

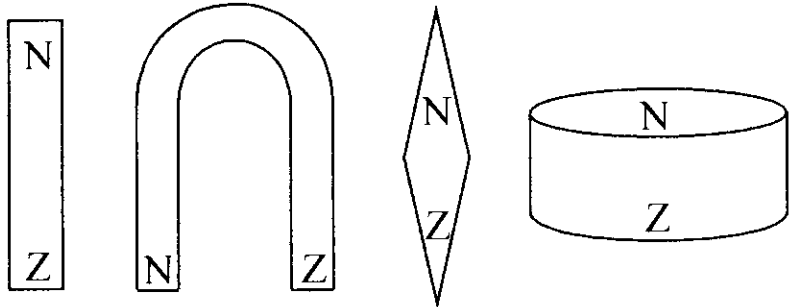
# MAGNETISME

- § 1 Magneten
- § 2 Magnetische veldlijnen
- § 3 Elektromagneten
- § 4 Inductiespanning
- § 5 Inductiestroom
- § 6 Transformatoren
- § 7 Zelfinductie van een spoel

# § 1 Magneten

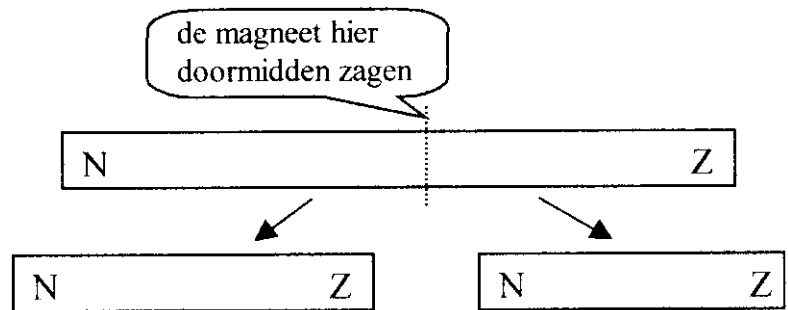
## Magneten

Magneten hebben de eigenschap dat ze drie stoffen kunnen aantrekken, namelijk ijzer, nikkel en kobalt. Voorbeelden van magneten zijn staafmagneten, hoefijzermagneten, naaldmagneten en schijfmagneten. Zie de figuren hiernaast. Deze magneten heten permanente (= blijvende) magneten, omdat er onder normale omstandigheden gedurende zeer lange tijd een magnetische werking vanuit gaat. In de figuren staan de letters N en Z. Hun betekenis wordt hierna toegelicht.



## Polen van een magneet

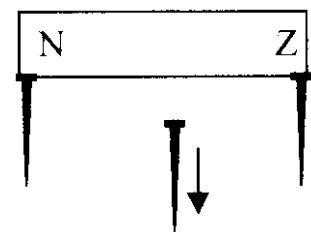
De uiteinden van een magneet heten de polen. Een magneet heeft altijd een noordpool (N) en een zuidpool (Z). Noord- en zuidpool kun je niet van elkaar scheiden; ze horen bij elkaar als voor- en achterkant. Als een staafmagneet bijvoorbeeld doormidden gezaagd wordt, dan zal elke helft automatisch een noord- en zuidpool krijgen. Zie de figuur.



## Krachtwerking van magneten

Twee magneten zullen elkaar aantrekken als de noordpool van de ene magneet bij de zuidpool van de andere magneet in de buurt komt. Omgekeerd zullen de magneten elkaar afstoten als de twee noordpolen of de twee zuidpolen bij elkaar in de buurt komen. **Samengevat: ongelijknamige polen trekken elkaar aan en gelijknamige polen stoten elkaar af.** Opvallend is dat de magneten elkaar hierbij niet hoeven aan te raken. Magneten vertonen ook krachtwerking op afstand.

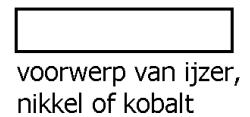
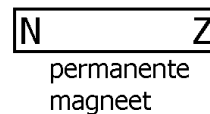
**De krachtwerking van een magneet is het sterkst bij de polen en het zwakst tussen de polen in.** Zo zullen ijzeren voorwerpen (zoals spijkers) wel aan de uiteinden van een staafmagneet blijven hangen maar niet aan het middenstuk. Zie de figuur hiernaast.



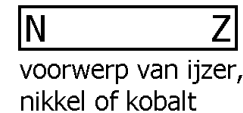
## Magnetische influentie

Als een (permanente) magneet in de buurt van een oorspronkelijk niet magnetisch voorwerp van ijzer, nikkel of kobalt gehouden wordt, dan zal dit voorwerp tijdelijk zelf ook een magneet worden. Het voorwerp verliest zijn magnetisme meestal weer op het moment dat de magneet wordt weggehaald. Dit verschijnsel heet **magnetische influentie**. Zie de figuur hiernaast.

geval 1: grote afstand; geen influentie



geval 2: kleine afstand; wel influentie

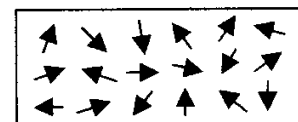


Het is deze magnetische influentie die ervoor zorgt dat magneten voorwerpen van ijzer, nikkel en kobalt aantrekken. Aan de kant van de noordpool (zuidpool) van de permanente magneet ontstaat er namelijk een zuidpool (noordpool) in het voorwerp. De vorige figuur (met de spijkers) is een voorbeeld van magnetische influentie. Merk op dat er bij magnetische influentie dus nooit sprake is van afstoting.

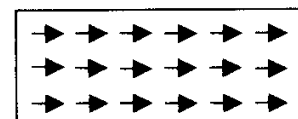
Weekijzer is ijzer met een heel laag koolstofgehalte (minder dan 0,2%). **Weekijzer heeft de eigenschap dat het makkelijk te magnetiseren is, maar zijn magnetisme weer snel na het weghalen van de magneet verliest.** Weekijzer is dus het tegenovergestelde van een permanente magneet. Weekijzer wordt toegepast in onder andere elektromagneten (zie paragraaf 3).

## Elementairmagneetjes

Het verschijnsel van magnetische influentie kan als volgt verklaard worden. Elk ijzer-, nikkel en kobaltatoom is eigenlijk een zeer klein magneetje: een zogenaamd elementairmagneetje. In niet-magnetisch ijzer (of nikkel of kobalt) wijzen deze elementairmagneetjes in vele verschillende richtingen. Daardoor werken ze elkaars werking tegen en is er aan de buitenkant geen magnetisch effect merkbaar. Als er echter een magneet in de buurt van het ijzer gehouden wordt, dan gaan alle elementairmagneetjes (min of meer) in dezelfde richting wijzen. Daardoor versterken de elementairmagneetjes elkaars werking en wordt het ijzer zelf een magneet. Zie de figuur hiernaast (slechts schematisch weergegeven).



elementairmagneetjes  
verzwakken elkaars werking

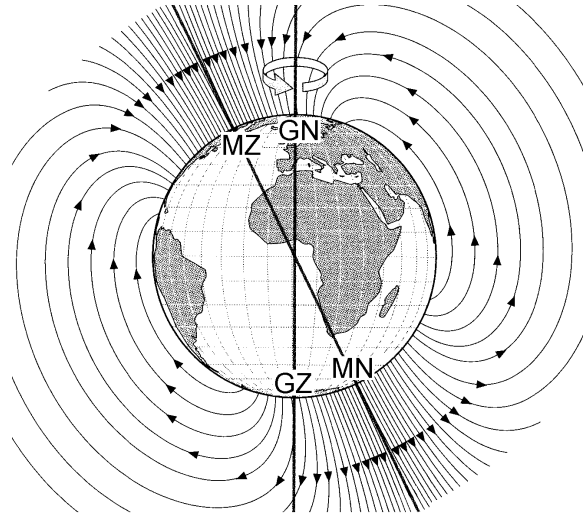


elementairmagneetjes  
versterken elkaars werking

## Aardmagnetisme

De aarde kan je eigenlijk ook opvatten als één grote magneet. Zie de figuur hiernaast. De magnetische zuidpool (MZ) ligt in het noorden van Canada. Aan de 'onderkant' van de aarde bevindt zich de magnetische noordpool (MN). De verticale as in de figuur stelt de draaiingsas van de aarde voor. Deze doorkruist het aardoppervlak bij de geografische noordpool (GN) en de geografische zuidpool (GZ). Uit de figuur blijkt duidelijk dat de MZ en de MN niet samenvallen met de GN en de GZ.

Een kompasnaald is een klein magneetje dat draaibaar is opgesteld. De kompasnaald zal zo'n positie innemen dat zijn noordpool naar de MZ wijst en/of zijn zuidpool naar de MN.



# Opgaven bij § 1

## Opgave 1

Noem drie stoffen die een magneet kan aantrekken.

## Opgave 2

Wat is het kenmerk van permanente magneten?

## Opgave 3

Geef vier voorbeelden van permanente magneten.

## Opgave 4

Wat is het kenmerk van weekijzer? Laat de chemische samenstelling buiten beschouwing.

## Opgave 5

Vul de open plekken in. De krachtwerking van een (staaf)magneet is bij de polen het \_\_\_\_\_ en in het midden het \_\_\_\_\_.

## Opgave 6

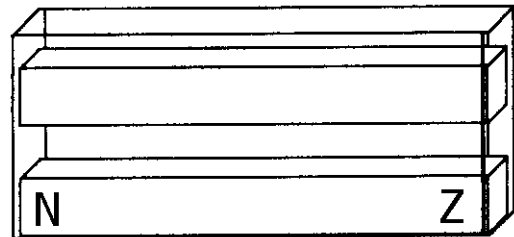
Wat wordt bedoeld met magnetische influentie?

## Opgave 7

Een hoeveelheid koperen en ijzeren spijkertjes zijn door elkaar geraakt. Hoe kun je ze makkelijk sorteren? Leg je antwoord uit.

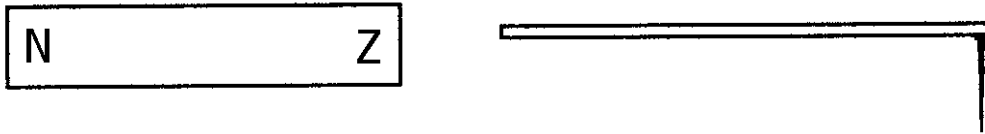
## Opgave 8

Een staafmagneet ligt op de bodem van een doorzichtig plastic bakje. Zie de figuur hiernaast. Er wordt een tweede staafmagneet in het bakje gelegd. Deze blijft boven de eerste magneet zweven. Geef de polen van de zwevende magneet aan.



### Opgave 9

In de onderstaande figuur wordt een ijzeren staafje in het verlengde van een staafmagneet gehouden. Aan het uiteinde van het staafje hangt een dun ijzeren spijkertje. Leg uit waarom het spijkertje aan de staaf blijft hangen terwijl geen van beiden van oorsprong magneten zijn. Geef in de figuur aan waar de noord- en zuidpool zitten van zowel het staafje als het spijkertje.



### Opgave 10

Deze vraag heeft betrekking op de vorige vraag. Geef van de onderstaande zinnen aan of ze waar of niet waar zijn. Leg je keuze kort uit.

- Als de afstand tussen de magneet en het staafje zou worden verkleind zou het spijkertje waarschijnlijk van het staafje vallen.
- Als het spijkertje naar het midden van het staafje zou worden geschoven zou het spijkertje waarschijnlijk van het staafje vallen.
- Als het staafje niet van ijzer maar van tin zou zijn gemaakt zou het (ijzeren) spijkertje toch aan het staafje blijven hangen.
- Als het spijkertje een klein (dun) kompasnaaldje zou zijn zou dit waarschijnlijk van het staafje vallen.

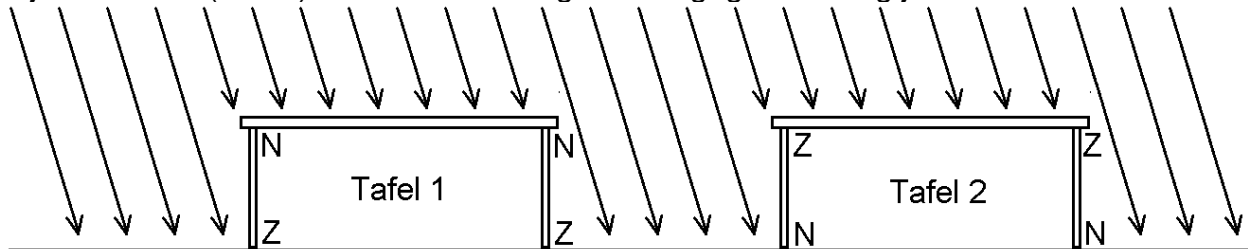
### Opgave 11

Een leerling heeft twee even grote staven. Eén staaf is een permanente magneet (staafmagneet); de andere staaf bestaat uit weekijzer. Aan de buitenkant kan hij niet zien welke staaf de permanente magneet is. Beschrijf kort een manier om toch te weten te komen welke staaf de permanente magneet is zonder andere voorwerpen te gebruiken.

