter te begrijpen is de situatie enigszins uitvergroot getekend in figuur 4.5b.



Figuur 4.5b

In de draad bewegen de elektronen van links naar rechts¹ met een zekere driftsnelheid v_{drift} . Omdat de draad zich in een magneetveld B bevindt, werkt er op alle bewegende elektronen een Lorentzkracht

$$F_L = ev_{\text{drift}}B,$$

en deze Lorentzkracht trekt de elektronen in dit geval allemaal naar de onderkant van de draad. Er ontstaat zo *ladingsscheiding*. De bovenkant van de draad wordt positief geladen door een tekort aan elektronen en de onderkant wordt negatief geladen door een overschot aan elektronen. Binnenin de draad ontstaat door deze ladingsscheiding een elektrisch veld, ook wel het Hall-veld genoemd E_H

$$E_{\text{Hall}} = \frac{F_L}{e} = v_{\text{drift}}B,$$

¹ Volgens een ietwat ongelukkige afspraak (waar natuurkundigen soms een beetje spijt van hebben) loopt de stroom I dan van rechts naar links....

en over de draad ontstaat hiermee verbonden ook een meetbaar potentiaalverschil U_H

$$U_{Hall} = E_{Hall}d = v_{drift}Bd$$

met $d[m]$ de dikte van de draad. We noemen dit verschijnsel *het Hall-effect*.
 Bekijk ook de volgende applet Jakobvogel.net; Hall-effect.

Het Hall-effect wordt gebruikt om de sterkte van het magnetisch veld te meten. Er wordt een “*magneetveldmeter*” mee gebouwd.

Voorbeeld magneetveldmeter

Een dikke draad van 2,0 cm diameter bevindt zich in een onbekend magnetisch veld. Door de draad loopt een stroom van 15 A. Je meet de Hall spanning $U_{Hall} = 1.1 \mu V$. De driftsnelheid van de elektronen bedraagt $v_d = 5,0 \cdot 10^{-5} \text{ ms}^{-1}$.

1. Bereken de ladingsdichtheid n van de draad (d.w.z. het aantal elektronen per m^3)
2. Wat is de sterkte van het magnetisch veld B ?

Uitwerking

1. De elektronendichtheid $n = \frac{I}{ev_d A}$ met A de oppervlakte van de draad. Als we dit uitrekenen dan vinden we

$$n = \frac{15}{1,60 \cdot 10^{-19} 5,0 \cdot 10^{-5} \cdot 3,14 \cdot 10^{-4}} = 5,9 \cdot 10^{28} m^{-3}$$

$$2. \quad B = \frac{U_{Hall}}{v_d d} = \frac{1,1 \cdot 10^{-6}}{5,0 \cdot 10^{-5} \cdot 2,0 \cdot 10^{-2}} = 1,1 T.$$

Opgaven

Je kunt nu opgaven **42**, **43**, **44**, en **45** maken.

4.5



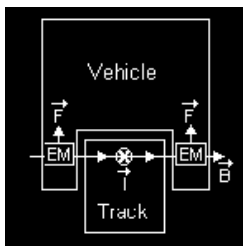
Figuur 4.6
Zoef!

Toepassing: Zwevende treinen

Treinen maken kabaal. Iedereen die in de buurt van het spoor woont, zal dat kunnen beamen. Zwevende treinen zijn een stuk vriendelijker voor het gehoor. Er is namelijk geen contact tussen trein en rails, waardoor wrijving behoorlijk wat minder is. Naast een afname van de herrie, is het daardoor ook nog eens mogelijk een stuk sneller te gaan dan met normale treinen. Twee vliegen in één klap!

Er zijn diverse manieren waarop je treinen kunt laten zweven, maar magnetische velden spelen vrijwel altijd de hoofdrol. Eén van de mogelijkheden is om een Lorentzkracht te gebruiken om de zwaartekracht op de trein te compenseren. Dit gaat als volgt (figuur 4.7):

In de rails is een lange stroomvoerende draad aangebracht, terwijl in de treinstellen elektromagneten verwerkt zitten. Het magnetisch veld van deze elektromagneten kan zo worden ingesteld dat er op de stroomdraad een Lorentzkracht naar beneden wordt uitgeoefend. De derde wet van Newton leert ons dat de stroomdraad in reactie hierop een even grote, maar tegengesteld gerichte kracht op de trein zal uitoefenen. Het is deze kracht die tegen de zwaartekracht in werkt en de trein laat zweven.



Figuur 4.7
De reactiekracht op de Lorentzkracht laat de trein zweven.

Opgaven

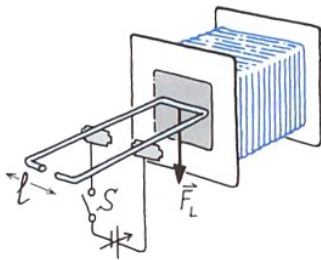
Je kunt nu opgaven **46** en **47** maken.

Samenvatting

Je kunt:

- Berekeningen maken omtrent Lorentzkrachten op stroomvoerende draden
- Berekeningen maken omtrent Lorentzkrachten op bewegende ladingen
- De werking van een elektromotor uitleggen
- In eigen woorden uitleggen hoe de Lorentzkracht ingezet kan worden bij zweeftreinen

Opgaven § 4.1



Figuur 4.8

32 Stroombalans

Een stroombalans (figuur 4.8) bestaat uit een koperen beugel met lengte $l=3,0$ cm. Twee scheermesjes dienen als steunpunten en tegelijk als stroomcontacten. Als we een gewichtje aan de linkerkant van de beugel hangen, zal deze uit balans raken. Door de schakelaar S te sluiten en de stroomsterkte juist in te stellen, kan de Lorentzkracht op de rechterkant het evenwicht herstellen.

- Beredeneer aan welke kant de Noordpool van de elektromagneet moet liggen.

Als we een gewichtje met een bekende massa aan de balans hangen, kunnen we de magnetische veldsterkte van de elektromagneet bepalen. Stel dat we een gewichtje van $100 \mu\text{g}$ met een stroom van $2,0$ A kunnen balanceren.

- Bereken de magnetische veldsterkte van de elektromagneet.
- Leg uit waarom het van belang is dat de scheermesjes precies in het midden van de beugel zitten?

33 Stroomvoerende draden

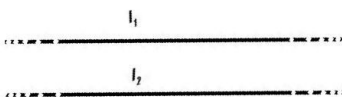
Twee stroomvoerende draden worden parallel naast elkaar gehouden (figuur 4.9).

- Bespreek wat er met de draden zal gebeuren als beide stromen in dezelfde richting staan. (Hint: in welke richting staan de Lorentzkrachten die draden op elkaar uitoefenen?)
- Bespreek wat er met de draden zal gebeuren als de stromen in tegengestelde richting staan.
- Bespreek wat er gebeurt als we de draden loodrecht op elkaar houden (figuur 4.10).

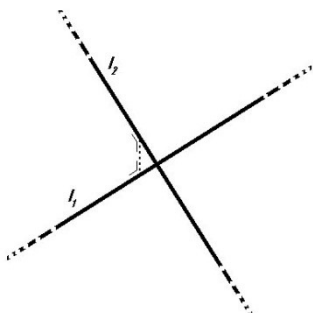
34 Zwevende draad

Bereken de stroomsterkte die nodig is om een koperdraad te kunnen laten zweven in het magnetisch veld van de aarde.

De diameter van de draad is $2,0$ mm en het aardmagnetisch veld heeft een sterkte van $4,5 \cdot 10^{-5}$ T. Ga er vanuit dat veld en stroom zodanig loodrecht op elkaar staan, dat de Lorentzkracht qua richting precies tegengesteld is aan de zwaartekracht.



Figuur 4.9

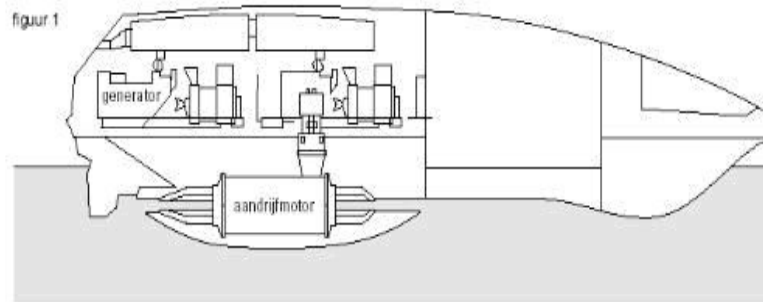


3D Rooster

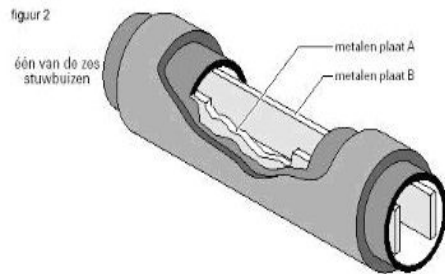
Figuur 4.10

35 Varen zonder schroef

In figuur 4.11 zie je een doorsnede van een schip dat wordt voortgestuwd door de Lorentzkracht.



Figuur 4.11



Figuur 4.12

De aandrijfmotor van het schip bevat zes stuwbuisen. Figuur 4.12 is een opengewerkte tekening van zo'n stuwbuis. De stuwbuisen zijn aan de voor- en achterkant open. Het zeewater kan daardoor vrij in en uit de stuwbuis stromen. In elke buis zitten twee identieke metalen platen A en B. Er bevindt zich dus zeewater tussen de platen in de buis.

Op de platen is een spanningsbron aangesloten die een constante spanning levert (figuur 4.13). Aangezien zeewater een (matige) geleider is, gaat er een stroom lopen tussen plaat A en B. Bij het inschakelen van een magnetisch veld (de grote pijlen in figuur 4.13) zal er op het zeewater een Lorentzkracht worden uitgeoefend.

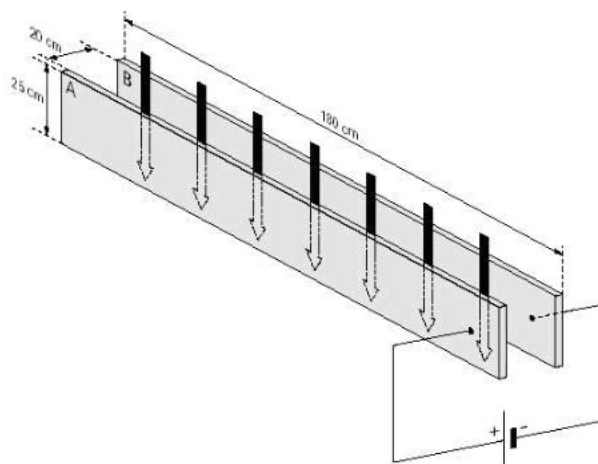
- Teken de vectoren die de richting aangeven van het magnetisch veld, van de elektrische stroom en van de Lorentzkracht op het zeewater in een punt tussen de platen.
- Beredeneer welke kant het schip op zal varen.

De grootte van de magnetische veldsterkte is $3,9 \text{ T}$, terwijl de stroom door het zeewater $4,0 \text{ kA}$ is.

- Bereken de grootte van de Lorentzkracht die opgewekt wordt in één stuwbuis.

Een nadeel van dit schip is dat dit type aandrijfmotor slecht werkt wanneer het schip op een rivier vaart.

- Geef hiervoor een verklaring.



Figuur 4.13

Opgaven § 4.3

36 Eenheden checken

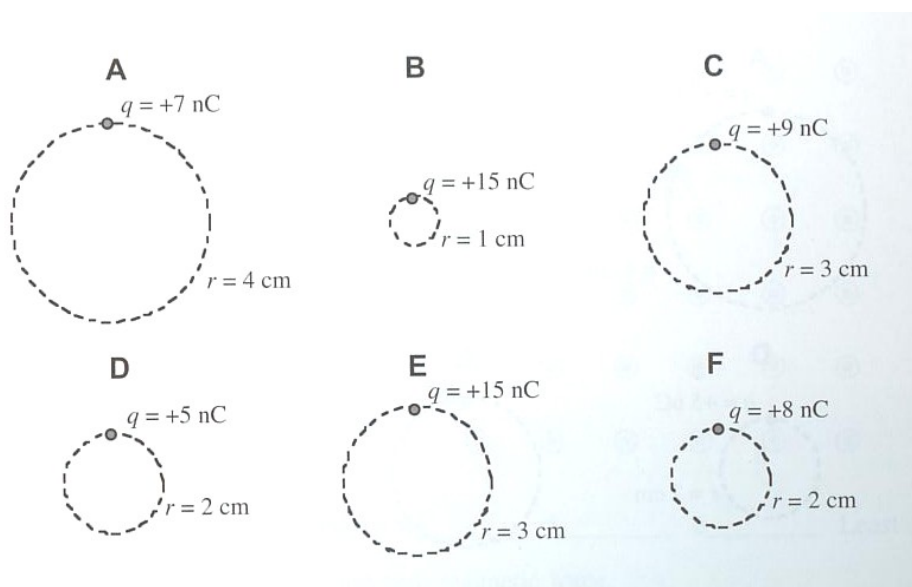
Laat zien dat het product Bqv inderdaad de eenheid N voor F_L oplevert.