### Opgave 12

Vaak blijken de ijzeren of stalen poten van een tafel of een stoel onder invloed van het aardmagnetisch veld gemagnetiseerd te zijn. Dit is in de onderstaande figuur getekend. De pijlen stellen het magnetisch veld voor zoals dat in het noorden (bijvoorbeeld in Europa en in Noord-Amerika) het geval is. De N en Z bij de poten geven de noord- en zuidpool aan.

Bij welke tafel (1 of 2) staan de N en Z goed aangegeven? Leg je antwoord uit.



Ter informatie het volgende.

Als je een kompasje vlak boven de vloer bij één van de poten houdt, is de kans groot dat het kompasnaaldje naar deze poot wijst. Als je het kompasje vervolgens langzaam langs de poot naar boven beweegt, draait het naaldje halverwege van richting om.

## § 2 Magnetische veldlijnen

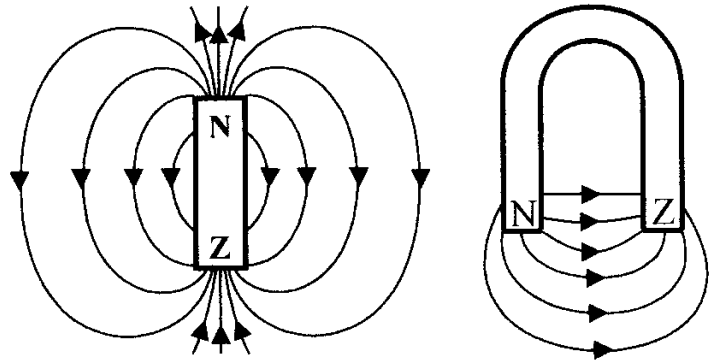
### Magnetische veldlijnen

De ruimte waarin een magneet een magnetische kracht kan uitoefenen noemen we het *magnetische veld* van de magneet. Je kunt het veld van een magneet zichtbaar maken met behulp van ijzervijzel.

Ijzervijzel rangschikt zich in de buurt van een magneet. Er ontstaat een patroon van kromme lijnen.

Deze lijnen noemen we *veldlijnen*.

Zie de figuren hiernaast. Alle veldlijnen bij elkaar noemen we het veldlijnenpatroon.

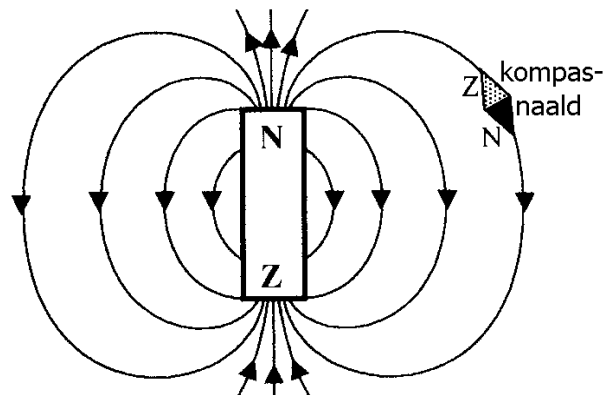


**De veldlijnen geven de richting van het magnetische veld aan. Volgens afspraak lopen de veldlijnen buiten de magneet van de noordpool naar de zuidpool.**

### Een kompasnaald in een magnetisch veld

Een kompasnaald is een magneetje dat in alle richtingen kan draaien. Met een kompasnaald kan men de richting van een magneetveld eenvoudig bepalen. Hierbij geldt de volgende regel. Zie ook de figuur hiernaast.

**Het noorden van de kompasnaald wijst steeds in de richting van de veldlijn op die plaats.**



Je kunt de loop van een veldlijn eenvoudig met een kompasnaald volgen. Je moet de kompasnaald dan langzaam in de richting van zijn noordpool vooruit bewegen.

### Eigenschappen van veldlijnen

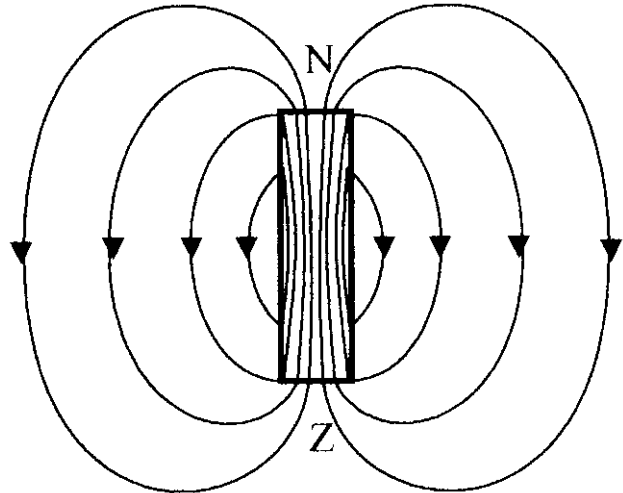
**De eerste eigenschap van veldlijnen is dat ze elkaar niet kunnen snijden.**

Veldlijnen geven namelijk de richting van het magnetisch veld aan. Als twee veldlijnen elkaar zouden snijden, dan zouden er in het snijpunt twee richtingen van het veld zijn en dat kan natuurlijk niet.

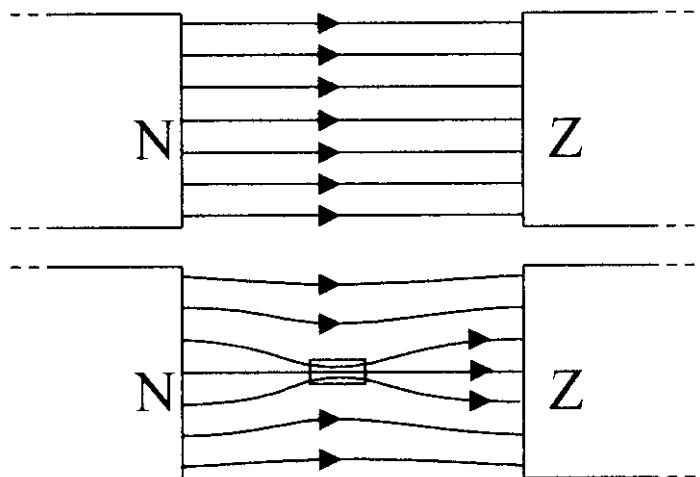


**De tweede eigenschap van veldlijnen is dat de afstand tussen de veldlijnen kleiner is naarmate het magneetveld sterker is.** In de bovenstaande figuren is te zien dat de afstand tussen de veldlijnen het kleinst is bij de magneetpolen. Daar is de krachtwerking van de magneten het grootst, zoals we geleerd hebben in de vorige paragraaf.

**Als derde eigenschap van veldlijnen kan worden genoemd dat veldlijnen geen begin en geen eind hebben maar een gesloten weg vormen.** Zoals eerder gezegd is lopen de veldlijnen **BUITEN** de magneet van de noordpool naar de zuidpool. **BINNEN** de magneet lopen de veldlijnen echter terug van de zuidpool naar de noordpool. Zodoende is er toch sprake van een gesloten weg. Zie de figuur hiernaast.



**Als vierde eigenschap van veldlijnen geldt dat veldlijnen “liever” door ijzer (of nikkel of kobalt) lopen dan door lucht.** Zie de figuren hiernaast. Hierin bekijken we het magnetisch veld tussen de noordpool van de ene magneet en de zuidpool van de andere magneet. De veldlijnen “steken recht over” als er alleen maar lucht tussen de polen zit. Als er een ijzeren staafje tussen de polen wordt gebracht zullen de veldlijnen bij voorkeur door het staafje lopen. Op andere plaatsen wordt het magnetisch veld dan juist zwakker (grotere afstand tussen de veldlijnen).



#### Opmerking

We kunnen het ontstane magneetveld rond het staafje opgebouwd denken uit twee andere magneetvelden namelijk 1) het magneetveld zonder staafje (bijna rechte veldlijnen) en 2) het magneetveld dat door het staafje zelf wordt opgewekt. Het staafje is door magnetische influentie zelf een magneet geworden met zijn noordpool rechts en zuidpool links. Binnen het staafje versterken beide velden elkaar; op andere plaatsen is er juist sprake van verzwakking.

## Opgaven bij § 2

### Opgave 1

Met ijzervijlsel kun je bepalen hoe veldlijnen rond een staafmagneet lopen. Een nadeel hiervan is echter dat het magneetveld op veel plaatsen te zwak is om het ijzervijlsel te richten. In zo'n situatie kan een kompasnaald uitkomst bieden. Leg uit hoe je hiermee ook de loop van veldlijnen kunt bepalen.

### Opgave 2

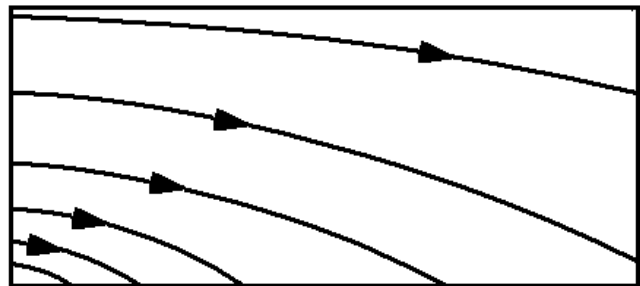
Veldlijnen lopen buiten de magneet van de \_\_\_\_\_-pool naar de \_\_\_\_\_-pool.

### Opgave 3

Geef vier eigenschappen van veldlijnen.

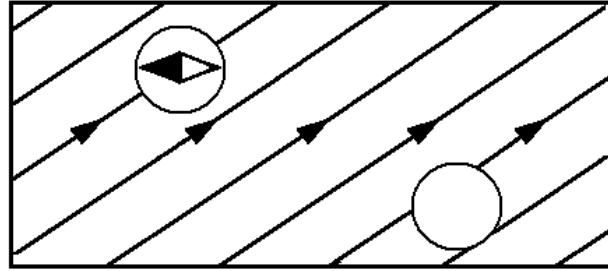
### Opgave 4

In een bepaalde ruimte bevindt zich een magnetisch veld. Zie de figuur hiernaast. In de figuur zijn veldlijnen getekend. Schrijf in de figuur de letter A op de plaats waar het veld het zwakst is en de letter B op de plaats waar het veld het sterkst is. Licht je keuze toe.



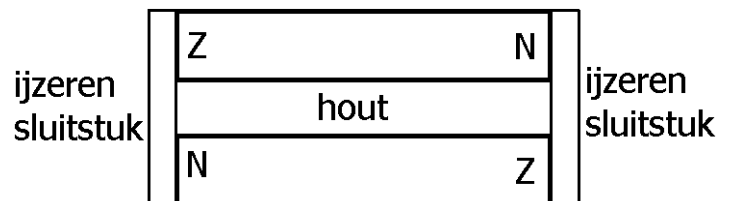
### Opgave 5

In een bepaalde ruimte heerst een homogeen magnetisch veld. Dat wil zeggen dat het veld in elk punt even sterk is en dezelfde richting heeft. Zie de figuur hiernaast. In de ruimte bevinden zich twee kompasnaalden (de noordpool is zwart). De linker naald kan niet draaien; de rechter naald wel. Teken de stand van de rechter naaldmagneet.



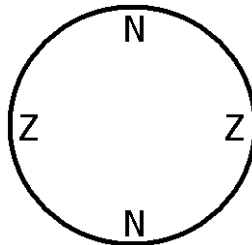
### Opgave 6

Als staafmagneten opgeborgen worden, dan kunnen zij het beste in groepjes van twee bij elkaar liggen zoals in de figuur hiernaast is afgebeeld. Dankzij het stukje hout kunnen de magneten niet naar elkaar toe schuiven. Noem twee voordelen van de twee ijzeren sluitstukken.



### Opgave 7

Men maakt voor bepaalde doeleinden schijfjes van magnetisch materiaal met meerdere noord- en zuidpolen. Zie de figuur hieronder. Teken enkele veldlijnen in en om het schijfje.



Opgave 8

Teken enkele veldlijnen die horen bij het veld dat de magneten in de figuur hieronder samen opwekken.



Opgave 9

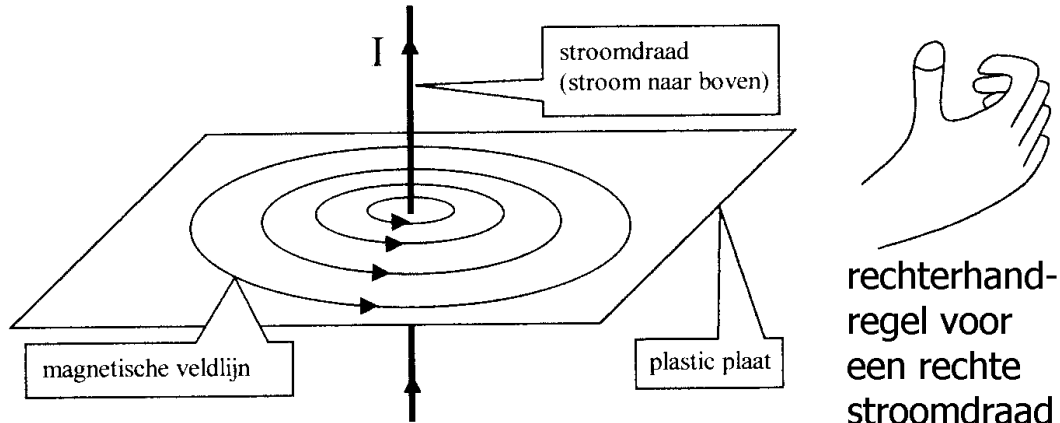
Teken enkele veldlijnen die horen bij het veld dat de magneten in de figuur hieronder samen opwekken.



## § 3 Elektromagneten

### Veldlijnen rond een stroomdraad

Als er door een draad een elektrische stroom (symbool  $I$ ) loopt, dan ontstaat er rond die draad een magnetisch veld. Dat kan als volgt aangetoond worden. Een recht stuk koperdraad wordt dwars door een plastic plaat gestoken. Zie de onderstaande figuur. Op de plaat wordt ijzervijlsel gestrooid. Als er door de draad een (grote) elektrische stroom gestuurd wordt, dan gaan de ijzerdeeltjes zich in cirkelbanen rangschikken (tijdens het aantikken van de plaat). Het middelpunt van deze cirkelbanen is het punt waar de stroomdraad door de plaat gestoken is.



De magnetische veldlijnen rond een rechte stroomdraad blijken dus cirkels te zijn. Zoals hiervoor besproken is, hebben veldlijnen altijd een richting. Bij nader onderzoek (bijvoorbeeld met behulp van een kompasnaald) blijkt dat de veldlijnen rechtsom lopen als je in de richting van de elektrische stroom kijkt (dus van onder naar boven). Als de elektrische stroom van richting omkeert, keert ook de richting van de veldlijnen om.

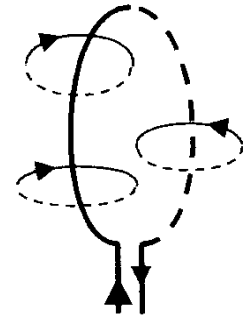
De richting van de veldlijnen rondom een rechte stroomdraad kan altijd gevonden worden met de "rechterhandregel voor een rechte stroomdraad". Deze werkt als volgt. Zie ook de bovenstaande figuur

**Als de duim van je rechter hand in de richting van de elektrische stroom wijst, wijzen de vingers in de richting van de veldlijnen.**

Ga met de rechterhandregel na dat als de stroomrichting omkeert, de veldlijnen ook van richting omkeren. Merk op dat elke veldlijn rond een stroomdraad een gesloten weg vormt, zoals in de vorige paragraaf reeds opgemerkt was.

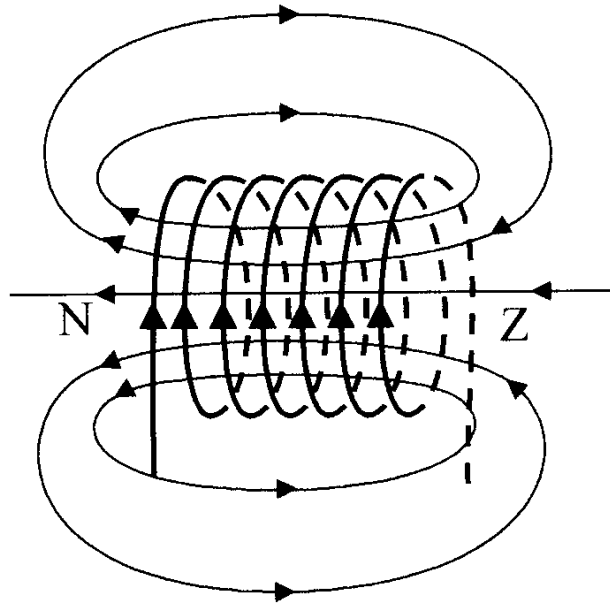
## Veldlijnen rond een stroomlus

Stel dat we een stroomdraad ombuigen tot een cirkelvormige lus zoals in de figuur hiernaast. Dan lopen er natuurlijk nog steeds magnetische veldlijnen rond de stroomdraad. De richting van deze veldlijnen kan met de rechterhandregel bepaald worden. In de figuur zijn er drie veldlijnen getekend. Uit de figuur blijkt het volgende. **Alle veldlijnen lopen in dezelfde richting door de lus heen en keren buiten de lus weer terug.**



## Veldlijnen in en rond een spoel

Een spoel bestaat uit een stroomdraad die in een groot aantal lussen gebogen is. Zie de figuur hiernaast. Elke lus wekt een eigen magnetisch veld op. Steeds wijst dit veld binnen de lus naar links en buiten de lus naar rechts. Zodoende versterken de magneetvelden van de lussen elkaar. Van het uiteindelijke veld zijn een aantal veldlijnen in de figuur getekend.



rechterhand-  
regel voor een  
stroomspoel

Het magneetveld van de spoel lijkt uitwendig sterk op het magneetveld van een staafmagneet. De noordpool zit aan de kant waar de veldlijnen de spoel uitgaan en de zuidpool zit aan de kant waar de veldlijnen de spoel binnenkomen. Buiten de spoel lopen de veldlijnen dus weer van de noordpool naar de zuidpool. Binnenin de spoel lopen de veldlijnen van de zuidpool naar de noordpool.

Er is een manier waarmee snel de noordpool van een spoel bepaald kan worden. Deze zogenaamde "rechterhandregel voor een spoel" werkt als volgt. Zie ook de bovenstaande figuur.

**Buig de vingers van je rechter hand over de windingen van de spoel. Je vingers moeten daarbij in de richting van de stroom wijzen. Je gestrekte duim wijst dan in de richting van de noordpool van de spoel.**

Het magneetveld dat door de spoel wordt opgewekt, wordt sterker als de stroom toeneemt. Ook wordt het veld sterker als we meer windingen aanbrengen. Dit laatste is logisch als je bedenkt dat iedere winding een eigen bijdrage aan het magneetveld levert.

### **Elektromagneet**

Je spreekt van een elektromagneet als er zich in de spoel een ijzeren kern bevindt. Na het inschakelen van de stroom zorgt het magneetveld van de spoel ervoor dat die kern een magneet wordt (ten gevolge van magnetische influentie). De magnetische werking van de spoel wordt daardoor vele malen versterkt. Bij het uitschakelen van de stroom is het van belang dat ook de kern zijn magnetisme snel verliest. De kern is daarom gemaakt van “weekijzer”.

# Opgaven bij § 3

## Opgave 1

Welke vorm hebben de magnetische veldlijnen rond een rechte stroomdraad?

## Opgave 2

Er zijn twee rechterhandregels (RHR) in de tekst beschreven. In welke situatie kun je de ene RHR gebruiken en in welke situatie de andere RHR?

## Opgave 3

Hoe kun je met een stroomdraad een spoel maken?

## Opgave 4

Waarom bevat een spoel vaak een ijzeren kern?

## Opgave 5

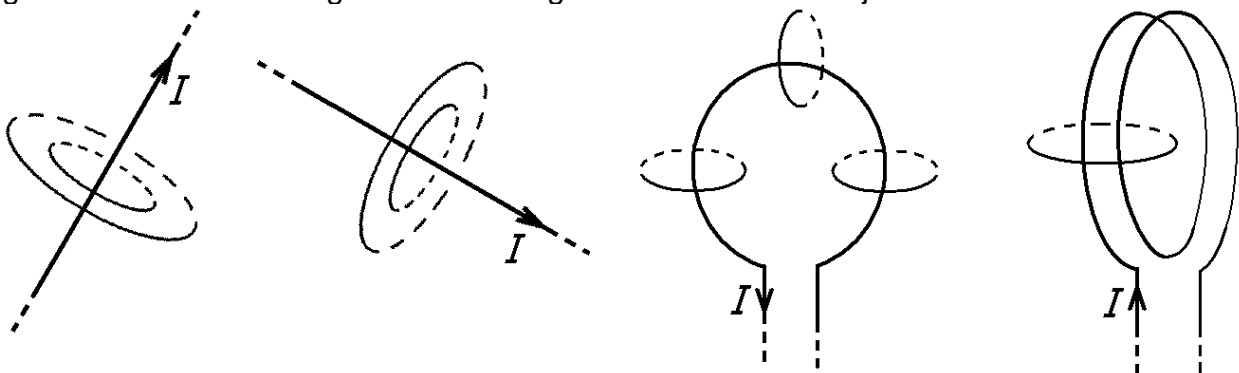
Waarom is de ijzeren kern van een elektromagneet van WEEKijzer?

## Opgave 6

Een spoel wordt op de pluspool en minpool van een spanningsbron aangesloten. De stroom die hierdoor door de spoel gaat lopen maakt van de spoel een elektromagneet. Hoe kun je op een eenvoudige manier de noordpool van deze elektromagneet veranderen in een zuidpool (en de zuidpool in een noordpool)?

## Opgave 7

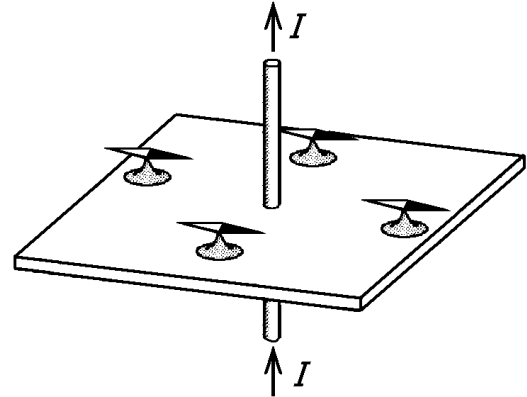
In de figuren hieronder staan vier stroomdraden afgebeeld waar een elektrische stroom  $I$  doorheen loopt. Ook zijn een aantal magnetische veldlijnen om de stroomdraden getekend. Geef in de figuren de richting van elk van de veldlijnen aan.





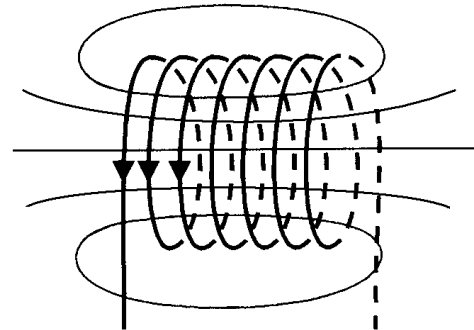
### Opgave 8

Een recht stuk koperdraad is dwars door een plastic plaat gestoken. Zie de figuur hiernaast. Door de koperdraad loopt een elektrische stroom  $I$  in de aangegeven richting. Op de plastic plaat zijn vier draaibare kompasnaaldjes geplaatst. Hiervan zijn de noordpolen steeds zwart getekend. In de figuur wijzen drie van de vier kompasnaaldjes in de verkeerde richting. Welk kompasnaaldje geeft wel de goede richting aan? Omcirkel deze.



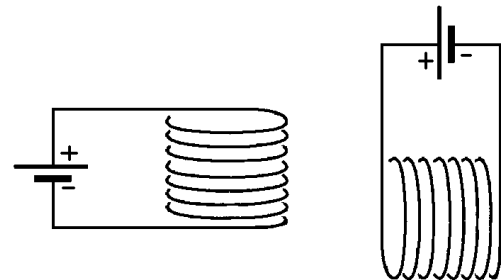
### Opgave 9

In de figuur hiernaast is een spoel getekend. Ook is de richting van de stroom door de spoel aangegeven. Geef in de figuur de richting van de getekende veldlijnen aan. Geef in de figuur ook aan waar de noord- en de zuidpool van de spoel zit.



### Opgave 10

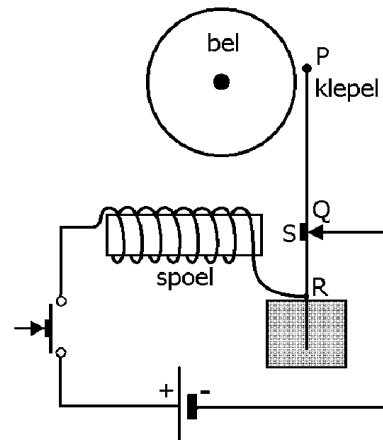
Geef in de figuur hiernaast aan waar de noordpool en waar de zuidpool van beide spoelen zitten.



### Opgave 11

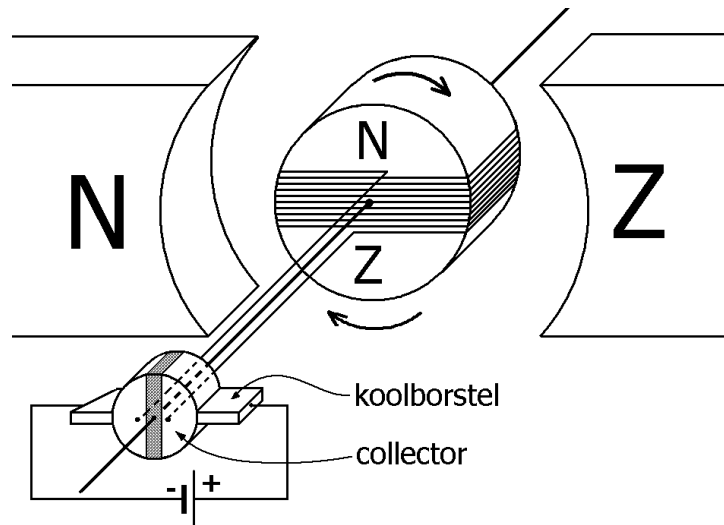
In de figuur hiernaast is een elektrische bel weergegeven. De klepel PR is van verend metaal gemaakt, waardoor die van links naar rechts wil bewegen. Op de klepel zit een ijzeren blokje S tegenover contact Q. Als er op de schakelaar wordt gedrukt gaat de bel rinkelen. Zet hierbij de volgende stappen in de juiste volgorde.