37 Geladen vliegtuig

Een vliegtuig krijgt door wrijving met de lucht een lading van $1550 \mu\text{C}$. Bereken de Lorentzkracht op het vliegtuig als het met 800 km/h door het aardmagnetisch veld ($5,0 \cdot 10^{-5} \text{ T}$) beweegt, onder een hoek van 45° .

38 Veldsterktes ordenen

Geladen deeltjes met snelheid zullen in een uniform magnetisch veld een cirkelbaan gaan beschrijven. Alle deeltjes in de figuur hebben dezelfde massa en dezelfde snelheid, maar een verschillende lading. De straal van hun baan varieert eveneens. Zie figuur 4.14.



Figuur 4.14

Orden de situaties A, B, ..., F op basis van de grootste magnetische veldsterkte tot de kleinste.

Grootste veldsterkte ..., ..., ..., ..., kleinste veldsterkte.

In situatie(s) ..., ..., ..., is de veldsterkte even groot.

Leg telkens duidelijk uit hoe je tot je antwoord komt.

39 Veilig wonen

Kosmische straling bestaat uit geladen deeltjes. Leg uit of je beter in Noord-Europa, of in Centraal Afrika kunt wonen als je zo min mogelijk door deze straling getroffen wilt worden.

40 Velden vraagjes

- Leg uit of je een stilstaand elektron in beweging kunt krijgen met een magnetisch veld.
- En met een elektrisch veld?

Een elektron beweegt in een rechte lijn door de ruimte.

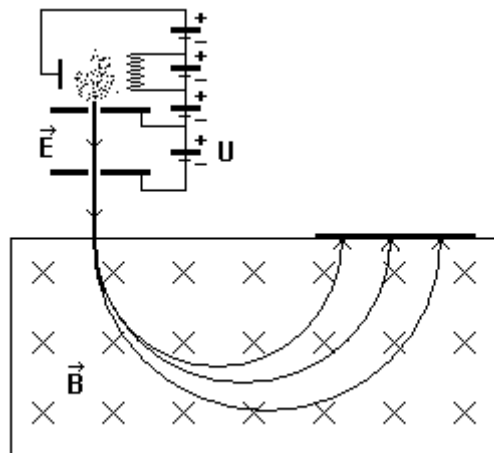
- Beredeneer of er in dit geval een magnetisch veld aanwezig kan zijn.

Een elektron komt een magnetisch veld binnen dat loodrecht op zijn bewegingsrichting staat.

- Beredeneer of de kinetische energie van het elektron zal gaan toenemen, afnemen of gelijk blijven.

41 Massaspectrometer

In figuur 4.15 zie je een vereenvoudigde weergave van een zogenaamde massaspectrometer. Met dit apparaat kan de samenstelling van stoffen worden geanalyseerd.



Figuur 4.15

Allereerst worden de moleculen van de stof geïoniseerd. Deze ionen worden vervolgens in een elektrisch veld versneld. Daarna komen de ionen in een magnetisch veld terecht, waarin ze door de Lorentzkracht een cirkelbaan afleggen. Na een halve cirkel te hebben afgelegd worden de ionen gedetecteerd. Uit de plaats van detectie is de straal van de gevolgde cirkelbaan af te leiden en daarmee de massa/ladingsverhouding van de ionen. We gaan dat eens nader bekijken.

Stel dat een ion met een verwaarloosbare snelheid het elektrische veld binnenkomt. Dit elektrische veld is homogeen en bevindt zich tussen twee metalen platen op een afstand d van elkaar. De platen zijn aangesloten op een spanningsbron met bronspanning U . Voor de veldsterkte E geldt:

$$E = \frac{U}{d}$$

- Druk de snelheid v waarmee het ion het elektrische veld verlaat uit in de lading q van het ion, de massa m van het ion en de bronspanning U .

Dus: $v = \dots$

Vervolgens komt het ion met deze snelheid in een magnetisch veld, waarin het een halve cirkel met straal r aflegt.

- Druk de massa/ladingsverhouding m/q van het ion uit in die straal r , de magnetische veldsterkte B en de bronspanning U .

Dus: $m/q = \dots$

Maak gebruik van je antwoord bij a.

Stikstofgas bestaat uit moleculen N_2 . Er zijn twee stabiele isotopen van stikstof, eentje met massagetal 14 en eentje met massagetal 15. Hierdoor kunnen er drie verschillende stikstofmoleculen voorkomen: ^{14}N - ^{14}N , ^{14}N - ^{15}N en ^{15}N - ^{15}N .

We plaatsen een hoeveelheid stikstofgas in een massaspectrometer en ioniseren de moleculen zodanig dat ze allemaal één elektron tekortkomen. We stellen de bronspanning in op 500 kV en schakelen een magnetisch veld van 0,80 T in.

- Bereken de afstand tussen de plaatsen waar ^{14}N - ^{14}N en ^{15}N - ^{15}N moleculen de detector treffen.
- Bereken of een ^{14}N - ^{15}N molecuul precies midden tussen de ^{14}N - ^{14}N en ^{15}N - ^{15}N moleculen de detector treft.
- Leg uit hoe met behulp van de massaspectrometer de samenstelling van het stikstofgas bepaald kan worden.

Opgaven § 4.4

42 Waar/onwaar

Geef aan of de volgende beweringen *waar* zijn of *onwaar*.

NB Soms valt er over het antwoord wat langer te discussiëren. Verdedig je antwoord maar eens tegenover een medeleerling die een ander antwoord heeft.

- Het Hall effect levert het bewijs voor het feit dat elektronen negatief zijn
- Het Hall effect kan worden gebruikt om de driftsnelheid van de elektronen te bepalen
- Het Hall effect kan worden gebruikt als sensor om verschillende metalen van elkaar te onderscheiden

43 Hall-effect

Je meet met een Hall-sensor met dikte $d = 5$ cm een Hallspanning $U_{\text{Hall}} = 0,2 \mu\text{V}$. Hoe groot is de Lorentzkracht op een elektron in de sensor?

44 Hall-sensor bouwen

Gebruik makend van een kompas weet je altijd waar het noorden is. Dit is mogelijk omdat de aarde zelf een magnetisch veld bezit. Op de evenaar is het aardmagnetisch veld $B_{\text{ev}} = 3,0 \cdot 10^{-5} \text{ T}$ en op de Noordpool $B_{\text{np}} = 6,0 \cdot 10^{-5} \text{ T}$. Je wilt een Hall-sensor bouwen die in staat is de grootte van het aardmagnetisch veld met een relatieve nauwkeurigheid van 2% te meten. Je hebt de beschikking over een stroombron van maximaal 10 A, een digitale voltmeter met een absolute nauwkeurigheid van $1,0 \cdot 10^{-7} \text{ Volt}$, en je hebt de beschikking over het materiaal koper en germanium waarvan je zelf de maten mag bepalen. De ladingsdichtheid van koper bedraagt $n_k = 8,5 \cdot 10^{28} \text{ m}^{-3}$ en van germanium $n_g = 2,5 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$.

Voor welk materiaal kies je? Leg uit hoe je tot deze keuze bent gekomen. Wat zijn de afmetingen van jouw plaatje waarmee de sensor voldoende relatieve nauwkeurigheid heeft?

45 Geen cirkelbaan?

In paragraaf 4.3 heb je kunnen zien dat een bewegend geladen deeltje in een magneetveld een cirkelbaan beschrijft. Leg uit waardoor de elektronen bij het Hall-effect *geen* cirkelbaan doorlopen.

Opgaven § 4.5

46 Zweven

Een trein weegt 100 ton en is 50 m lang. Met behulp van 200 elektromagneten zweeft de trein boven de rails zoals in de tekst beschreven. Door de stroomkabel loopt een stroom van 50 A.

- a. Bereken de magnetische veldsterkte van iedere elektromagneet die nodig is om de trein zwevend te houden.

Het is voor de veiligheid van passagiers van belang dat het systeem stabiel is en de trein niet 'zomaar' van de rails raakt.

- b. Leg uit dat het in de tekst beschreven systeem een opwaartse beweging van de trein automatisch corrigeert.

47 Voortstuwing

In figuur 4.16 zie je een doorsnede van een ander zweeftreinsysteem.

- a. Leg uit hoe de trein in dit geval blijft zweven.

Bij deze trein wordt de Lorentzkracht ingezet om de trein voort te stuwten. Daarvoor wordt onder tegen de baan een kabel aangebracht die zich tussen de stukken weekijzer door slingert. Zie figuur 4.17.

In figuur 4.18 is zo'n stuk kabel en een aantal elektromagneten schematisch weergegeven. In deze figuur zijn de stukken weekijzer weggelaten.

In de situatie die door figuur 4.18 wordt weergegeven, bevindt elektromagneet 1 zich recht onder het stuk kabel tussen de punten P en Q. Het stuk PQ heeft een lengte van 0,26 m en bevindt zich geheel in het magnetische veld van de elektromagneet eronder.

De magnetische veldsterkte B ter hoogte van PQ bedraagt gemiddeld 7,3 T. Door de kabel loopt een stroom van $1,2 \cdot 10^3$ A.

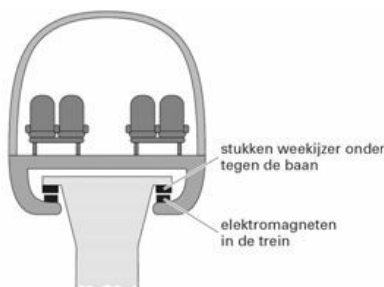
- b. Bereken de grootte van de Lorentzkracht op dit stuk kabel.

In figuur 4.18 is ook te zien dat elektromagneet 2 zich recht onder het stuk kabel tussen de punten R en S bevindt. Zoals is aangegeven, heeft de Lorentzkracht op dit stuk RS dezelfde richting als de Lorentzkracht op stuk PQ. In figuur 4.18 is de richting van de stroom in elektromagneet 1 aangegeven.

- c. Leg uit of de stroom in elektromagneet 2 in dezelfde richting loopt als in elektromagneet 1 of in tegengestelde richting.

De elektromagneten in de trein veroorzaken een Lorentzkracht op de kabel in de baan. In figuur 4.18 is met F_L de richting van de Lorentzkracht aangegeven.

- d. Leg uit waarom de trein naar rechts beweegt.



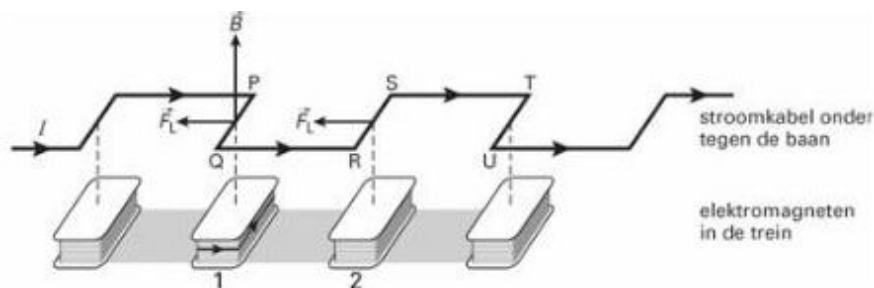
Figuur 4.16



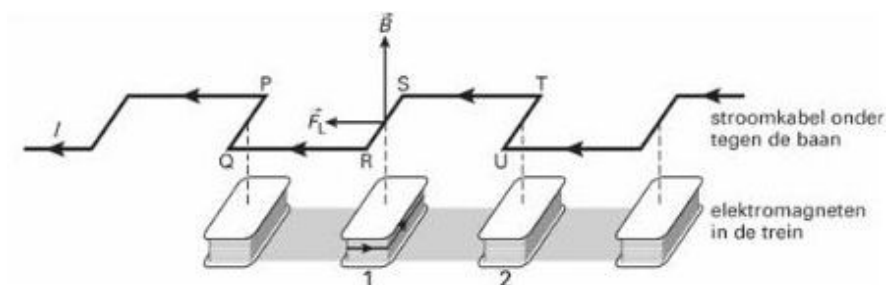
Figuur 4.17

Als de trein beweegt, moet de stroom door de kabel in de baan steeds op het goede moment van richting worden veranderd. Vergelijk de figuren 4.18 en 4.19. De stroom in de kabel verandert van richting als een elektromagneet een afstand gelijk aan QR heeft afgelegd. De afstand QR is 0,26 m. Op een bepaald moment heeft de trein een snelheid van 400 km/h.

e. Bereken de frequentie van de wisselstroom in de kabel in deze situatie.