- Blokje S wordt aangetrokken.
- Door de spoel gaat een stroom lopen.
- De klepel botst tegen de bel.
- De klepel beweegt naar rechts.
- De klepel beweegt naar links.
- De schakelaar wordt ingedrukt.
- Er gaat opnieuw een stroom door de spoel lopen.



### Opgave 12

Als een elektromotor op een spanningsbron is aangesloten, levert deze een draaiende beweging. De werking ervan is hiernaast schematisch weergegeven. Een spoel (met een weekijzeren cilinder als kern) bevindt zich tussen twee permanente magneten in. Door de spoel loopt een stroom. Daardoor wordt de spoel een elektromagneet. In de figuur hiernaast zit de noordpool boven de spoel en de zuidpool onder de spoel.



Leg uit dat de spoel daardoor rechtsom in het magnetische veld van de permanente magneten gaat draaien.

Om de spoel een blijvende beweging te laten uitvoeren moet de stroom door de spoel steeds op het juiste moment omkeren. De noordpool van de spoel moet namelijk steeds boven zitten. Dit omkeren gebeurt met behulp van een collector die met de spoel meedraait. De collector bestaat uit twee metalen helften die van elkaar gescheiden zijn door een isolator. De twee uiteinden van de spoel zijn elk met een collectorhelft verbonden. Tegen de collector drukken twee (niet bewegende) koolborstels. De stroom wordt via de ene borstel aan de spoel toegevoerd en via de andere borstel afgevoerd.

Bepaal nu in de figuur hoeveel graden de spoel nog moet draaien voordat de stroom van richting omkeert.

Hebben de volgende wijzigingen invloed op de motorkracht en op de draairichting? Zo ja, hoe?

- \* de weekijzeren cilinder wordt vervangen door een houten cilinder.
- \* de spanning van de spanningsbron wordt verhoogd.
- \* de pluspool en minpool van de spanningsbron worden verwisseld.

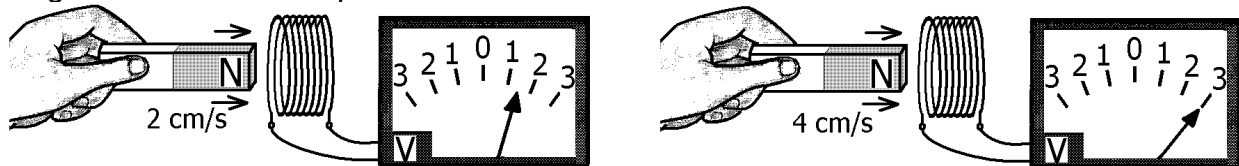
# § 4 Inductiespanning

## Inleiding

In de voorgaande paragraaf hebben we gezien dat je met een elektrische stroom een magnetisch veld kunt opwekken. Je vraagt je dan misschien af of je met een magneet een elektrische stroom of spanning kunt opwekken. Dat blijkt inderdaad te kunnen. In deze en de volgende paragrafen wordt er iets meer over verteld.

## Proef 1

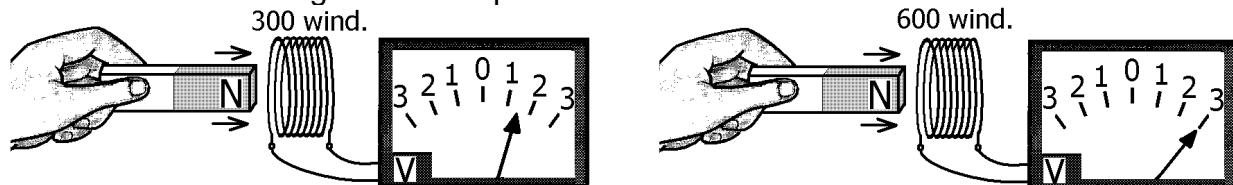
In de onderstaande figuren beweeg je een staafmagneet naar de opening van een spoel toe. De voltmeter, die op de aansluitpunten van de spoel aangesloten is, slaat uit. Er ontstaat dus blijkbaar een spanning tussen deze aansluitpunten. Dit verschijnsel heet elektromagnetische inductie of kortweg inductie. De opgewekte spanning heet inductiespanning. Als je de magneet stil houdt ten opzichte van de spoel, dan is er geen uitslag van de meter. Het effect treedt alleen op bij verandering (!) van het magnetisch veld in de spoel.



In de linker figuur beweeg je de staafmagneet met een snelheid van 2 cm/s naar de spoel toe en in de rechter figuur met een snelheid van 4 cm/s. Het blijkt dat de inductiespanning in het laatste geval twee keer zo groot is (3 V in plaats van 1,5 V). Uit deze en vele andere proeven blijkt dat de inductiespanning evenredig is met de snelheid van de magneet.

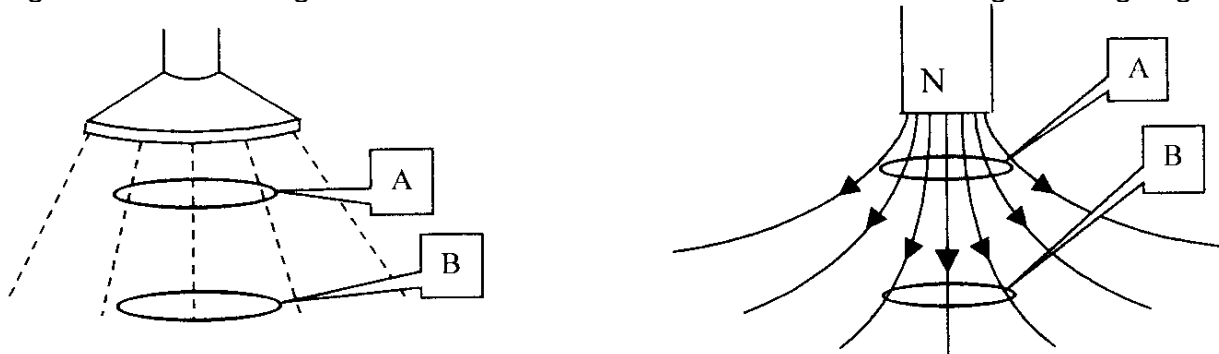
## Proef 2

In de onderstaande figuren beweeg je de staafmagneet eerst naar een spoel met 300 windingen en daarna met dezelfde snelheid naar een spoel met 600 windingen. Het blijkt dat de inductiespanning in het laatste geval twee keer zo groot is (3 V in plaats van 1,5 V). Uit deze en vele andere proeven blijkt dat de inductiespanning evenredig is met het aantal windingen van de spoel.



## Magnetische flux en inductiespanning

Om de bovenstaande twee proeven goed te kunnen begrijpen, hebben we het begrip magnetische flux nodig. Dat wordt aan de hand van de onderstaande figuren uitgelegd.

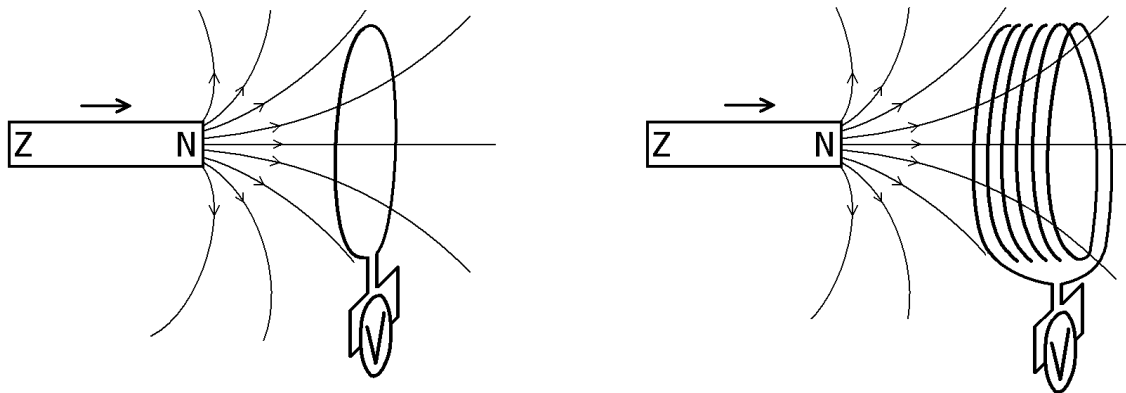


In de linker figuur wordt een armband onder de douchekop gehouden. Bij plaats A stroomt er meer water doorheen dan bij plaats B. Iets soortgelijks kun je ook bij een magneetveld doen. In de rechter figuur verlaten veldlijnen de noordpool. Als je een ring onder de noordpool houdt, 'stroomt' er bij plaats A meer magneetveld doorheen dan bij plaats B. Het Latijnse woord voor stroom is **flux** en om deze 'magnetische stroom' aan te geven, gebruikt men het begrip magnetische flux. Deze heeft de volgende eigenschap.

**De magnetische flux door een ring of een lus is een maat voor het aantal veldlijnen dat door deze ring of lus gaat. Anders gezegd: de magnetische flux geeft aan 'hoeveel magneetveld' er doorheen gaat.**

De term 'magnetische flux' is misleidend omdat je bij een magneetveld niet aan bewegende materie (bewegende deeltjes) moet denken terwijl het woord flux (stroom) dit wel suggereert.

In de onderstaande linker figuur is een koperdraad omgebogen tot een lus. De uiteinden van de lus zijn verbonden met een (gevoelige) voltmeter. Een staafmagneet wordt naar de lus bewogen. De magnetische flux die door de lus 'loopt' zal hierdoor toenemen. De voltmeter slaat uit.



De beroemde natuurkundige Michael Faraday (1791 – 1867) ontdekte het volgende.

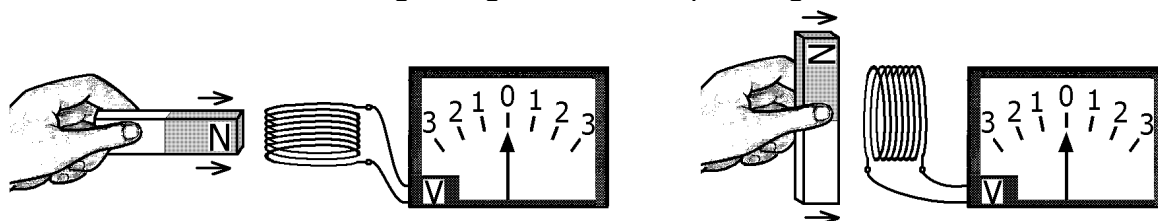
**De inductiespanning in de lus is evenredig met het tempo waarmee de magnetische flux (die door de lus gaat) verandert. Anders gezegd: deze spanning is evenredig met de verandering van de flux per tijdseenheid.**

Stel dat de lus wordt vervangen door een spoel zoals in de rechter figuur is afgebeeld. Dan wordt er in elke lus een inductiespanning opgewekt. Al deze spanningen bij elkaar opgeteld geven dan de totale inductiespanning in de spoel. De voltmeter slaat nu dus veel verder uit. We kunnen het volgende zeggen.

**De inductiespanning in een spoel is evenredig met het aantal windingen.**

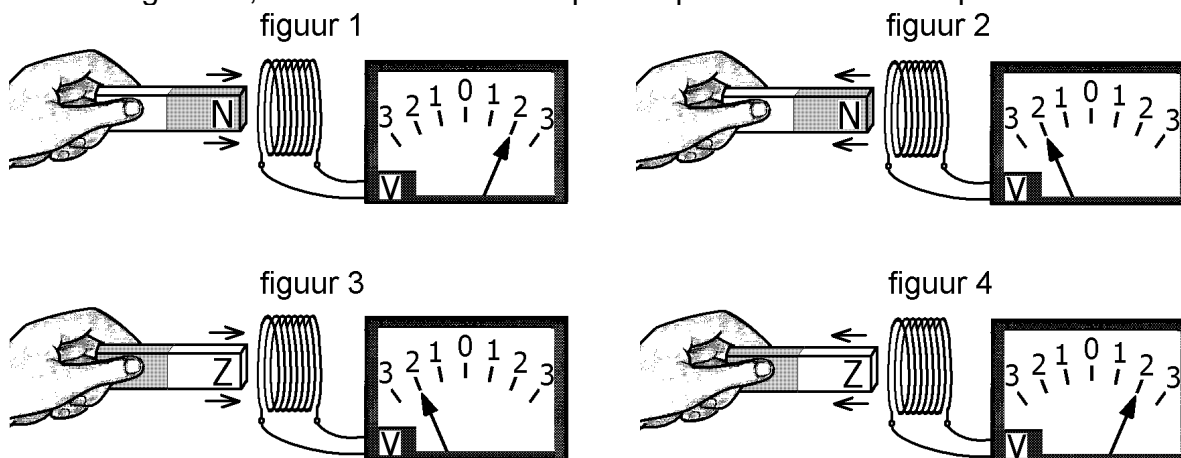
### Proef 3

Als je de magneet naar de spoel beweegt op een manier zoals in de onderstaande twee figuren is afgebeeld, blijkt er geen inductiespanning te worden opgewekt. Met de hierboven gegeven uitleg over de magnetische flux kunnen we dit begrijpen. In beide figuren loopt er geen flux door de spoel, omdat de veldlijnen langs (en niet door) de windingen lopen. De flux door de windingen is dus nul en de verandering van de flux ook. Daarom is er in deze figuren geen inductiespanning.



### Proef 4

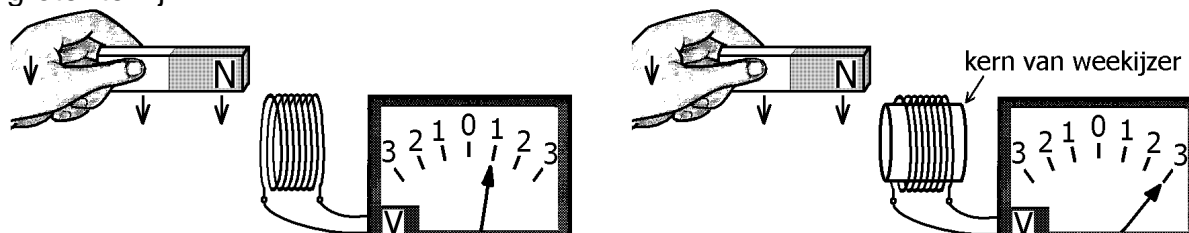
In de onderstaande figuren 1 en 2 wordt de noordpool van de staafmagneet eerst naar de spoel toe bewogen en daarna van de spoel af bewogen. In de figuren 3 en 4 wordt hetzelfde gedaan, alleen nu met de zuidpool in plaats van de noordpool.



Uit de aanwijzingen van de voltmeter kan het volgende worden geconcludeerd. **De polariteit van de inductiespanning keert om (plus- en minpool wisselen om) als een fluxtoename overgaat in een fluxafname (vergelijk figuur 1 met figuur 2 of figuur 3 met figuur 4). Voor de polariteit van de inductiespanning maakt het niet uit of de flux in de ene richting toeneemt of de flux in tegengestelde richting afneemt (vergelijk figuur 1 met figuur 4 en figuur 2 met figuur 3).**

### Proef 5

In de onderstaande figuren wordt de staafmagneet eerst in verticale richting langs de spoel zonder weekijzeren kern geschoven en daarna (met dezelfde snelheid) langs de spoel met een weekijzeren kern. Dan blijkt de inductiespanning in het laatste geval veel groter te zijn.



Dit verschijnsel is gemakkelijk te begrijpen, want de weekijzeren kern versterkt het magneetveld in de spoel. De fluxveranderingen zijn dan ook veel groter. Daarom wordt in veel apparaten zoals een dynamo de spoel voorzien van een weekijzeren kern. Samengevat geldt dus het volgende.

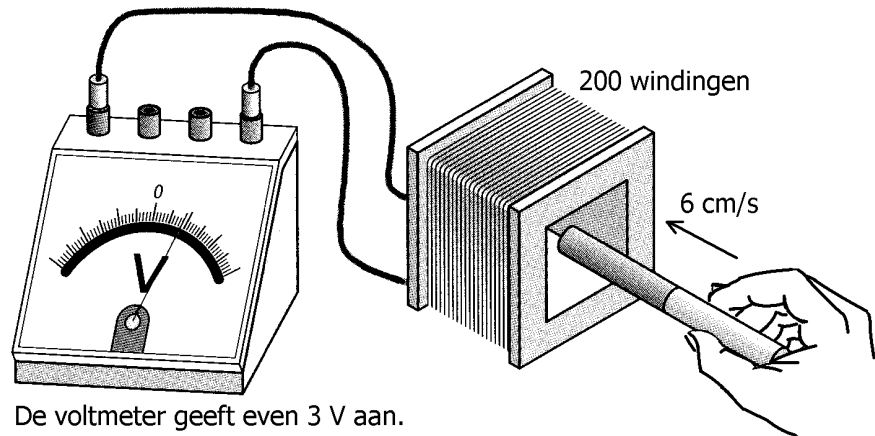
**Door een spoel te voorzien van een weekijzeren kern kunnen veel grotere inductiespanningen worden bereikt.**

# Opgaven bij § 4

## Opgave 1

Een staafmagneet wordt meerdere keren in een spoel geschoven. De uitslag van de voltmeter wordt steeds afgelezen. Zie de figuur hiernaast.

De voltmeter is voldoende snel. Dat betekent dat de wijzer snelle variaties in de spanning goed kan volgen.



De voltmeter geeft even 3 V aan.

Bij de eerste proef heeft de spoel 200 windingen en de insteeksnelheid van de magneet is 6 cm/s. De uitslag van de voltmeter is dan 3 V. Deze waarden staan ook in de figuur.

a.

Nu wordt de proef herhaald met 400 windingen en een insteeksnelheid van 6 cm/s. Voorspel in deze situatie de uitslag van de voltmeter.

b.

Nu wordt de proef herhaald met 200 windingen en een insteeksnelheid van 9 cm/s. Voorspel in deze situatie de uitslag van de voltmeter.

c.

Nu wordt de proef herhaald met 1000 windingen en een insteeksnelheid van 12 cm/s. Voorspel in deze situatie de uitslag van de voltmeter.

## Opgave 2

Deze opgave is het vervolg op de vorige opgave.

Stel dat je de staafmagneet niet in de spoel schuift maar juist uit de spoel trekt.

Wat is dan de meest opvallende verandering van de uitslag van de voltmeter?

Stel dat je niet de noordpool maar de zuidpool in de spoel schuift.

Wat is dan de meest opvallende verandering van de uitslag van de voltmeter?

Ten slotte vergelijk je twee proefjes met elkaar.

Eerst schuif je de noordpool van de magneet in de spoel.

Daarna trek je de omgekeerde magneet uit de spoel (dus de zuidpool uit de spoel).

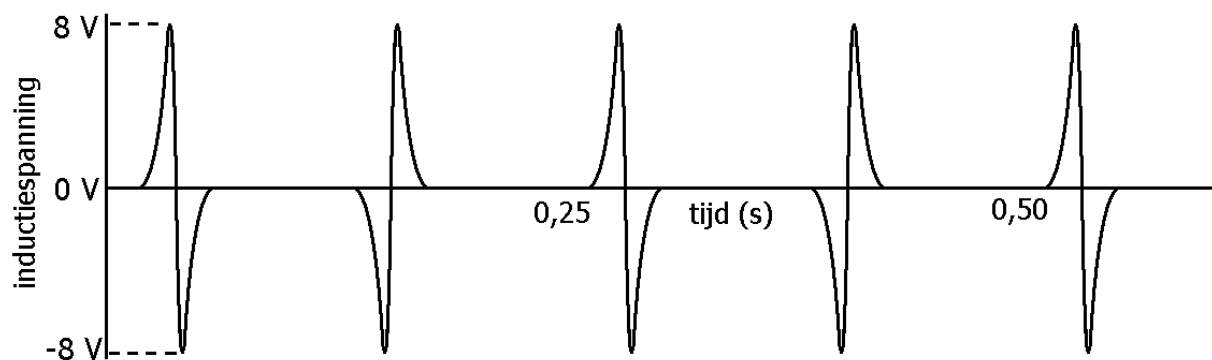
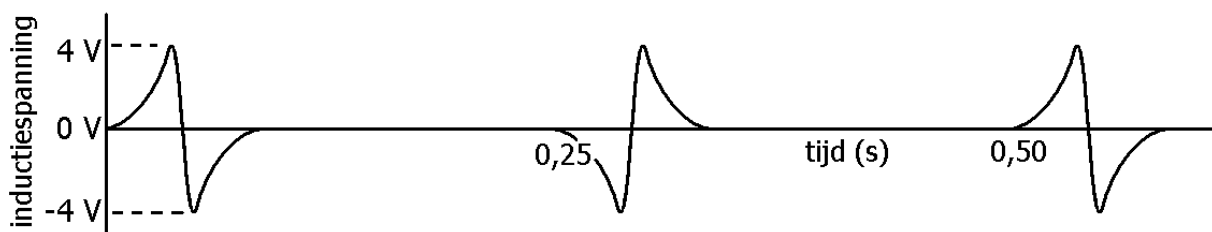
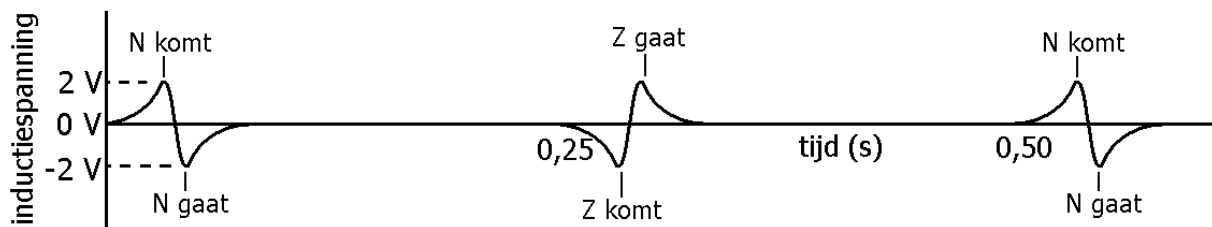
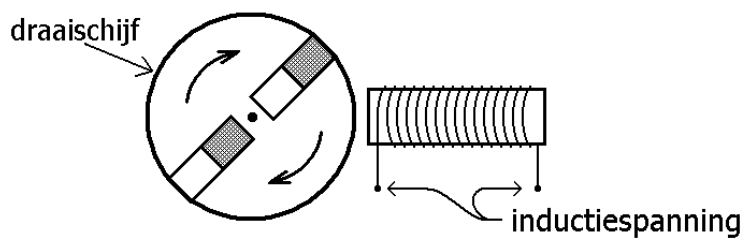
Verandert de uitslag van de voltmeter dan ook (zoals bij de vorige vragen)?

### Opgave 3

Met de onderstaande opstelling worden spanningspulsjes opgewekt. Twee staafmagneten zijn op een draaischijf gemonteerd. De schijf draait rond zijn as. Rechts van de draaischijf bevindt zich een spoel (met weekijzeren kern). Elke keer als de noord- of zuidpool van een magneet langs de spoel beweegt, ontstaat er een inductiespanning tussen de aansluitpunten van de spoel.

In de drie diagrammen onder de opstelling staat de inductiespanning tegen de tijd uit. In het bovenste diagram bevat de spoel 300 windingen. In het middelste en onderste diagram zijn het aantal windingen van de spoel en/of de draaisnelheid van de schijf veranderd.

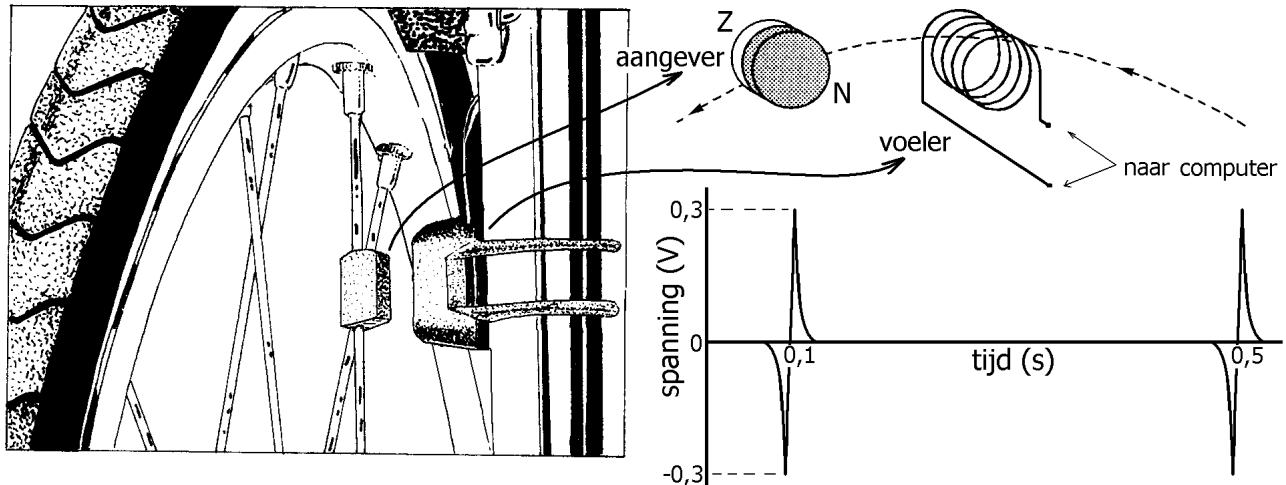
Bepaal nu het aantal windingen van de spoel in het middelste en in het onderste diagram.