Figuur 4.18



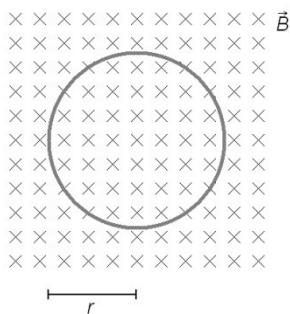
Figuur 4.19

5 Inductie

Magnetisme ‘maken’ met elektriciteit. Onder andere de elektromagneet laat zien dat het kan. Al snel na deze ontdekking ging men op zoek naar het omgekeerde: elektriciteit maken met magnetisme. Vele vruchteloze pogingen dreven de wetenschappers tot wanhoop, totdat Faraday de sleutel tot succes ontdekte. Wat dat is? Daar zul je snel achter komen!

Hoofdstukvraag

Wat is inductie en hoe maken we er gebruik van?



5.1

Magnetische flux

Voordat we zien hoe elektriciteit met magnetisme kan worden opgewekt, introduceren we nog één nieuwe grootte: de **magnetische flux**. Deze grootte geven we aan met de Griekse letter Φ (phi) en we kunnen in formulevorm schrijven:

$$\Phi = BA$$

5.1

B is de magnetische veldsterkte (in T) en A is ‘een’ oppervlakte in dat magnetische veld (in m^2). We spreken ook wel van de magnetische flux door de oppervlakte. Het is waarschijnlijk nogal vaag wat we met zo’n oppervlakte bedoelen, dus laten we maar snel naar een voorbeeld kijken om dit te verduidelijken.

In figuur 5.1 zie je een (metalen) ring die in een magnetisch veld geplaatst is. Deze ring omsluit een oppervlakte, waarvoor geldt: $A = \pi r^2$. De magnetische flux door de ring is dus gelijk aan $BA = B\pi r^2$.

Overigens geldt bij het berekenen van de flux ook weer dat alleen de component van B meetelt die loodrecht op de oppervlakte A staat (figuur 5.2). De eenheid van magnetische flux is $\text{T}\cdot\text{m}^2$ en dit heeft de aparte naam “Weber” (Wb) gekregen.

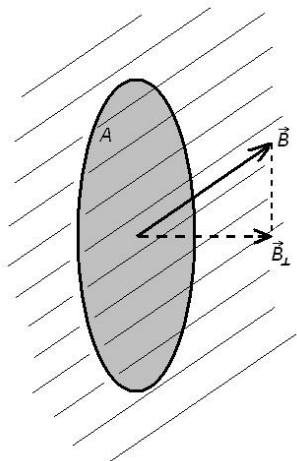
Misschien denk je: leuk dat ik de magnetische flux nu kan uitreken, maar wat is die flux nou precies? De eenvoudigste voorstelling is waarschijnlijk als volgt.

Herinner je dat de dichtheid van de magnetische veldlijnen een maat is voor de sterkte van het magnetisch veld. Hoe dichter de veldlijnen op elkaar staan, hoe sterker het veld is. De magnetische flux door een oppervlakte kun je eigenlijk zien als het aantal veldlijnen dat door die oppervlakte gaat.

Ga maar na; als we de oppervlakte vergroten, zullen er bij een gelijkblijvend magnetisch veld meer veldlijnen door de oppervlakte gaan, en dus wordt de flux groter. Als we de veldsterkte vergroten, wordt de veldlijnedichtheid hoger en zullen er bij een gelijkblijvende oppervlakte meer veldlijnen door die oppervlakte gaan. Ook nu wordt de flux groter.

Beide redeneringen zijn keurig in overeenstemming met vergelijking 5.1!

Figuur 5.1
Een ring in een magnetisch veld.

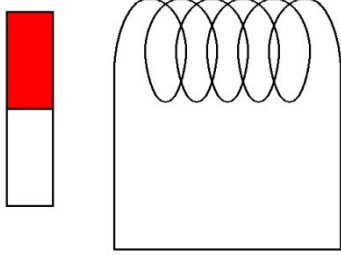


Figuur 5.2
Alleen de loodrechte component van B telt!

Opgaven

Je kunt nu opgave **48** maken.

5.2



Figuur 5.3
Een spoel en een magneet: all it takes!

De wet van Faraday

Veel meer dan een magneet en een eenvoudige schakeling als in figuur 5.3 is er niet nodig om een elektrische stroom op gang te brengen. Bij de eerste pogingen hiertoe, hield men de magneet in de buurt van de spoel. Maar hoe dicht de magneet ook bij de spoel gehouden werd, er ging geen stroom lopen.

Michael Faraday wist uiteindelijk het geheim te ontrafelen. Hij ontdekte dat het er niet zozeer om ging om de magneet bij de spoel te *houden*, maar om de magneet bij de spoel te *brenge*n. Niet een stilstaande, maar een bewegende magneet kan een elektrische stroom op gang brengen!

Nauwkeuriger gezegd: *een veranderende magnetische flux zorgt voor een elektrische spanning*. We kunnen dit ook als vergelijking schrijven (dit is de **Wet van Faraday**):

$$U_{ind} = N \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad 5.2$$

Hierin is U_{ind} de zogenaamde **inductiespanning** (in V) over de spoel, N het aantal windingen van de spoel, $\Delta\Phi$ de fluxverandering (in Wb) en Δt de tijd waarbinnen deze verandering plaatsvindt (in s).

Als de spoel zich in een gesloten stroomkring bevindt, wordt er door de inductiespanning uiteraard een elektrische stroom op gang gebracht. Een beetje zoals een batterij dat ook kan doen.

Het creëren van een elektrische spanning door magnetische fluxverandering wordt ook wel **inductie** genoemd.

Overigens ontstaat een fluxverandering niet alleen door het bewegen van een magneet. Hiermee verander je namelijk B , maar we kunnen natuurlijk ook de oppervlakte A veranderen om een $\Delta\Phi$ te krijgen. In opgave 50 zie je hier voorbeelden van.

Opgaven

Je kunt nu opgaven **49, 50, 51, 52** en **53** maken.

5.3

De wet van Lenz

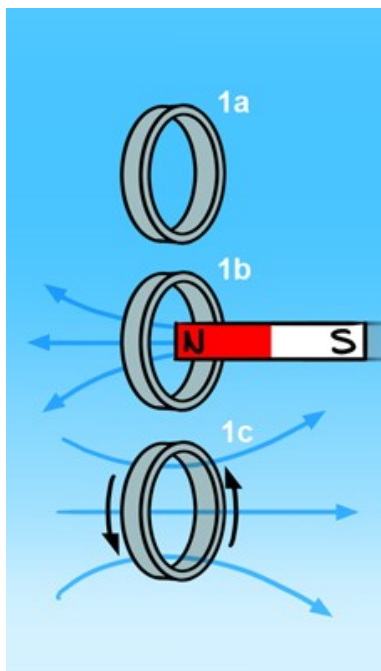
Faraday's wet zegt dus dat een veranderende magnetische flux een elektrische spanning veroorzaakt. In een gesloten stroomkring zal er hierdoor ook een elektrische stroom gaan lopen.

We blijven nu echter nog met een vraag zitten: welke richting gaat die geïnduceerde stroom op lopen? Het antwoord op deze vraag kennen we als de **Wet van Lenz**:

De inductiestroom is zodanig gericht, dat hij de oorzaak van zijn ontstaan tegenwerkt.

Mooi gezegd, maar wat staat hier nu eigenlijk? Laten we eens kijken naar een voorbeeld: een ring met een naderende magneet (figuur 5.4). Door de naderende magneet verandert de flux door het oppervlak van de ring en ontstaat er een inductiespanning over de ring. De ring is een gesloten stroomkring en dus er gaat een inductiestroom lopen.

De oorzaak van deze inductiestroom, is een toenemende magnetische flux. De wet van Lenz zegt nu dat de inductiestroom zodanig zal lopen, dat die toenemende flux wordt tegenwerkt. Hoe kan de stroom dit doen?



Figuur 5.4
De wet van Lenz in werking.

Herinner je dat een stroom door een spoel een magnetisch veld oplevert. De ring is in feite een spoel met één winding. Om de toenemende flux tegen te werken, zal het veld van de ring tegenovergesteld moeten zijn aan het veld van de naderende magneet. De noordpool van de spoel moet dus tegenover de noordpool van de magneet liggen, en de inductiestroom zal dan ook lopen zoals in het onderste plaatje van figuur 5.4.

Spoel



Bekijk de applet op

[PhET Interactive Simulations: Faraday's Electromagnetic Lab](#) en maak de opdrachten uit bijlage A.7.

Practicum: Vallende ballen

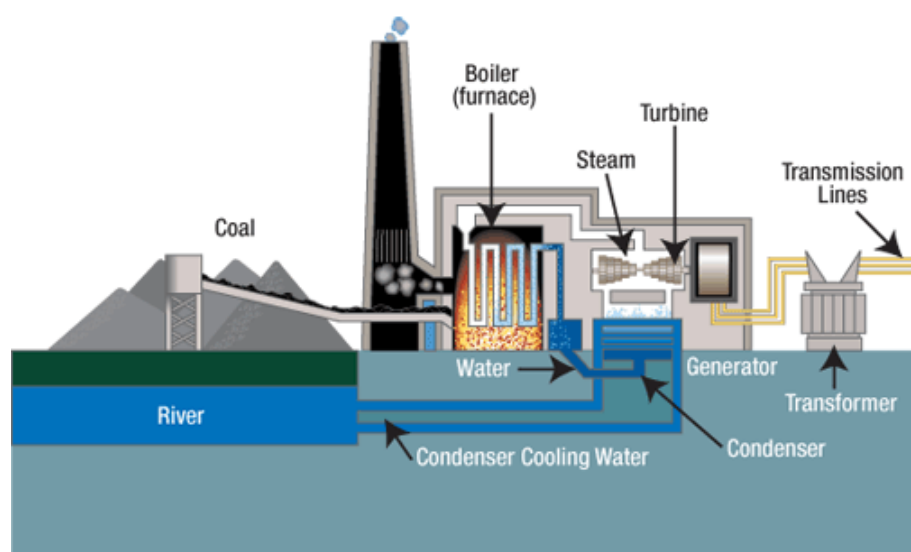
Je hebt al gezien dat gemagnetiseerde kogels zich heel anders gedragen dan 'gewone' kogels. In dit practicum zul je nog meer eigenaardigheden ontdekken. Zie de handleiding in bijlage B.4.

5.4

Generatoren

Vrijwel alle gemakken van onze moderne samenleving maken gebruik van elektriciteit. Kijk maar eens om je heen in je huis- of slaapkamer en tel de apparaten met batterij of stekker. En zelfs allerlei voorwerpen die niet direct op elektriciteit werken, zijn gemaakt in fabrieken waar elektriciteit onmisbaar is. Het opwekken van elektriciteit is dus van groot belang! En gelukkig zegt de wet van Faraday dat het mogelijk is.

Zoals een elektromotor elektriciteit om kan zetten in beweging, zo zetten **generatoren** (ook wel: **dynamo's**) beweging om in elektriciteit. Een bewegende magneet kan immers voor fluxverandering zorgen, en daarmee een elektrische spanning induceren.



Figuur 5.5

Schematische weergave van een kolencentrale

In figuur 5.5 zie je een schets van een elektriciteitscentrale. Door verbranding van kolen, olie of gas (of gebruik te maken van de energie die vrijkomt bij kernsplijting) wordt water aan de kook gebracht. De stoom die hierbij ontstaat wordt door een turbine geperst, die daardoor gaat draaien. Deze turbine drijft de *rotor* van de generator aan, waar een aantal magneten in verwerkt zit. Deze magneten draaien om een spoel heen en zo wordt een inductiespanning opgewekt. Er is nu elektriciteit ‘gemaakt’, klaar voor transport naar onder andere jouw huis.