#### Opgave 4

Een fietscomputer is een apparaat dat o.a. de afgelegde weg en de snelheid van een fiets kan meten. Hiervoor zit een “voeler” op de voorvork gemonteerd. Op een spaak zit een “aangever” vastgemaakt. Zie de figuren hieronder. De aangever is een magneet en de voeler is een spoel. Als de aangever de voeler passeert, wordt er een inductiespanning opgewekt. Deze spanning wordt doorgegeven aan de computer.



Jan rijdt op een fiets met een fietscomputer. Zijn snelheid is 6 m/s (dit is 21,6 km/h). De inductiespanning die hierbij wordt opgewekt staat in het bovenstaande diagram uitgezet tegen de tijd.

a.

Hoeveel tijd doet het voorwiel erover om een keer rond te draaien?

Na enige tijd fietsen wordt Jan moe. Hij verlaagt zijn snelheid tot 3 m/s.

b.

Bereken de maximum inductiespanning in de nieuwe situatie.

c.

Vul op de open plek in: “breder” of “smaller”.

Door de verlaging van de snelheid zijn

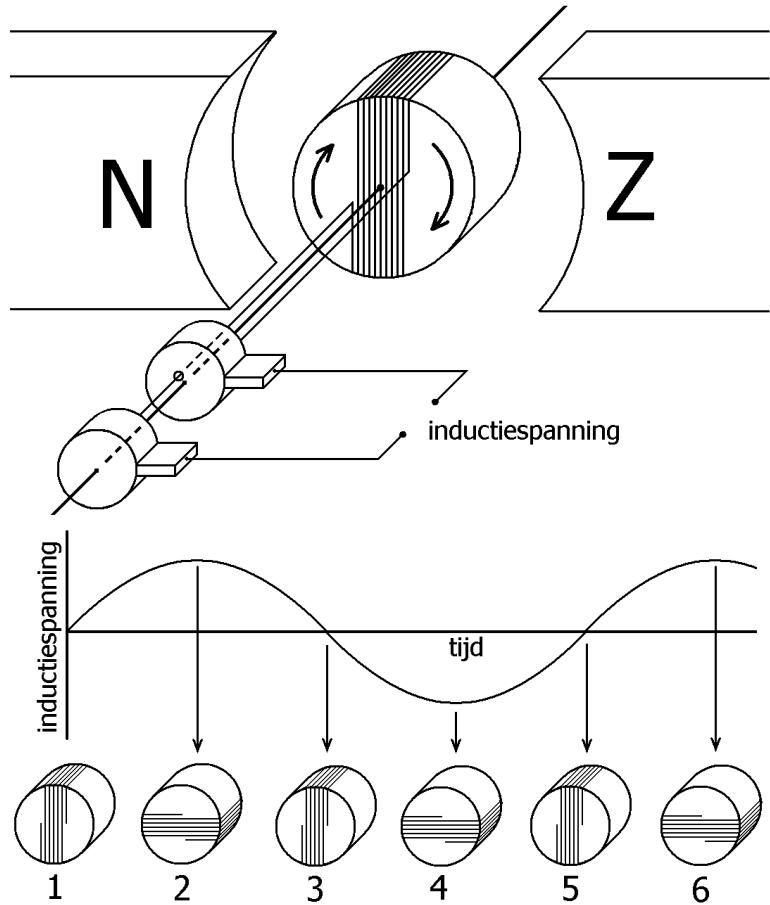
de pulsen van de inductiespanning \_\_\_\_\_ geworden.

d.

Bereken de diameter van het voorwiel.

**Opgave 5**

In de figuur hiernaast is een generator (= opwekker) van wisselspanning afgebeeld. Tussen twee permanente magneten bevindt zich een spoel. De spoel wordt van buitenaf gedwongen om rond te draaien.



Magnetische veldlijnen lopen van de noordpool naar de zuidpool. Er gaat dus een magnetische flux door de windingen van de spoel. Omdat de stand van de spoel voortdurend verandert, verandert ook de flux en ontstaat er een inductiespanning in de spoel.

In het diagram hiernaast is de inductiespanning tegen de tijd uitgezet. Omdat de pluspool en minpool steeds omwisselen spreken we over wisselspanning.

Onder het diagram is voor zes tijdstippen de stand van de spoel getekend. Bij bepaalde standen is de inductiespanning nul, bij andere standen maximaal. Dit is logisch want bij sommige standen verandert de flux slechts langzaam en bij andere standen juist snel. Hieronder gaan we na of dat klopt door in de volgende tabel zes kruisjes op de juiste plaatsen te zetten.

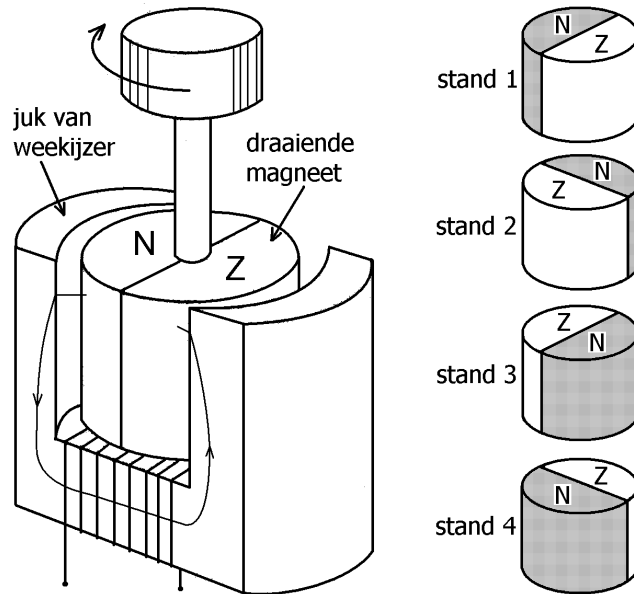
	De inductie-spanning in het diagram is:		De flux door de spoel is:		De flux door de spoel verandert:	
	even nul	maximaal	even nul	maximaal	even niet	het snelst
Stand 1, 3, 5						
Stand 2, 4, 6						

moet kloppen met

Bij de denkstap van de middelste twee kolommen naar de laatste twee kolommen kan het handig zijn om de magnetische flux te vergelijken met de hoogte van een trampolinespringer. Als zijn hoogte maximaal is, verandert zijn hoogte even niet (hij hangt even stil in de lucht). Als zijn hoogte nul is (bij het neerkomen), verandert de hoogte het snelst (grootste snelheid).

### Opgave 6

In de figuur hiernaast is een bepaald type fietsdynamo afgebeeld. Een magneet maakt het ijzer van het juk magnetisch. Omdat de magneet draait, verandert het magneetveld in het juk voortdurend. Om het juk is een spoel gewikkeld. De wisselende flux door de windingen van de spoel wekt een wisselspanning op.



Rechts van de dynamo staat de magneet in vier standen afgebeeld.

a.

In welke stand wijst de magnetische flux door de windingen naar rechts?

Tip: de magnetische veldlijnen lopen van de noordpool via het juk naar de zuidpool. In de figuur is één veldlijn getekend.

b.

In welke stand wijst de magnetische flux door de windingen naar links?

c.

In welke standen is er geen magnetische flux door de windingen van de spoel?

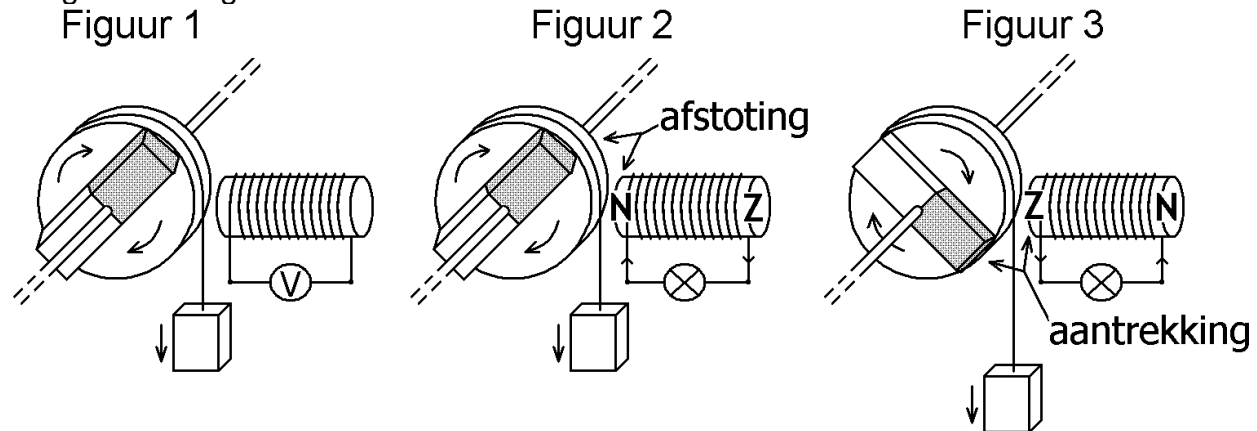
d.

Leg uit dat de inductiespanning (heel eventjes) nul is in stand 1 en 3.

# § 5 Inductiestroom

## Inductiestroom

In de vorige paragraaf zagen we dat, als een permanente magneet (zoals een staafmagneet) in de buurt van een spoel beweegt, in de spoel een inductiespanning ontstaat. Zie bijvoorbeeld de onderstaande figuren 1, 2 en 3 waarin een staafmagneet op een ronde schijf is bevestigd en ronddraait doordat een gewichtje één kant van de schijf naar beneden trekt. Deze spanning kan met een voltmeter gemeten worden zoals in figuur 1 is afgebeeld.



In deze paragraaf wordt de voltmeter vervangen door een lampje. Zie de figuren 2 en 3. Omdat het lampje wél stroom doorlaat (en de voltmeter niet), is de stroomkring nu gesloten. Het blokje blijkt nu langzamer te dalen dan in figuur 1. Hoe dat mogelijk is wordt hierna uitgelegd.

Ten gevolge van de inductiespanning gaat er een elektrische stroom in de stroomkring lopen: de zogenaamde **inductiestroom**. Hoe groter de inductiespanning is, des te groter ook de inductiestroom is. Ten gevolge van deze stroom wordt de spoel een elektromagneet (zie paragraaf 3). Zodoende kan de spoel een magnetische kracht op de staafmagneet uitoefenen. Zoals uit de figuren 2 en 3 blijkt, heeft deze kracht steeds een remmend effect op de draaibeweging.

In figuur 2 draait de noordpool van de staafmagneet naar de spoel toe. Door de inductiestroom ontstaat er dan aan de linker kant van de spoel een noordpool. Omdat beide noordpolen elkaar afstoten, wordt de draaibeweging tegengewerkt. Even later draait de noordpool van de staafmagneet van de spoel weg. Zie figuur 3. Door de inductiestroom ontstaat er nu aan de linker kant van de spoel een zuidpool. Omdat de noord- en zuidpool elkaar aantrekken, wordt de draaibeweging opnieuw tegengewerkt.

De inductiestroom keert tussen figuur 2 en figuur 3 van richting om. Dit is kenmerkend voor de inductiestroom. De inductiestroom kiest altijd de richting waarbij bewegingen worden tegengewerkt.

### Opmerking

Net als de inductiestroom keert ook de inductiespanning van richting om. Bij figuur 2 is er namelijk sprake van een fluxtoename en bij figuur 3 van een fluxafname.

### **Algemeen**

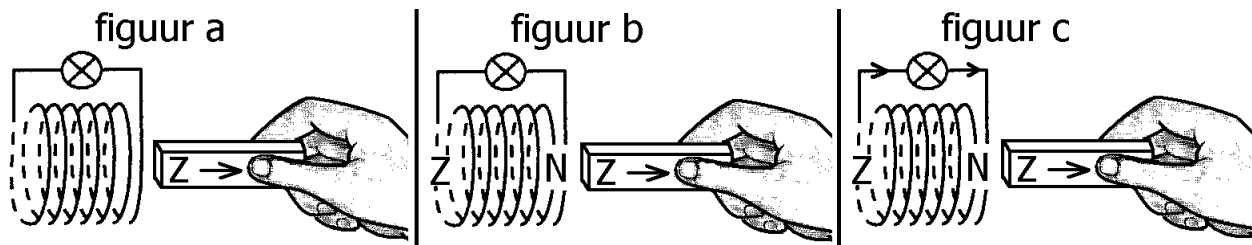
Deze en de vorige paragraaf gaan over situaties waarbij een permanente magneet in de buurt van een spoel beweegt. Er ontstaat dan een inductiespanning in de spoel. Dit geldt overigens ook als de spoel beweegt en de permanente magneet stilstaat. Als de aansluitpunten van de spoel geleidend met elkaar verbonden worden (bijvoorbeeld via een lampje), dan gaat er een inductiestroom door de spoel lopen.

**De inductiestroom wekt een magneetveld rond de spoel op. Dit magneetveld werkt als een soort “magnetische rem” op de bewegende magneet (of op de spoel zelf als deze beweegt in plaats van de magneet).**

De richting van de inductiestroom door de spoel kan eenvoudig bepaald worden. Eerst moet dan worden nagegaan welke kant van de spoel noordpool is en welke kant zuidpool. Daarna kan met de rechterhandregel de richting van de stroom worden bepaald. Zie het onderstaande voorbeeld.