Generator



Bekijk de applet op

[PhET Interactive Simulations; Faraday's Electromagnetic Lab](#) en maak de opdrachten uit bijlage A.8.

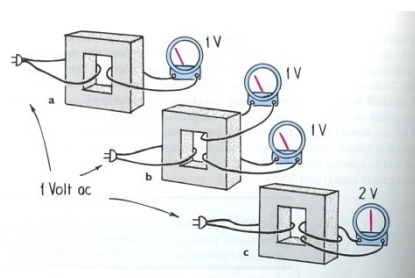
Extra: Transformatoren

5.5

Transformatoren

Tot nu toe hebben we vrijwel steeds gewerkt met ‘gewone’ magneten, die bewogen worden om een elektrische spanning te induceren. We kunnen een fluxverandering echter ook voor elkaar krijgen met elektromagneten. En deze hoeven daarvoor niet eens te bewegen! Het veranderen van de stroom door een elektromagneet zorgt immers al voor een verandering van het magnetisch veld, en daarmee van de magnetische flux.

Een **transformator** maakt hiervan gebruik om een inductiespanning in een tweede spoel op te wekken. De elektromagneet (ook wel de **primaire spoel** genoemd) wordt hierbij aangesloten op een wisselspanning. Door de spoel loopt dan dus een wisselstroom, en daardoor verandert het magnetisch veld van de spoel continu. Dit wekt in de tweede spoel (ook wel de **secundaire spoel**) een inductiespanning op. Deze spanning zal ook een wisselspanning zijn.



Figuur 5.6

Twee keer zoveel secundaire windingen, betekent een twee keer zo hoge inductiespanning.

Mooi, maar wat is nu het nut van een transformator? Het nut zit hem erin dat de grootte van de wisselspanning over de secundaire spoel, niet gelijk hoeft te zijn aan de grootte van de wisselspanning over de primaire spoel. De verhouding tussen de twee spanningen wordt bepaald door de verhouding van het aantal windingen van primaire en secundaire spoel:

$$\frac{U_p}{N_p} = \frac{U_s}{N_s} \Rightarrow$$

5.3

Hierin is U de spanning (in V) en N het aantal windingen. De onderschriften p en s duiden op de primaire en secundaire spoel. Met behulp van figuur 5.6 is te begrijpen waarom vergelijking 5.3 geldt.

In veel apparaten zit een transformator verwerkt om de netspanning van 230 V omlaag te transformeren naar bijvoorbeeld 12 V of een andere lage spanning waarop het apparaat kan werken. In elektriciteitscentrales wordt de spanning juist flink omhoog getransformeerd om de energieverliezen bij het transport van elektriciteit zo klein mogelijk te houden. Opgave 58 zal laten zien hoe dit werkt.

Opgaven

Je kunt nu opgaven **54**, **55**, **56**, **57** en **58** maken.

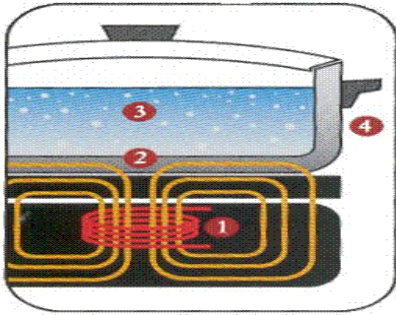
Applet: Transformator



Bekijk de applet op

[PhET Interactive Simulations; Faraday's Electromagnetic Lab](#) en maak de opdrachten uit bijlage A.9.

5.6



Figuur 5.7
Schematische weergave van inductiekoken.

Opgaven

Je kunt nu opgave **59** maken.

Toepassing: Het moderne koken

De Neanderthalers zouden ons voor gek verklaren, maar in de afgelopen decennia is het toch echt werkelijkheid geworden: koken zonder vuur. Natuurlijk is er het elektrisch koken, waarbij de warmteontwikkeling in een elektrische schakeling wordt gebruikt om het eten te verwarmen. Maar de laatste jaren is vooral **inductiekoken** aan een indrukwekkende opmars bezig.

Het is een beetje open deur intrappen, maar inductiekoken maakt gebruik van elektromagnetische inductie. En wel als volgt.

Allereerst is er de kookplaat. Daarin bevinden zich spoelen, die natuurlijk als magneet gaan fungeren zodra de stroom wordt ingeschakeld. Deze stroom is een wisselstroom, waardoor het magnetisch veld van de spoel ook continu wisselt.

Dan is er de pan. We weten dat er een inductiestroom kan gaan lopen als we een andere spoel in het wisselende magnetisch veld houden. Nu is de bodem van een pan geen spoel, maar meer een soort 'homp' metaal. Toch kunnen er ook in zo'n homp metaal stromen gaan lopen: zogenaamde **wervelstromen**. Een wervelstroom is opgebouwd uit 'rondrazende' elektronen. De richting waarin de elektronen bewegen voldoet aan de Wet van Lenz.

De elektrische weerstand van de pannenbodem zorgt in combinatie met de wervelstromen voor warmteontwikkeling, en deze warmte wordt aan het voedsel in de pan doorgegeven.

Samenvatting

Je kunt:

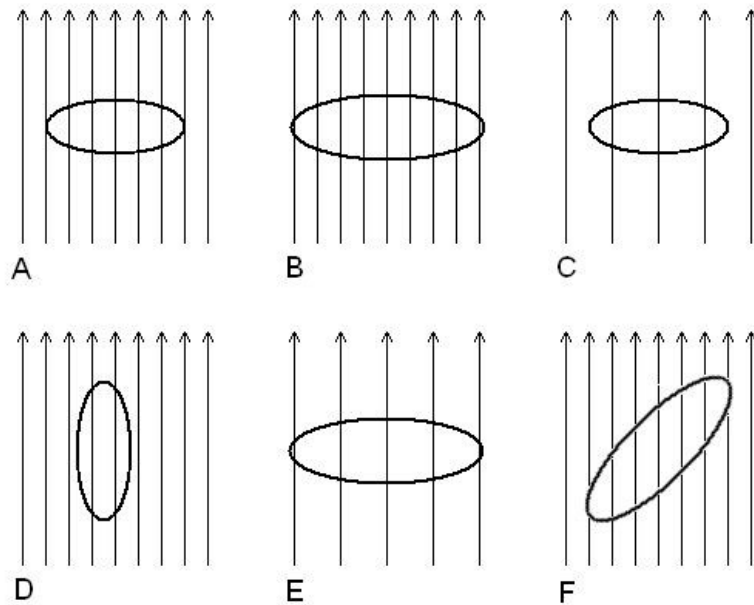
- Omschrijven wat magnetische flux is
- Uitleggen wat de wetten van Faraday en Lenz inhouden
- Uitleggen hoe generatoren en transformatoren werken en waar ze worden toegepast
- In eigen woorden uitleggen hoe inductiekoken werkt

Opgaven § 5.1

48 Magnetische flux rangschikken

Zes metalen ringen zijn in zes uniforme, opwaarts gerichte magnetische velden geplaatst. Sommige ringen hebben een tweemaal zo grote oppervlakte als de andere. Ook de sterkte van de magnetische velden, gerepresenteerd door het aantal getekende veldlijnen, loopt uiteen. Zie figuur 5.8.

Orden de situaties A, B, ..., F naar aflopende magnetische flux door de ring.



Figuur 5.8

Grootste magnetische flux ..., ..., ..., kleinste magnetische flux.
In situatie(s) ..., ..., ..., is de magnetische flux door de ring even groot.

Leg telkens duidelijk uit hoe je tot je antwoord komt.

Opgaven § 5.2

49 Faraday

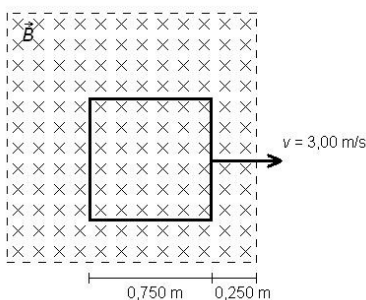
Bekijk vergelijking 5.2 bij de wet van Faraday nog eens en geef bij elk van de volgende uitspraken aan hoe ze met die vergelijking overeenstemmen:

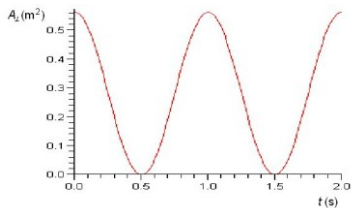
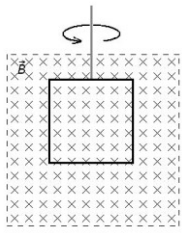
- De inductiespanning is groter als je een sterkere magneet neemt.
- De inductiespanning is groter als je een spoel met meer windingen kiest.
- De inductiespanning is groter als je het toerental opvoert.
- De inductiespanning is groter als je een ijzeren kern in de spoel aanbrengt.

50 Veranderende oppervlakten

In figuur 5.9 zie je een vierkant draadraam dat zich in een uniform magnetisch veld van $0,450 \text{ T}$ bevindt. Het draadraam wordt vanaf $t = 0 \text{ s}$ met een constante snelheid van $3,00 \text{ m/s}$ naar rechts getrokken. De totale weerstand van het draadraam is $0,230 \Omega$.

- Teken in een (I, t) -diagram het verloop van de geïnduceerde stroom voor $t = 0 \text{ s}$ tot $t = 0,5 \text{ s}$.
- Bepaal de richting van deze stroom.





Figuur 5.10

Vervolgens wordt het draadraam in hetzelfde magnetisch veld opgehangen en met constante hoeksnelheid rondgedraaid. In figuur 5.10 is te zien hoe de oppervlakte loodrecht op het magnetisch veld verandert als functie van de tijd.

- c. Schets het verloop van de geïnduceerde stroom voor dezelfde tijdspanne. Een stroom linksom is positief, rechtsom negatief. (*Hint: als de fluxverandering niet constant is, neem je de afgeleide van Φ naar t :*

$$U_{ind} = N \frac{d\Phi}{dt}$$

51 Apparaten uitschakelen

Leg uit waarom het onverstandig is om een apparaat uit te schakelen door een flinke ruk aan de stekker te geven.

52 Magnetisch geheugen

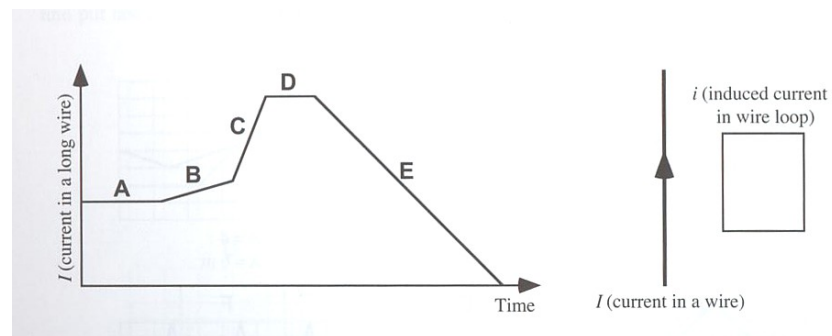
Blader nog eens terug naar paragraaf 2.4.

Leg, met de kennis die je in deze paragraaf hebt opgedaan, uit hoe het magnetisatie-patroon op de tape in een elektrische stroom wordt omgezet.

53 Stroomsterktes rangschikken

In een lange, rechte stroomdraad loopt een stroom I . Vlakbij de stroomdraad bevindt zich een draadraam. Zie figuur 5.11.

De stroomsterkte in de draad verandert zoals in het diagram is aangegeven.



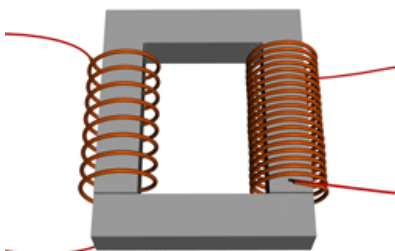
Figuur 5.11

Orden de geïnduceerde stroom in het draadraam voor de intervallen A, B, ..., F van groot naar klein.

Grootste stroom ..., ..., ..., ..., ..., ... kleinste stroom.

In situatie(s) ..., ..., ..., ..., ..., ... is de stroom die geïnduceerd wordt even groot.

Leg telkens duidelijk uit hoe je tot je antwoord komt.



Figuur 5.12

Opgaven § 5.5

54 Transformator met kern

In figuur 5.12 zie je de twee spoelen van een transformator.

- a. Leg uit hoe de weekijzeren kern voor een grotere inductie zorgt.

- b. Leg uit waarom de kern bij voorkeur door zowel de primaire als de secundaire spoel zit.

55 Vermogen en stroom

- a. Beredeneer wat er in een (ideale) transformator zal gelden voor het vermogen dat de secundaire spoel opneemt, ten opzichte van het vermogen dat de primaire spoel levert. (*Hint: denk aan de wet van behoud van energie*)
- b. Beredeneer wat er geldt voor de stroom door de secundaire spoel (I_s), ten opzichte van de stroom door de primaire spoel (I_p).

Vul aan: $\frac{I_{\dots}}{I_{\dots}} = \frac{N_p}{N_s}$

56 Doorbranden

Leg uit waarom de primaire spoel in een transformator snel zal doorbranden als je hem aansluit op een gelijkspanning, in plaats van wisselspanning.

57 Wet van Ohm

Volgens Ohm zijn U en I evenredig. Leg uit hoe het dan kan dat I afneemt als U omhoog getransformeerd wordt.

58 Hoogspanning

Om energieverliezen tegen te gaan, wordt de spanning in een elektriciteitscentrale omhoog getransformeerd vóórdat transport plaatsvindt. Op de bestemming wordt de spanning weer omlaag getransformeerd naar 230 V.

Stel dat de centrale 500 huishoudens van elektriciteit voorziet en elk huishouden 10,0 kW aan vermogen vraagt.

- a. Bereken de totale stroom die naar de huishoudens stroomt.

Als de spanning niet omhoog getransformeerd zou zijn, zou de stroom van vraag a. tevens de stroom door de transportkabels zijn.

- b. Bereken het verloren vermogen in een transportkabel met een weerstand van $5,00 \Omega$.

- c. Bereken het rendement voor deze situatie.

Als de spanning eerst omhoog getransformeerd wordt naar 23, 0 kV, loopt er een veel kleinere stroom door de kabels.

- d. Bereken die stroom.

- e. Bereken ook voor deze situatie het rendement.

Opgaven § 5.6

59 Inductiekoken

Leg uit waarom de kookplaat bij inductiekoken nauwelijks warm wordt zolang er geen pan 'op het vuur' staat, maar de stroom wel is ingeschakeld.

6 Elektromagnetische golven

Straling is overal. We ‘maken’ het zelf in apparaten als mobiele telefoons, magnetrons en radars. En dan is er nog de enorme hoeveelheid natuurlijke straling, afkomstig van bijvoorbeeld radioactief gesteente hier op aarde. Maar ook uit de verste uithoeken van het heelal! Een hoop verschillende soorten straling dus. Maar zijn ze echt wel zo verschillend?

Hoofdstukvraag

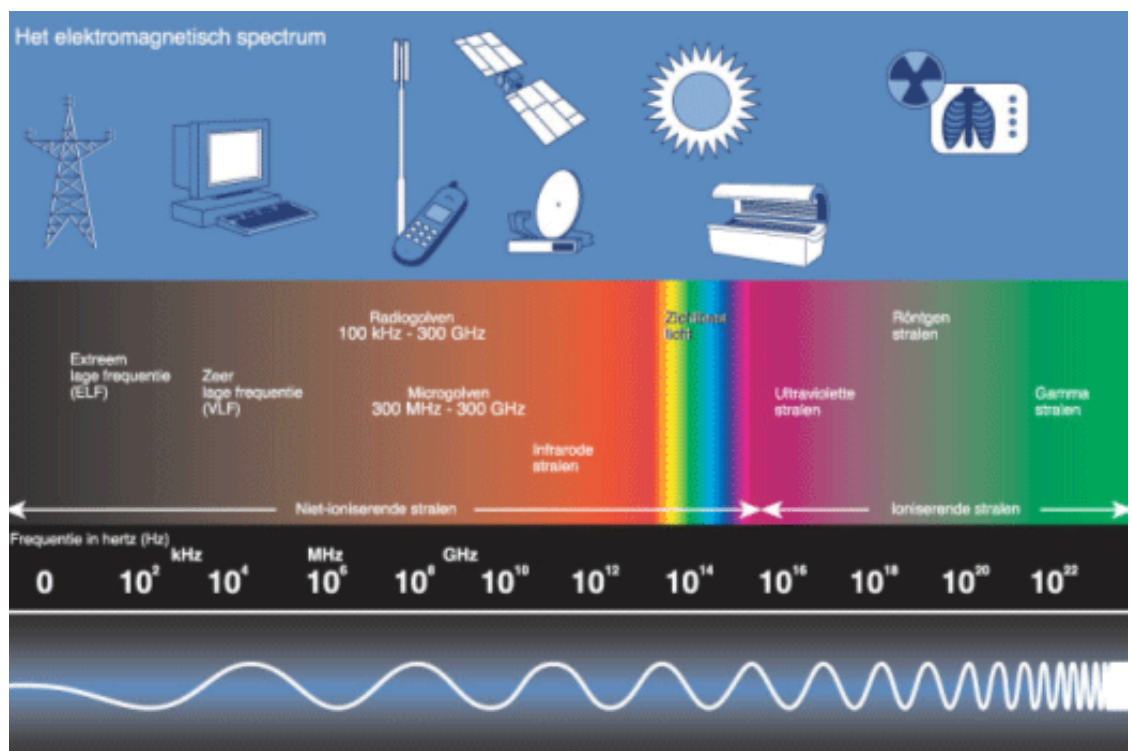
Wat zijn elektromagnetische golven en hoe ontstaan ze?

6.1 Het elektromagnetisch spectrum

Onze ogen zijn gevoelig voor wat we kennen als ‘zichtbaar licht’. Rood, geel, groen, blauw... het hele kleurenspectrum zit erin. Maar het zichtbaar licht maakt zelf ook weer deel uit van een ander spectrum. Dit kennen we als het **elektromagnetisch spectrum**.

Zoals je weet heeft zichtbaar licht een golflengte. De golflengte van rood licht is bijvoorbeeld 700 nm en die van violet licht 400 nm. Zichtbaar licht bestaat namelijk uit **elektromagnetische golven**. Naast zichtbaar licht zijn er nog veel meer van dit soort golven, met golflengtes die uiteenlopen van minieme picometers tot wel kilometers lang. Samen vormen deze golven het eerder genoemde elektromagnetisch spectrum.

In figuur 6.1 vind je een overzicht van het elektromagnetisch spectrum. Zoals je ziet, is alle straling die we in de inleiding besproken hebben in dit spectrum terug te vinden. Straling bestaat dus uit elektromagnetische golven.



Figuur 6.1
Het elektromagnetisch spectrum.

6.2

Ontstaan van elektromagnetische golven

We hebben in de vorige paragraaf gesproken over elektromagnetische golven alsof het de normaalste zaak van de wereld is. Maar feitelijk weten we nog steeds niet wat voor soort golven het nou zijn...

De naam doet terecht vermoeden dat elektriciteit en magnetisme er iets mee te maken hebben. Maar hoe? Daarvoor gaan we even terug naar de wet van Faraday:

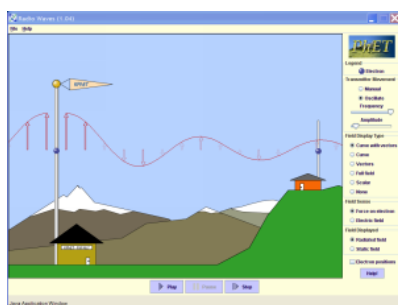
Een veranderende magnetische flux veroorzaakt een inductiespanning.

Oneerbiedig gezegd is dit een nogal ‘oppervlakkige’ formulering van die wet. Wel handig, want met spanningen kunnen we goed verder rekenen. Maar de wet van Faraday wordt een stuk ‘fundamenteler’ als we hem in termen van elektrische en magnetische velden formuleren. In dat geval zeggen we:

Daar waar een veranderend magnetisch veld is, ontstaat een elektrisch veld.

Een andere Brit, James Maxwell, veronderstelde dat het omgekeerde ook moest gelden. Hij bleek daarin gelijk te hebben:

Daar waar een veranderend elektrisch veld is, ontstaat een magnetisch veld.



Figuur 6.2
Elektromagnetische golven uitzenden met een applet.

En nu komt het. Stel dat we een geladen staafje heen en weer schudden. De bewegende lading zal, net als een wisselstroom door een spoel, een veranderend magnetisch veld opwekken.

Door dit veranderend magnetisch veld zal nu volgens Faraday een elektrisch veld ontstaan. Een veranderend elektrisch veld, in dit geval. En wat doet dat veld op zijn beurt? Precies, het veroorzaakt weer een (veranderend) magnetisch veld!

Zo blijven magnetische en elektrische velden elkaar opwekken en samen vormen ze een elektromagnetische golf die vanuit het geladen staafje de ruimte in gezonden wordt.

Zendmasten zenden bijvoorbeeld radiogolven uit door elektronen op en neer te laten bewegen in een antenne.

Opgaven

Je kunt nu opgaven **60** en **61** maken.

Radiogolven



Bekijk de applet op [PhET Interactive Simulations; Radio Waves](https://phetinteractive.org/simulations/radio-waves) en maak de opdrachten uit bijlage A.10

6.3

Voortplanting van elektromagnetische golven

Aan het eind van de 19e eeuw deed Maxwell een van de belangrijkste ontdekkingen in de geschiedenis van de natuurkunde. Door te rekenen aan de elektrische en magnetische velden, kwam hij erachter dat er een specifieke golfsnelheid nodig is om een elektromagnetische golf in stand te houden. Een snelheid van maar liefst 300.000 km/s.

Klinkt dat bekend? Juist! Dit is precies de snelheid van het licht die men al jarenlang kende. Na de ontdekking van Maxwell kon men dan ook niet anders dan concluderen dat zichtbaar licht uit elektromagnetische golven bestaat – en deel uitmaakt van de grote familie die we nu kennen als het elektromagnetisch spectrum.

Opgaven

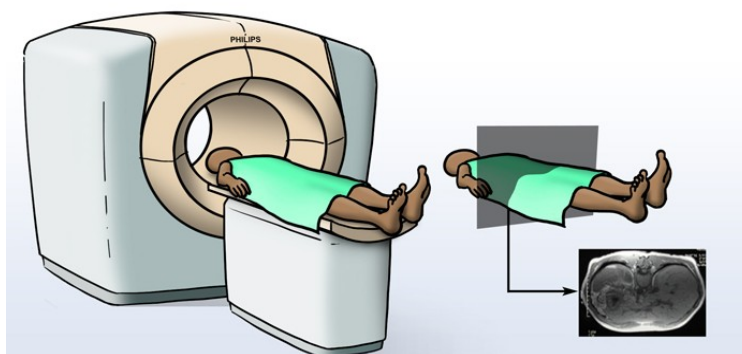
Je kunt nu opgaven **62**, **63** en **64** maken.

6.4

Toepassing: Mensen scannen met MRI

Een van de grootste medische successen was de ontdekking dat men met behulp van röntgenstraling zicht op het menselijk skelet kon krijgen. Zonder de patiënt te opereren! Het lokaliseren van botbreuken werd zo een fluitje van een cent. Natuurlijk wilde men al snel ook andere delen van het lichaam kunnen bekijken, en zo ging de zoektocht naar nieuwe afbeeldingstechnieken voort.

“Magnetic Resonance Imaging” (MRI) is de naam van zo’n techniek. Met MRI kunnen afbeeldingen van diverse soorten weefsel – waaronder de hersenen – worden gemaakt om bijvoorbeeld tumoren op te sporen. Hoe gaat dat nu in zijn werk?



Figuur 6.3
MRI scanners zijn gigantische apparaten.

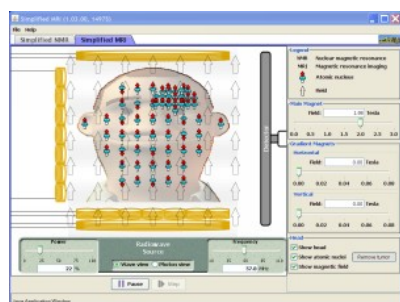
Om te beginnen moet je weten dat er ontzettend veel waterstofatomen in een lichaam zitten. Deze zijn opgebouwd uit één proton en één elektron. In hoofdstuk 3 hebben we al gezien dat elektronen een eigenschap hebben die we spin noemen en dat ze mede daardoor eigenlijk kleine magneetjes zijn. Protonen hebben deze eigenschap ook en daar maakt MRI graag gebruik van.