### **Voorbeeldopgave**

Een staafmagneet wordt van een spoel weggetrokken zoals in de onderstaande figuur a is weergegeven. Teken in de figuur de richting van de inductiestroom.



De oplossing vindt in twee stappen plaats. Als eerste moet je bepalen waar de noordpool en de zuidpool van de spoel komen te liggen. Om de beweging van de staafmagneet tegen te gaan moeten de spoel en de staafmagneet elkaar aantrekken. Dus moet de rechter kant van de spoel noordpool zijn. Zie figuur b. Daarna kan je de richting van de stroom bepalen door de rechterhandregel op de spoel toe te passen. Zie figuur c.

# Opgaven bij § 5

## Opgave 1

Stel dat een permanente magneet in de buurt van een spoel beweegt. En dat er daardoor een inductiestroom door de spoel loopt. Werkt de magnetische kracht op de magneet zijn beweging dan mee of tegen?

## Opgave 2

Leg kort uit waarom de dynamo op je fiets de beweging van je fiets minder afremt als de fietslampjes kapot zijn.

## Opgave 3

In de onderstaande zes figuren wordt een staafmagneet naar of van een spoel bewogen.

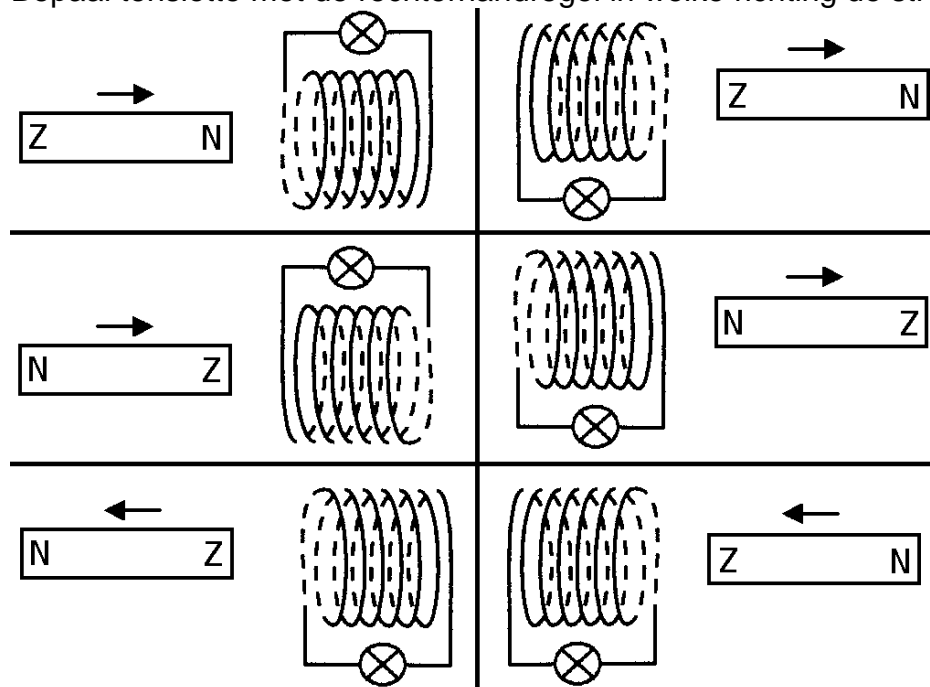
Geef in de figuren aan in welke richting de inductiestroom loopt.

Voer hierbij steeds de volgende stappen uit.

Vraag je af of de staafmagneet en de spoel elkaar aantrekken of elkaar afstoten.

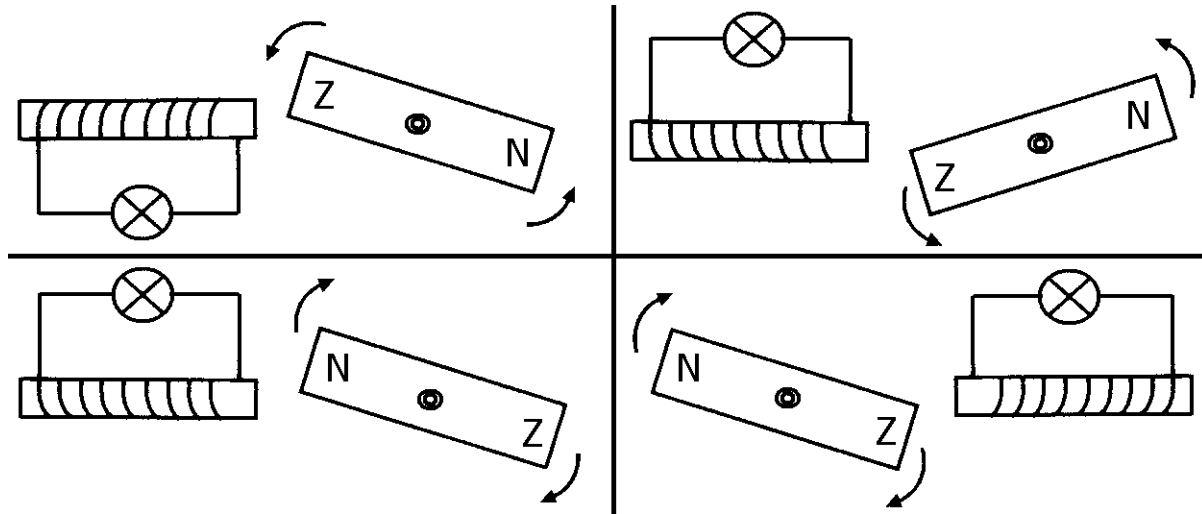
Bepaal daarna aan welke kant van de spoel de noordpool zit.

Bepaal tenslotte met de rechterhandregel in welke richting de stroom loopt.



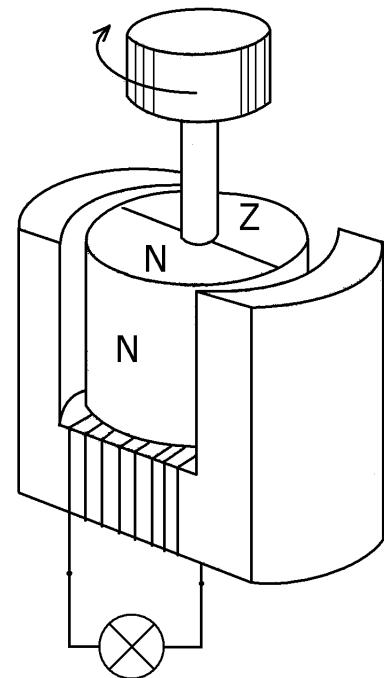
#### Opgave 4

In de onderstaande figuren draait een staafmagneet rond in de buurt van een spoel. Geef in de figuren aan in welke richting de inductiestroom loopt.



#### Opgave 5

Een dynamo levert een stroom aan een fietslampje. Zie de figuur hiernaast. Geef in de figuur aan in welke richting de stroom loopt.



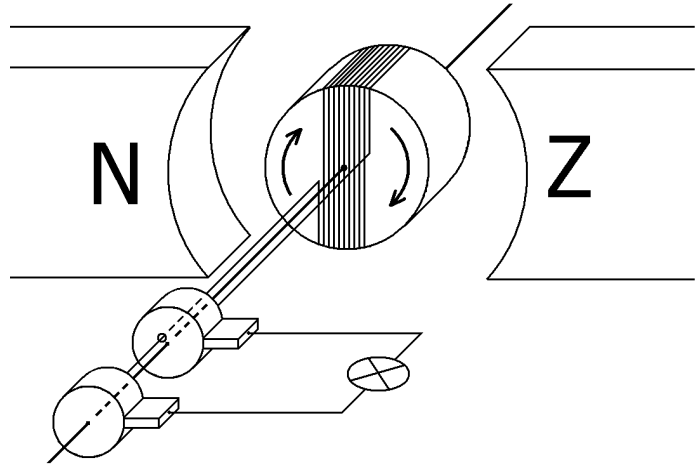
#### Opgave 6

Zet de volgende zinnen in de juiste volgorde.

- Door de spoel gaat een inductiestroom lopen.
- Iemand beweegt een staafmagneet naar een spoel toe.
- De spoel en de staafmagneet stoten elkaar af.
- De spoel wordt een elektromagneet.
- De magnetische flux door de windingen van de spoel neemt toe.

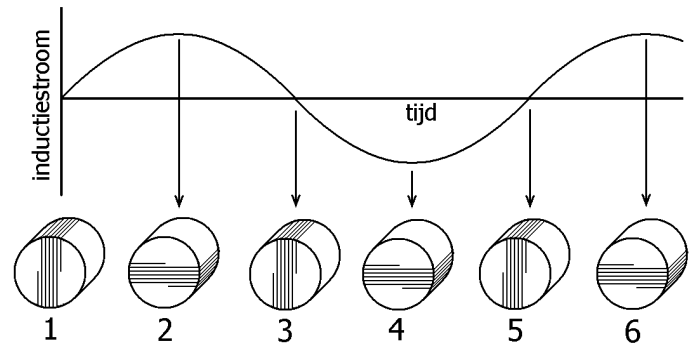
### Opgave 7

In de figuur hiernaast is een generator van wisselspanning afgebeeld. Tussen twee permanente magneten bevindt zich een spoel. De spoel wordt van buitenaf gedwongen om rond te draaien.



In de figuur zijn de uiteinden van de spoel via een lampje met elkaar verbonden. Daardoor kan er een inductiestroom door de spoel en het lampje lopen.

In het diagram hiernaast is de inductiestroom tegen de tijd uitgezet. Omdat de richting van de stroom steeds omkeert, spreken we over wisselstroom.

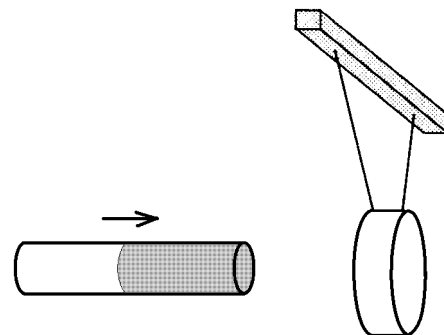


Onder het diagram is voor zes tijdstippen de stand van de spoel getekend. Deze standen zijn genummerd van 1 tot en met 6.

In de standen 2, 4 en 6 loopt er een inductiestroom door de spoel. Deze maken van de spoel een magneet. Geef nu bij deze standen aan waar de noordpool en zuidpool van de spoel zitten (dus aan de bovenkant of onderkant van de spoel).

### Opgave 8

In de figuur hiernaast wordt een staafmagneet naar een aluminium ring bewogen. Hierbij is de noordpool van de magneet naar de ring toe gericht. De ring hangt aan twee draadjes en kan naar links en naar rechts bewegen. Bij het naderen van de magneet gaat er in de ring een inductiestroom lopen.



a.

Geef in de figuur aan in welke richting de inductiestroom loopt.

b.

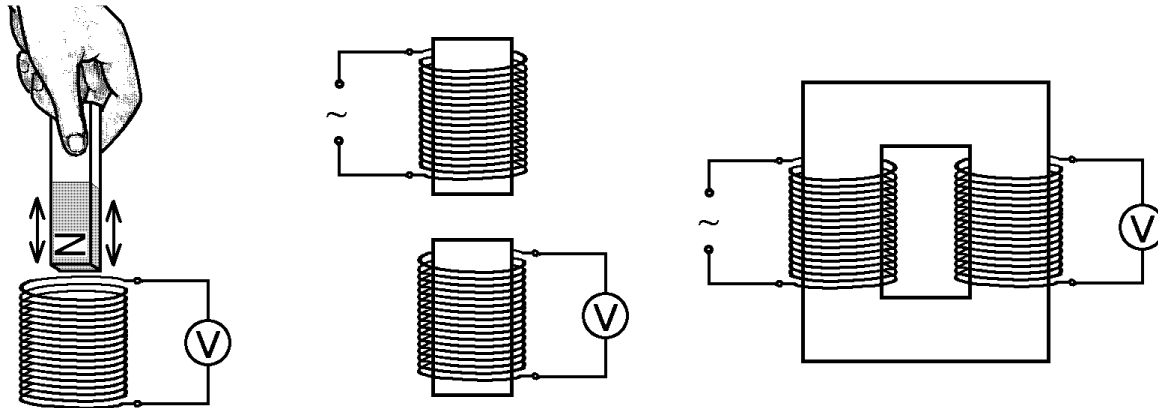
Leg uit in welke richting de ring gaat bewegen.



# § 6 Transformatoren

## Inleiding

In de onderstaande linker figuur wordt een staafmagneet afwisselend in en uit een spoel geschoven. Omdat hierdoor de magnetische flux door de spoel voortdurend toenemen en afneemt, wordt er een inductiespanning in de spoel opgewekt. In de middelste figuur is de bewegende staafmagneet vervangen door een stilstaande spoel waar een wisselspanning op is aangesloten. Deze spoel wekt een wisselend magneetveld op. De flux door de onderste spoel wisselt dan ook zodat in deze spoel een inductiespanning wordt opgewekt. Om de magnetische overdracht van de bovenste naar de onderste spoel zo groot mogelijk te laten zijn, zijn beide spoelen van een weekijzeren kern voorzien.