Eerst wordt er een sterk magnetisch veld rondom het te onderzoeken lichaamsdeel aangelegd (ca. 1 T). In dit veld gaan de protonen zich richten, net zoals een kompasnaaldje in het aardmagnetisch veld.

De tweede stap is het toevoeren van kortdurende elektromagnetische golven: “pulsen”. Deze pulsen beïnvloeden de protonen en brengen ze als het ware uit evenwicht.

Als een puls voorbij is, kan het proton weer terugkeren in zijn oude positie. Hierbij zendt hij zelf echter ook een puls uit. Deze pulsen worden gedetecteerd en zo kan men zien hoe de waterstofatomen in het lichaam verdeeld zijn. Aangezien de waterstofdichtheid per weefselsoort verschilt, kan men nu achterhalen op welke plek welk weefsel zit!

Grappig: MRI werd eerst NMR genoemd, “Nuclear Magnetic Resonance”. Een proton is immers de kern (“nucleus”) van een waterstofatoom. Mensen kregen echter zo’n spookbeeld bij het woord “nuclear”, dat er toch maar van deze naam is afgestapt!



Figuur 6.4
Doktertje spelen met een applet over MRI.



Bekijk de applet op [PhET Interactive Simulations; MRI](https://phetinteractive.com/simulations/mri) en maak de opdrachten uit bijlage A.11

MRI

Samenvatting

Je kunt:

- Verschillende soorten elektromagnetische straling benoemen
- Uitleggen hoe elektromagnetische golven kunnen ontstaan
- Berekeningen met de voortplantingssnelheid van elektromagnetische golven maken
- In eigen woorden uitleggen hoe een MRI scanner werkt

Opgaven § 6.2

60 Golfvraagje

Wat golft er in een elektromagnetische golf?

61 Antennes

Ook om elektromagnetische golven op te vangen worden antennes gebruikt. In figuur 6.5 zie je er twee.

Leg uit van welk deel van de elektromagnetische golf (het E-veld of het B-veld) elke antenne gebruikmaakt bij de omzetting naar een elektrisch signaal.

Opgaven § 6.3

62 Lichtsnelheid

Bereken hoe lang een elektromagnetisch signaal van de aarde naar de maan onderweg is.

Stel dat de zon plotseling uitdooft.

Bereken hoe lang het duurt voordat wij daar op aarde iets van merken.

63 Radio

Een radiostation zendt uit op 100,7 FM.

Zoek uit wat dit inhoudt.

Ook voor elektromagnetische golven geldt de formule $v = \lambda f$.

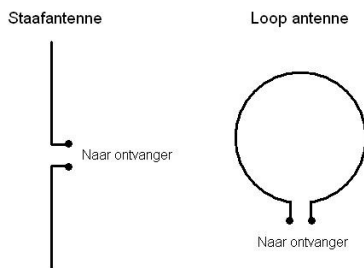
Geef de waarde van v in dit geval.

Bereken de golflengte van de door het radiostation uitgezonden golven.

64 Concert

Wie hoort de zanger eerder? Een persoon in de zaal op 50 m afstand van de boxen, of een persoon op 3000 km afstand met zijn oor vlakbij de radio?

Bereken het verschil in tijdsduur als de temperatuur in de zaal 20 °C is.



Figuur 6.5

7 Nog meer toepassingen

In de loop van deze lessenserie zijn we al een heleboel toepassingen van elektrische en magnetische velden tegengekomen. Maar er zijn er nog veel meer! In dit afsluitende hoofdstuk krijg je de kans om met een groepje klasgenoten zelf te ontdekken wat elektrische en magnetische velden nog meer voor ons kunnen betekenen.

Groepsopdracht

In bijlage C vind je algemene uitleg over de groepsopdracht. Kies een van de toepassingen uit de volgende paragrafen voor de opdracht. In overleg met je docent kun je misschien zelf nog voor een andere toepassing kiezen.

7.1

Beveiligingspoortjes

Inleiding

Jaarlijks lijden winkeliers enorme economische schade doordat klanten artikelen meenemen zonder te betalen. Beveiligingspoortjes kunnen die schade verminderen.

Maar hoe werken ze? Hoe gevoelig zijn ze?

Opdracht

Leg uit met een model of met een poster hoe zo'n beveiligingspoort werkt. Benoem de principes. Laat een proef, een simulatie of een model zien. Maak gebruik van bronnen. Geef ook voorbeelden van andere toepassingen van hetzelfde principe.

Bronnen

 [Wikipedia: Radio frequency identification](#)

 [Wikipedia: Tag](#)

Uit: *Parool Lunchnieuws* 17 september 2007

Rooftassen verboden ROB ROMBOUTS

AMSTERDAM - Rooftassen worden in Amsterdam verboden. Het college van B&W komt met een voorstel het gebruik van speciaal geprepareerde tassen in winkelgebieden te verbieden. Het verbod moet in de Algemene Plaatselijke Verordening (APV) worden opgenomen.

Rooftassen voorkomen dat detectieapparatuur alarm slaat als iemand met gestolen waar de winkel verlaat. Meestal wordt gebruikgemaakt van aluminiumfolie, dat ook wordt verwerkt in tassen die diepvriesproducten koud moeten houden. "Het verbod dient ter ondersteuning van winkeliers," aldus Mirjam Otten, woordvoester van burgemeester Job Cohen. "Er moet wel een intentie van misbruik zijn. Mensen die met zo'n diepvriestas rondlopen en geen kwaad in de zin hebben, worden niet lukraak opgepakt."

"Bij rooftassen gaat het meestal om plastic tasjes waaraan mensen met aluminiumfolie hebben geknoeid," aldus Otten. "Een collega kocht op de Albert Cuypmarkt een blits zilverkleurig rugtasje waarbij werd gezegd dat je ermee door een poortje kunt."

7.2

Afval scheiden met een magneet

In Nederland wordt jaarlijks 15.000 ton PET-afval gerecycled. De totale afvalberg van plastics is nog veel groter en daarmee ook het probleem, want het scheiden van verschillende soorten plastic is tot nog toe commercieel onaantrekkelijk. En wanneer de zuiverheid van gescheiden plastic niet hoog genoeg is, is het product onevenredig weinig waard.

Inleiding

Afval scheiden een must? Natuurlijk! Maar plastic afval scheiden met een magneet? Dat kan toch niet!

Bijgaand artikel legt deze claim. Een mooie belofte voor afvalscheiding in de toekomst. Maar hoe werkt het? Waar wordt het toegepast? Welke mogelijkheden biedt het?

Opdracht

Maak een poster van het scheidingsproces. Leg hiermee het principe uit.

Bereidt een korte presentatie voor. Zorg dat je na afloop tenminste 3 vragen stelt die door de presentatie beantwoord worden. Leerlingen wisten het antwoord op die vragen dus niet van tevoren.

Laat indien mogelijk een proef, een simulatie of een model zien. Maak gebruik van bronnen. Geef ook voorbeelden van andere toepassingen van hetzelfde principe.

Bronnen

 [Tudelft.nl](https://www.tudelft.nl/); [Plastic afval scheiden met een magneet](#)



7.3

Magnetisch koelen

Inleiding

Magnetische koeling is gebaseerd op het verschijnsel dat bepaalde materialen opwarmen wanneer ze in een magnetisch veld worden geplaatst en afkoelen wanneer het magnetische veld wordt opgeheven. Sinds kort is er een materiaal bekend dat dit gedrag ook vertoont bij de karakteristieke temperaturen in de koudetechniek. Voorheen was magnetische koeling alleen mogelijk bij zeer lage temperaturen (cryogeen gebied) en kleine capaciteiten.

Het huidige materiaal kan gebruikt worden in combinatie met permanente magneten, waardoor nog nauwelijks primaire energie nodig is om te koelen. Magnetische koeling heeft voordelen:

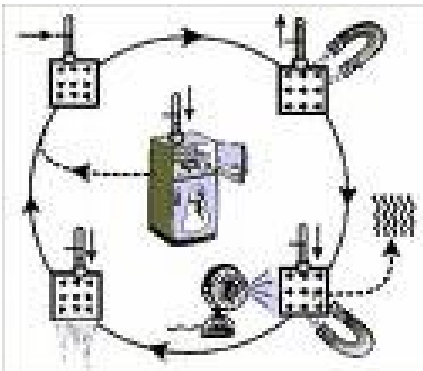
een betere energie-efficiëntie (bij toepassing van permanente magneten),
milieu niet belastend warmteoverdragend medium en stiller.

Daar tegenover staan onbekendheid bij de toepassers, nog prille ontwikkelingsstadium en de noodzaak om met meerdere trappen te werken om een voldoende grote temperatuurgradiënt te kunnen overbruggen bij een acceptabele koudecapaciteit.

Opdracht

Hoe zit dat nu? 'Kennislink' beweert dat materialen afkoelen in een magneetveld, 'Ode' dat ze opwarmen in een magneetveld. Een wonder? Hoe zit dat überhaupt met die magnetische koeling? Waarop is het gebaseerd? Wat zijn de voordelen ervan? Wordt het al commercieel toegepast? Wat staat die toepassing in de weg?

Laat indien mogelijk een proef, een simulatie of een model zien. Maak gebruik van bronnen. Geef ook voorbeelden van andere toepassingen van hetzelfde principe.



Bronnen

-  Natuurkunde.nl; Magnetische koeling
-  Kennislink.nl; Magnetische koelkast
-  Kijk.nl; Koelkast van de toekomst
-  Wibnet.nl; Magnetische koelkast

7.4

Elektromotoren in huis

Inleiding

Ook in huis wemelt het van de elektromotoren. De klok, de stofzuiger, de tandenborstel, de mixer. Je kunt de lijst vast nog wel uitbreiden. Zijn al die elektromotoren hetzelfde? Vast niet. Maar in welke opzichten verschillen ze. Waarom stoppen ze die stofzuigermotor niet in computer?

Opdracht

Maak een lijst van tenminste 10 elektromotoren in huis. Eén ervan kies je uit om uit elkaar te halen. Met een lijmpistool bevestig je de onderdelen op een postervel, zodat er een exploded view ontstaat. Benoem de onderdelen en geef hun functie aan.

Je bereidt een korte presentatie voor, waarin je:

- een zelfgemaakte elektromotor laat zien en het principe ervan uitlegt
- een overzicht geeft van de elektromotoren in huis en aangeeft welke verschillen er zijn
- de poster laat zien waarop je de elektromotor die je uit elkaar gehaald hebt presenteert. Vergeet niet de onderdelen te benoemen en hun functie aan te geven.



7.5

Detectielussen in het verkeer

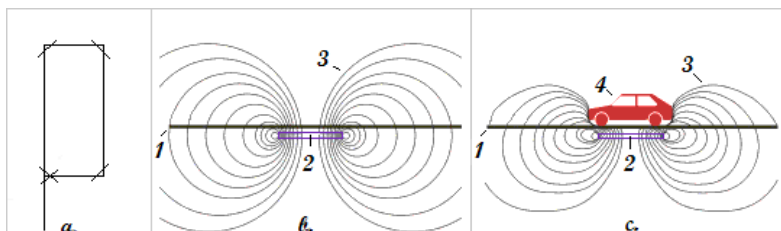
Inleiding

Detectie- of inductielussen worden gebruikt om verkeersgegevens (intensiteit, snelheid) te verzamelen. Die gegevens kunnen gebruikt worden om het verkeer te informeren, adviseren of beboeten. Snelheid en intensiteit worden berekend door twee lussen in de lengte van de rijstrook te frezen, een zogenaamd luspaar.

Opdracht

Zodra een voertuig een detectielus nadert verandert er 'iets', waardoor het voertuig 'gezien' wordt. Zoek uit hoe dat werkt. Gebruik bij je verklaring de begrippen, wetten en regels uit het hoofdstuk.

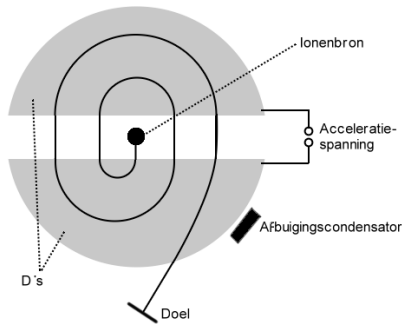
Laat een proef, een simulatie of een model zien. Maak gebruik van bronnen. Geef ook voorbeelden van andere toepassingen van hetzelfde principe.



Bronnen

-  Wikipedia; Detectielus

7.6



Deeltjesversnellers

Inleiding

We hebben al gezien dat geladen deeltjes met elektrische velden tot enorme snelheden versneld kunnen worden. En met magnetische velden kunnen we deeltjes in een cirkelbeweging dwingen. In deeltjesversnellers worden deze eigenschappen van elektrische en magnetische velden gebruikt om geladen deeltjes keihard op elkaar te laten botsen. Maar waarom?

Opdracht

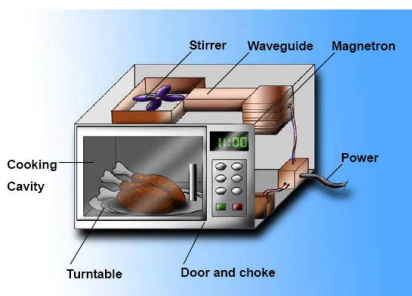
Zoek informatie over verschillende soorten deeltjesversnellers. Leg in een presentatie aan klasgenoten uit hoe elektrische en magnetische velden in deze deeltjesversnellers gebruikt worden, en wat het nut is van deeltjesversnellers.

Laat een simulatie zien ter ondersteuning van jullie verhaal, of bedenk voor de klas een uitdagende opgave over deeltjesversnellers.

Bronnen

 [Wikipedia: Deeltjesversneller](#) - en verdere links in dat artikel

7.7



Magnetrons

Inleiding

Net als bij inductiekoken komt er ook in een magnetron geen vuur aan te pas om eten te verwarmen. Maar het gaat wel heel anders in zijn werk dan inductiekoken! Hoe eigenlijk?

Opdracht

Maak een poster waarop je de werking van een magnetron uitlegt.

Bereidt een korte presentatie voor. Zorg dat je na afloop tenminste 3 vragen stelt die door de presentatie beantwoord worden. Leerlingen wisten het antwoord op die vragen dus niet van tevoren.

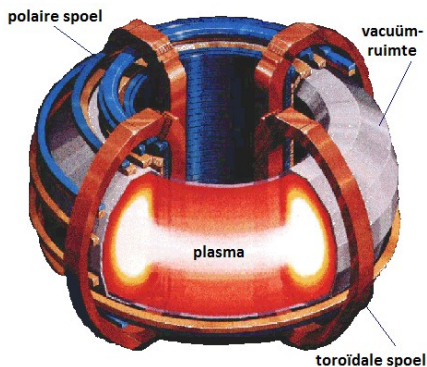
Laat indien mogelijk een proef, een simulatie of een model zien. Maak gebruik van bronnen. Geef ook voorbeelden van andere toepassingen van hetzelfde principe.

Bronnen

 [Wikipedia: Magnetron](#)

7.8

Kernfusie



Inleiding

Schoon, veilig en altijd voorradig. Kernfusie wordt wel gezien als dé energiebron voor de toekomst. Voordat het zover is, moeten echter nog de nodige obstakels overwonnen worden... Kernfusie is bijvoorbeeld alleen mogelijk bij enorm hoge temperaturen, van miljoenen graden Celsius! Geen enkel materiaal kan zulke hoge temperaturen aan en om de fusiedeeltjes bij elkaar te houden kan dus geen 'gewoon' reactorvat worden gemaakt. Hoe kunnen we dit probleem oplossen?

Opdracht

Zoek op hoe kernfusie in zijn werk gaat. Leg dit in een presentatie aan klasgenoten uit, en besteed vooral aandacht aan de manier waarop magnetische velden ingezet kunnen worden bij het opsluiten van de fusiedeeltjes. Zijn er alternatieve oplossingen?

Laat indien mogelijk een proef, een simulatie of een model zien. Maak gebruik van bronnen.

Bronnen

-  Fusie-energie.nl
-  Wikipedia; Kernfusie
-  Wikipedia; Tokamak

7.9

Geluid uit elektriciteit



Inleiding

We luisteren naar muziek uit radio's, Cd-spelers en iPods alsof het de normaalste zaak van de wereld is. Al deze apparaten halen hun energie uit elektriciteit, via het lichtnet of een batterij. Maar geluid is toch trillende lucht? Hoe gaan we van elektriciteit naar trillende lucht?

Opdracht

Achterhaal hoe elektrische signalen in een luidspreker omgezet worden in geluiden en presenteer dit aan je klasgenoten. En hoe zit het met de omgekeerde weg: met een microfoon geluid omzetten in een elektrisch signaal?

Maak zelf een opstelling waarmee je geluid kunt maken met behulp van elektromagnetisme. Maak gebruik van bronnen.

Bronnen

-  Frans van Eeckhout.be; Luidsprekers
-  Technolyceum.nl; Luidsprekers

Bijlage A: Appletopdrachten

Met behulp van applets kun je snel zicht krijgen op de eigenschappen van elektrische en magnetische velden.

Hoofdstukvraag	Wat kun je m.b.v. applets leren over elektrische en magnetische velden?
----------------	---

A.1

John Travoltage

 [PhET Interactive Simulations; John Travoltage](#)

- Wat stellen de blauwe ballen voor en welk teken heeft de lading van John dus?
- Wat valt op als je even wacht met wrijven?
- Als je de vinger zo ver mogelijk van de deurknop verwijderd kun je er veel lading op aan brengen. Verklaar dit.
- Als je even wacht zie je ook een typerend patroon ontstaan van de lading. Verklaar dit.

A.2

Geladen ballonnen

 [PhET Interactive Simulations; Balloons](#)

- Zorg dat de ladingen zichtbaar zijn en wrijf de ballonnen aan de trui.
- Plak de ballon aan de wand en leg uit dat een geladen ballon toch aan een ongeladen wand kan blijven hangen.
- Hoe kun je op de gemakkelijkste manier alle negatieve lading van de trui afhaken?

A.3

IJshockey met ladingen

 [PhET Interactive Simulations; Electric Field Hockey](#)

- Begin met de eenvoudigste situatie ("practice") en breng door het plaatsen van 1 + lading het zwarte bolletje in de goal.
- Ga na wat er met de krachtvector gebeurt als gevolg van de afstand van jouw lading tot de puck. Hoeveel keer langer wordt de vector als je de afstand tussen de ladingen halveert?
- Let tijdens de beweging van de puck op zijn versnelling.
- Zet nu ook het veld (=field) aan.
- Wat valt op als je 2 tegengestelde ladingen op een afstand je van elkaar loslaat en ze even volgt?
- Je kunt een waterstof atoom nabootsen door een puck positief te maken en door tijdens de beweging met een andere lading het elektron een loodrechte snelheidscomponent te geven. Probeer het maar eens. Zet vooral ook de baan ("trace") aan.

A.4 Ladingen en velden

 [PhET Interactive Simulations; Charges and Fields](#)

- Zet het veld en de "grid" aan (met de vinkjes).
- Plaats nu 1 geladen bolletje in het rooster en voeg een oranje bolletje toe. Op dit bolletje verschijnt een krachtvector. Ga na of de afstand tot de bolletjes en de kracht op het oranje bolletje recht evenredig is of kwadratisch. Doe minimaal 3 metingen en noteer ze. Wat is je conclusie?
- Ga nu met de potentiaalmeter (met viziertje) na of de potentiaal recht evenredig of kwadratisch met de afstand is. Doe weer minimaal 3 metingen en trek een conclusie.
- Ga het effect na van het plaatsen van extra bolletjes.

A.5 Staafmagneet

 [PhET Interactive Simulations; Faraday's Electromagnetic Lab](#)

→ Tabblad "Bar magnet"

- Maak met de vinkjes alles zichtbaar en beweeg de magneet. Let op de stand van de kompasnaaldjes.
- Beweeg nu de magneetveldmeter ("Magnetic (B) Field") naar een plaats waar $B_x = B_y$. Hoe groot is de hoek waaronder de kompasnaaldjes staan op deze plaats van het veld? Bereken ook of grootte van B klopt. ($B^2 = B_x^2 + B_y^2$)

A.6 Elektromagneet

 [PhET Interactive Simulations; Faraday's Electromagnetic Lab](#)

→ Tabblad "Electromagnet"

- Zet de veldmeter in de spoel en controleer het effect van het aantal windingen op de veldsterkte.
- Sluit nu de wisselspanningsbron aan en zet hem op de laagste frequentie en de hoogste piekspanning. Wat valt je op?

A.7 Spoel

 [PhET Interactive Simulations; Faraday's Electromagnetic Lab](#)

→ Tabblad "Pick-up coil"

- Beweeg de staafmagneet door de spoel en let op de lichtsterkte van de lamp. Waarom kun je met de lamp de richting van de stroom niet waarnemen?
- Klik nu op de voltmeter en ga met de wet van Lenz na of de bolletjes in de spoel positief of negatief geladen zijn.

A.8**Generator**[PhET Interactive Simulations: Faraday's Electromagnetic Lab](#)

→ Tabblad “Generator”

- Schrijf de energieomzettingen op die plaatsvinden bij het in de applet voorgestelde proces.

A.9**Transformator**[PhET Interactive Simulations: Faraday's Electromagnetic Lab](#)

→ Tabblad “Transformer”

- Wat moet je doen om de lamp op de gelijkspanningsbron te laten branden?
- Sluit de primaire spoel aan op wisselspanning en leg uit wat je hebt gedaan om de lamp zo fel mogelijk te laten branden.

A.10**Radiogolven**[PhET Interactive Simulations: Faraday's Electromagnetic Lab](#)

- Beweeg het elektron op en neer door de paal.
- Zet hem nu op trillen (“oscillate”) met de frequentie op zijn hoogst en amplitude laag (= ongeveer 1/10e van de schaal)
- Leg uit wat er met de amplitude gebeurt als de afstand groter wordt.
- Vink onder "Field display type" "Curve with vectors" aan en schakel af en toe even tussen "Manual" en "Oscillate". Schrijf op wat je opvalt.
- Schakel ook eens naar "Full Field".

A.11**MRI**[PhET Interactive Simulations: MRI](#)

→ Tabblad “Simplified NMR”

1. In het hoofdvenster zie je een aantal trillende atoomkernen voorgesteld.
2. Onder het venster staat het bedieningspaneel van de E.M. golfgenerator. Hiermee kun je het vermogen (“Power”) en de frequentie instellen.
3. In de balk rechts naast het hoofdvenster staat een klein venstertje waarin twee lijnen zijn te zien. Op de bovenste lijn staan de atoomkernen die "in trilling" zijn gebracht. Op de onderste lijn staan de kernen die geen energie van de E.M. bron hebben meegekregen.
4. Ook kun je in de rechterbalk het hoofd magneetveld instellen.

Zet de power op ongeveer 50 %, de hoofdmagneet (“main magnet”) op ongeveer 1 Tesla en stel de frequentie zo in dat het golfje tussen de 2 lijnen in het kleine venstertje precies tussen de 2 lijnen past.

- Wat valt je op?
- Hoe groot is de resonantiefrequentie?
- Zet nu de frequentie naar 10 MHz terug en verklaar wat je waarneemt.

→ Tabblad “Simplified MRI”

- Stel de MRI in met dezelfde waarden als waarmee je met de NMR veel resonantie waarnam. Onderaan in de rechter balk kun je onder het kopje "head" een tumor toevoegen. Doe dit.
- De kunst is nu natuurlijk om zoveel mogelijk fotonen uit de tumor te laten komen en zo weinig mogelijk uit de rest van het hoofd.
- Zoals je ziet is de concentratie van de gevoelige kernen het grootst in de tumor. Omdat ze dicht bij elkaar liggen draaien ze iets moeilijker en hebben dus iets meer energie nodig en dus een hogere frequentie. Regel nu de frequentie voorzichtig op totdat er bijna geen fotonen meer uit de kernen in het hoofd komen.
- Omdat de kernen ook slordiger liggen reageren ze beter op een magneetveld dat een beetje scheef op de bewegingsrichting van de golven staat. Zet nu de horizontale "gradient magnet" op vol en probeer het signaal van de tumor zo duidelijk mogelijk te krijgen.
- Vergelijk jouw resultaat met dat van ander leerlingen en schrijf op wat je opvalt

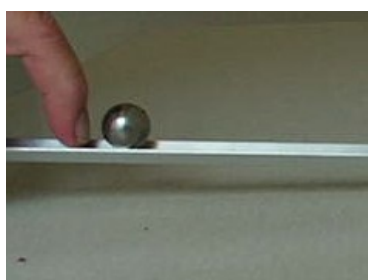
Bijlage B: Practica

Experimenten zijn de basis van de natuurkunde. Ontdek zelf eigenschappen van elektrische en magnetische velden in de volgende practica.

Hoofdstukvraag	Wat leert het experiment?
----------------	---------------------------

B.1

Rollende ballen



Deel 1

Een sterke kogelvormige magneet rolt een flauwe helling af. Hij blijkt te wobbelen, zo nu en dan sterk vertragend om dan weer door te zetten. Een gewone stalen kogel rolt soepel dezelfde helling af.

- Geef een mogelijke verklaring.
- Bedenk een experiment waarmee je je veronderstelling kunt toetsen.
- Voer het experiment uit.

Deel 2

Twee stalen ballen rollen samen van een helling af. De hellingshoek is klein. Samen rollen ze minder snel dan één kogel alleen.

- Geef een verklaring.

Nu wordt aan het eind van de helling een magneet geplaatst. De kogels komen tot stilstand, terwijl een enkele kogel juist met een klap op de magneet schiet.

- Geef een mogelijke verklaring.

Bedenk een experiment waarmee je je veronderstelling kunt toetsen. Voer het experiment uit.

B.2

Veld van een spoel

Hoe hangt grootte en richting van het veld van een spoel af van aantal windingen, de stroomsterkte, de spoellengte, de stroomrichting?



- Zoek in verschillende bronnen hoe dit experiment uitgevoerd kan worden. Overleg met je partner, maak een tekening van de opstelling en een lijst van benodigdheden.
- Leg je meetplan voor aan de docent ter parafering.
- Voer de proef uit.
- Maak een meetrapport.

B.3



B.4

Elektromotoren

Een kogelvormige magneet, een batterij, een schroef en een draadje: dit motortje loopt als een zonnetje. Kan het eenvoudiger?

- Verklaar de werking met een figuur waarin pijlen staan voor stroomrichting en richting van de kracht en richting van de magnetische inductie.
- Hoe kun je de motor de andere kant op laten draaien?
- Hoe kun je het toerental regelen?

Vallende ballen

Deel 1

Twee kogeltjes, één van staal en een kogelvormige magneet worden tegelijkertijd gelanceerd door een verticaal gehouden aluminium buis. De één komt veel later beneden dan de ander.

Geef een verklaring.

Laat nu de magneet door aluminium buizen van verschillende lengte vallen en meet de valtijden.

Maak een tabel en een grafiek.

Formuleer een conclusie.

Deel 2

Een kogelvormige magneet valt door verschillende verticaal gehouden buizen van verschillend materiaal en met dezelfde lengte.

Orden de buizen naar kortste en langste valtijd.

Nu wordt een zaagsnede in de lengterichting van de aluminium buis aangebracht. In een tweede aluminium buis worden de zaagsneden juist dwars op de lengterichting aangebracht.

Orden weer de buizen naar kortste en langste valtijd.

Formuleer een conclusie van deze beide proeven.

Deel 3

Twee metalen ballen- een magneet en een stalen kogel- rollen parallel aan elkaar door een aluminium goot een helling af. Ze starten gelijk, maar de magneet rolt veel langzamer dan de kogel.

Geef een mogelijke verklaring.

Bedenk een experiment waarmee je je veronderstelling kunt toetsen.

Voer het experiment uit.



Bijlage C: Procesbeschrijving groepsopdrachten

Doelen

- In korte tijd als klas info verzamelen over het gekozen onderwerp en dit kort en krachtig presenteren aan de groep zodat iedereen na afloop over alle onderwerpen wat af weet.
- Zelfstandig kennismaken met een voor jou nieuw onderwerp uit de natuurkunde en dat diepgaander bestuderen.
- Leren om planmatig te werken en dit te beoordelen voor jezelf en voor je groepsleden (zie C.1 t/m C.3).

Hoofdstukvraag	Welke bijzondere toepassingen van elektrische en magnetische velden zijn er?
-----------------------	---

Organisatie

- Je gaat werken in groepen. Van 3 tot 5 leerlingen.
- Voor de opdracht staat 10 slu per leerling: Je krijgt 2 contacturen om aan je opdracht te werken en overleg te plegen de rest (8 slu) moet je buiten de lessen om doen.
- Iedere groep organiseert binnen de groep het werk voor ieder individu groepslid. Van deze organisatie wordt een werkverantwoording opgesteld. (Zie C.1 t/m C.3)
- Iedere groep kiest een van de genoemde onderwerpen en geeft door aan de docent welk onderwerp dit geworden is (Eerst komt eerst maalt).

Werkwijze

Over het gekozen onderwerp wordt onderzoek gedaan op de site (uiteraard mogen ook andere bronnen gebruikt worden, als ze maar vermeld worden).

Eisen:

Jullie moeten 5 à 10 leerdoelen en de uitwerkingen daarvan opstellen waarvan jullie vinden dat jullie klasgenoten ze moeten weten na afloop van jullie verhaal.

Let bij het maken op de volgende eindtermen uit het examenprogramma.

Inhoud

- Er wordt een theoretische verklaring gegeven van de verschijnselen en toepassingen.
- Als er een proef(je) mogelijk is moet dat zeker gedaan worden.
- Maak waar mogelijk gebruik van instructievideo's, applets en animaties.

Wijze van presenteren

- Zorg voor een blad (1 A4) met leerdoelen en uitwerkingen daarvan.
- Idem met een goede uitleg van het onderwerp.
- Bereid een praatje van 7 minuten voor waarin je zoveel mogelijk informatie doorgeeft aan je klasgenoten en op hun nivo (mogelijkheden: demoproef, PowerPoint presentatie of een combinatie hiervan).

Beoordeling

Als groep leg je in een logboek je planning vast (C.1). Ook let je op een aantal punten die van belang zijn voor het probleem oplossen, samenwerken en het verzamelen en verwerken van informatie (zie C.2). Waar mogelijk beoordeel je jezelf en enkele andere groepsleden op deze vaardigheden. Ook jullie eigen product beoordeel je als groep (zie C.3). Deze twee documenten lever je in bij de docent.

C.1 Werkverantwoording proces

Logboek van: (groepsleden)

.....

.....

.....

.....

Taak	Benodigde tijd	Datum	Wie

C.2

Werkverantwoording algemene vaardigheden

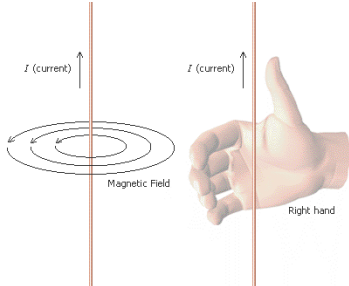
Beoordeling van vaardigheden door jezelf en door groepsleden. 1 = verbeterpunt 2 = gemiddelde 3 = beter dan gemiddeld - = niet van toepassing			
Probleemoplossen	Jezelf	Groeps- lid 1	Groeps- lid 2
Definieert probleem (formuleert onderzoeksvraag, formuleert helder doel)			
Bekijkt zaken vanuit verschillende invalshoeken (houdt overzicht)			
Ordent en interpreteert feiten			
Maakt haalbare planning			
Bewaakt de planning (houdt zich aan deadlines)			
Samenwerken			
Neemt initiatieven (levert ideeën aan, brengt eigen mening naar voren)			
Geeft opbouwende feedback			
Luistert naar teamgenoten			
Hakt knopen door			
Komt afspraken na			
Neemt verantwoordelijkheid voor groepswerkzaamheden (vervult een evenredig aandeel van de taken)			
Informatievaardigheden			
Maakt effectief gebruik van verschillende informatiebronnen			
Beschikt over relevante basiskennis			
Selecteert relevante info (stelt relevante vragen, weet welke info ontbreekt)			
Maakt overzichtelijke aantekeningen			
Beoordeelt info op juistheid / Kan herkomst van info vastleggen			
Kan gefragmenteerde info in eigen woorden interpreteren			
Kan info met verschillende methoden overzichtelijk presenteren (voor groep)			
Trekt gefundeerde conclusies			

C.3**Werkverantwoording resultaat**

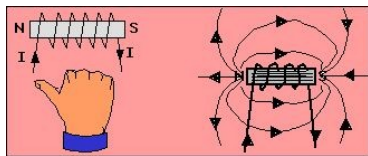
Let op: Het is de bedoeling dat je bij bijvoorbeeld “leerdoelen” niet een punt geeft per onderdeel (*Moeilijkheidsgraad, Duidelijkheid, Juistheid*) maar dat je een totaalscore geeft waarbij je deze 3 punten in gedachten houdt.

		Max. pun- ten	Score door groep	Score door docent
Alles serieus ingevuld		1		
<i>Schriftelijk werk</i>				
Leerdoelen	<i>Moeilijkheidsgraad</i> <i>Duidelijkheid</i> <i>Juistheid</i>	3		
Uitwerkingen	<i>Moeilijkheidsgraad</i> <i>Duidelijkheid</i> <i>Juistheid</i>	3		
Uitleg	<i>Moeilijkheidsgraad</i> <i>Duidelijkheid</i> <i>Juistheid</i>	3		
<i>Presentatie</i>				
Omlijsting	<i>Pakkend beginnen, structuur weergeven en duidelijk eindigen</i>	2		
Wijze van presenteren	<i>Uit het hoofd, taalgebruik, houding)</i> <i>verstaanbaarheid/correct taalgebruik</i>	2		
Inhoud	<i>Moeilijkheidsgraad</i> <i>Duidelijkheid</i> <i>Juistheid</i>	3		
Hulpmiddelen	<i>Verhelderende en verzorgde hulpmiddelen zoals PowerPoint, video, sheets, practicummateriaal, bordgebruik e.d.</i>	2		
Tijd/Efficiëntie	<i>Veel zeggen in weinig tijd</i> <i>Min. 10, max. 15 minuten; per minuut te kort of te lang 1 punt eraf</i>	1		
	<i>Score</i>	20		

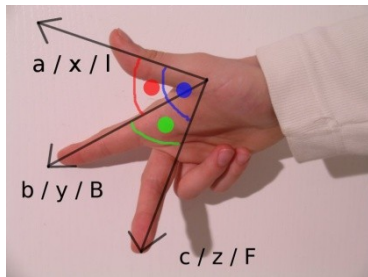
Bijlage D: Regels, regels, regels...



Figuur D.1



Figuur D.2



Figuur D.3



• Stroom als vector

Stroom heeft een grootte en een richting: het stroomt een bepaalde kant op. Daardoor kunnen we stroom als *vector* zien. Maar let op! Elektronen (en andere negatief geladen deeltjes) bewegen tegen de richting van de stroom in. Een elektron dat naar links beweegt, is dus te beschouwen als een stroom die naar rechts beweegt!

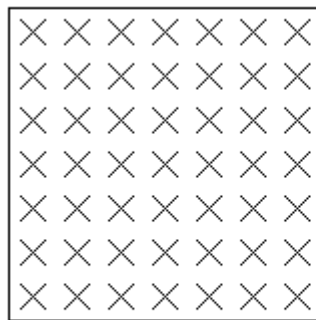
• De richting van de Lorentzkracht e.d.

De richtingen van F , B en I verlopen volgens een vast patroon. Hiervoor zijn enkele ezelsbruggetjes om de richtingen te onthouden.

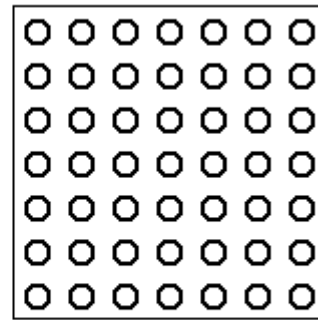
- Magneetveld om stroomdraad: als de duim van je **rechterhand** in de richting van de stroom wijst, krult het magneetveld zich in de richting van je vingers om de draad heen (figuur D.1).
- Noordpool van een elektromagneet: als je de vingers van je **rechterhand** in de richting van de stroom om de spoel krult, wijst je duim naar de Noordpool (figuur D.2).
- Lorentzkracht: neem je **rechterhand** als in figuur D.3. Je duim wijst in de richting van I , je wijsvinger in de richting van B en je middelvinger in de richting van F .

• Tekonventie

Vaak tekenen we een 2D aanzicht van een 3D situatie. Kruisjes geven aan dat de grootte (stroom, magnetisch veld, ...) het papier in wijst; rondjes geven aan dat de grootte het papier uit wijst (figuur D.4).



Papier in



Papier uit

Figuur D.4