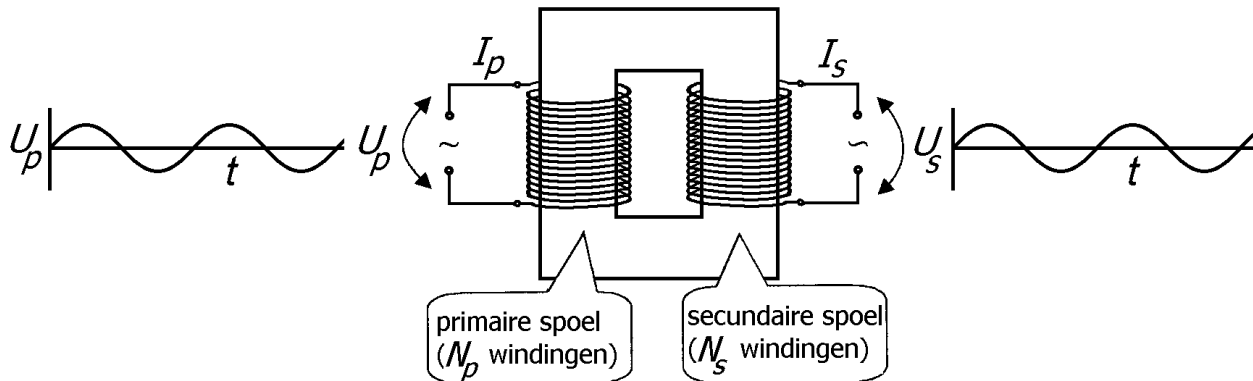


In de rechter figuur is een zogenoemde transformator getekend. De twee spoelen zijn nu magnetisch gezien via één weekijzeren kern optimaal met elkaar gekoppeld. De linker spoel, de zogenoemde 'primaire spoel', wordt op een wisselspanning aangesloten waardoor deze een veranderend magneetveld in de weekijzeren kern opwekt. Dit magneetveld loopt ook door de rechter spoel: de zogenoemde 'secundaire spoel'. Daardoor ontstaat er een inductiespanning tussen zijn aansluitpunten. Uiteraard gebeurt dit alleen als er op de primaire spoel een wisselspanning wordt aangesloten en geen gelijkspanning.

## Grootheden bij een transformator

Een transformator bestaat uit een gesloten weekijzeren kern waar zich twee spoelen om bevinden: de primaire en de secundaire spoel. Zie de volgende figuur. Het aantal windingen van de primaire spoel wordt aangeduid met  $N_P$  en het aantal windingen van de secundaire spoel met  $N_S$ .

De primaire spoel wordt op een wisselspanningsbron aangesloten. Tussen de aansluitklemmen van de secundaire spoel ontstaat dan ook een wisselspanning. In de figuur zijn beide wisselspanningen als functie van de tijd  $t$  getekend. Zoals we verderop zullen zien, bepaalt de verhouding van het aantal windingen in de primaire en de secundaire spoel welke wisselspanning het grootst is.



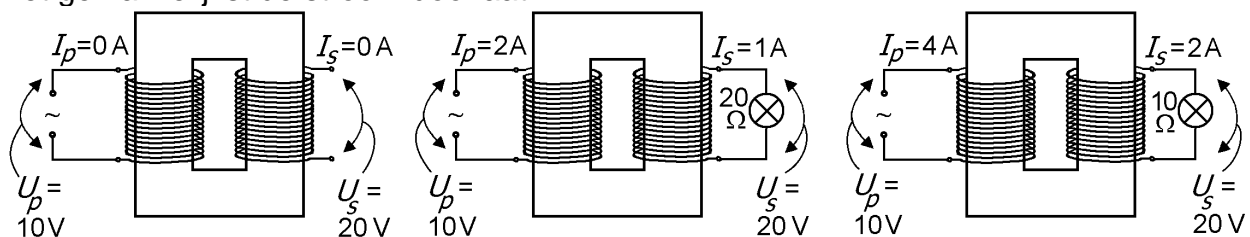
De spanning over en de stroom door de primaire spoel heten de primaire spanning  $U_p$  en de primaire stroom  $I_p$ .

De spanning over en de stroom door de secundaire spoel heten de secundaire spanning  $U_s$  en de secundaire stroom  $I_s$ .

Deze grootheden zijn in de figuur aangegeven. Voor de spanningen en de stromen worden hierna de zogenoemde 'effectieve waarden' genomen.

### Getallenvoorbeeld

In het volgende getallenvoorbeeld beperken we ons tot een 'ideale' transformator. Een ideale transformator heeft geen energieverliezen. In de onderstaande figuren is drie keer dezelfde transformator afgebeeld. De secundaire spoel bevat twee keer zoveel windingen als de primaire spoel, bijvoorbeeld 600 windingen (secundair) tegenover 300 windingen (primair). In alle drie de figuren wordt de primaire spoel op een spanning van 10 V aangesloten. Het enige verschil tussen de drie figuren is dat de secundaire spoel steeds zwaarder wordt belast. In de linker figuur wordt de secundaire spoel niet belast (er wordt niets op deze spoel aangesloten of hooguit een voltmeter). In de middelste figuur is een lampje van  $20 \Omega$  op de secundaire spoel aangesloten en in de rechter figuur een lampje van  $10 \Omega$ . Dit laatste lampje vormt de zwaarste belasting omdat hij het gemakkelijkst de stroom doorlaat.



Als we naar de secundaire spanning kijken, is deze in alle drie de figuren 20 V. De secundaire spanning is dus steeds twee keer zo groot als de primaire spanning. Dit is regelrecht het gevolg van het feit dat de secundaire spoel twee keer zoveel windingen heeft als de primaire spoel. In het algemeen is de verhouding van de spanningen gelijk aan de verhouding van het aantal windingen. In formulevorm wordt dit:

$$\frac{U_S}{U_P} = \frac{N_S}{N_P}.$$

Merk op dat voor de spanningsverhouding alleen de verhouding(!) van het aantal windingen van belang is. Het absolute aantal windingen is bij een ideale transformator niet van belang.

In de linker figuur is de secundaire stroom nul. Zoals uit de figuur blijkt, is de primaire stroom dan ook nul. In de middelste figuur is er op de secundaire spoel een lampje met een weerstand van  $20 \Omega$  aangesloten. Voor de secundaire stroom volgt dan uit de wet van ohm:

$$I_S = \frac{U_S}{R} = \frac{20 \text{ V}}{20 \Omega} = 1 \text{ A}.$$

Uit de (middelste) figuur blijkt dat de primaire stroom dan 2 A bedraagt. Kennelijk heeft het belasten van de secundaire spoel met een lampje invloed op de primaire stroomsterkte. In de rechter figuur wordt de secundaire spoel belast met een lampje met een twee keer zo kleine weerstand ( $10 \Omega$  in plaats van  $20 \Omega$ ). De secundaire stroomsterkte is dan twee keer zo groot als in de middelste figuur (2 A in plaats van 1 A). Zoals uit de figuren blijkt, is de primaire stroom dan ook twee keer geworden (4 A in plaats van 2 A).

Als we naar de waarden van de spanningen en stromen kijken, valt op dat in elk van de drie figuren de primaire spanning vermenigvuldigd met de primaire stroomsterkte (dus  $U_P \cdot I_P$ ) gelijk is aan de secundaire spanning vermenigvuldigd met de secundaire stroomsterkte (dus  $U_S \cdot I_S$ ). Dit is op de volgende manier te begrijpen. Het elektrisch vermogen (symbool  $P$ ) dat de wisselspanningsbron aan de primaire spoel levert, is  $U_P \cdot I_P$ . Het elektrisch vermogen dat de secundaire spoel aan de lamp levert is  $U_S \cdot I_S$ . Als de transformator alle vermogen doorgeeft van de wisselspanningsbron naar de lamp, dan moet dus gelden:

$$U_P \cdot I_P = U_S \cdot I_S = P \quad (\text{met } P = \text{'Power'} = \text{vermogen}).$$

De laatste formule geldt alleen voor ideale transformatoren. Dat zijn transformatoren zonder energieverliezen. Er gaat dan bij de secundaire spoel evenveel elektrische energie uit als er bij de primaire spoel ingaat.

Terugkijkend begrijpen we nu ook waarom een transformator een transformator heet. Hij zet namelijk het elektrische vermogen van de primaire zijde om in elektrisch vermogen aan de secundaire zijde via een magnetische tussenweg (weekijzer). Bij deze omzetting kan de spanning zowel groter als kleiner worden en de stroom dus kleiner en groter. Dit is voor de praktijk een zeer nuttige eigenschap voor een transformator.

### Voorbeeld van een opgave

Een transformator heeft een primaire spoel met 800 windingen en een secundaire spoel met 200 windingen. De primaire spoel wordt op een spanning van 230 V aangesloten. Op de secundaire spoel wordt een lampje aangesloten. De stroomsterkte door het lampje bedraagt 0,383 A.

Bereken het aan het lampje geleverde vermogen.  
Bereken ook de primaire stroomsterkte.

Deze opgave kan als volgt opgelost worden.

gegeven:  $N_P = 800$   
 $N_S = 200$   
 $U_P = 230 \text{ V}$   
 $I_S = 0,383 \text{ A}$ .

gevraagd: P en  $I_P$

oplossing: 
$$U_S = \frac{N_S}{N_P} \cdot U_P = \frac{200}{800} \cdot 230 \text{ V} = 57,5 \text{ V}$$

$$P = U_S \cdot I_S = 57,5 \text{ V} \cdot 0,383 \text{ A} = 22,0 \text{ W}$$

$$I_P = \frac{P}{U_P} = \frac{22,0 \text{ W}}{230 \text{ V}} = 0,0958 \text{ A}$$

# Opgaven bij § 6

## Opgave 1

Hoe heten de twee spoelen van een transformator?

## Opgave 2

Wat verstaan we onder een ideale transformator?

## Opgave 3

Waarom kun je zeggen dat de flux door een winding van de primaire spoel gelijk is aan de flux door een winding van de secundaire spoel?

## Opgave 4

Vul de volgende open plekken in. Als de secundaire spanning 85 keer zo groot is als de primaire spanning, dan is de secundaire stroomsterkte \_\_\_\_ keer zo \_\_\_\_\_ als de primaire stroomsterkte.

## Opgave 5

De primaire spoel van een transformator bevat 250 windingen en wordt aangesloten op een wisselspanning van 230 V. De secundaire spoel bevat 750 windingen. Bereken de spanning tussen de aansluitpunten van de secundaire spoel.

## Opgave 6

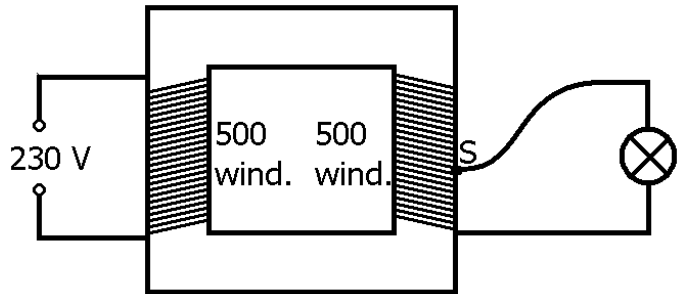
De primaire spoel van een transformator bevat 4600 windingen en wordt aangesloten op het stopcontact (230 V). De secundaire spoel levert een spanning van 10 V en voorziet een elektrische trein van energie. Bereken hoeveel windingen de secundaire spoel heeft.

## Opgave 7

Een wisselspanning van 200 V wordt op de primaire spoel van een transformator "gezet". Een straalkachel wordt aangesloten op de secundaire spoel. De spanning over de straalkachel is 150 V. De stroomsterkte door de straalkachel is 3 A. Bereken eerst het vermogen dat geleverd wordt aan de straalkachel. Bereken daarna de primaire stroomsterkte.

### Opgave 8

Linda gebruikt een (ideale) transformator om een gloeilamp zwakker te laten branden. Zie de figuur hiernaast. De primaire en de secundaire spoel hebben ieder 500 windingen. Ze sluit deze aan op het lichtnet (230 V).



Met behulp van een schuifcontact S kan het aantal actieve windingen van de secundaire spoel worden ingesteld. Bij een kleiner aantal windingen wordt de spanning over de lamp ook kleiner waardoor deze wordt gedimd.

a.

Werkt deze dimmer ook op gelijkspanning? Licht je antwoord toe.

De gloeilamp is van het type (230 V; 60 W). Bij een bepaalde stand van het schuifcontact S is de spanning over de lamp drie maal zo klein als normaal (dus 76,7 V in plaats van 230 V).

b.

Bereken het aantal windingen dat dan aan de secundaire kant in de kring is opgenomen.

c.

Is het elektrisch vermogen van de lamp dan ook drie maal zo klein als normaal (dus 20 W in plaats van 60 W)? Licht je antwoord toe.

d.

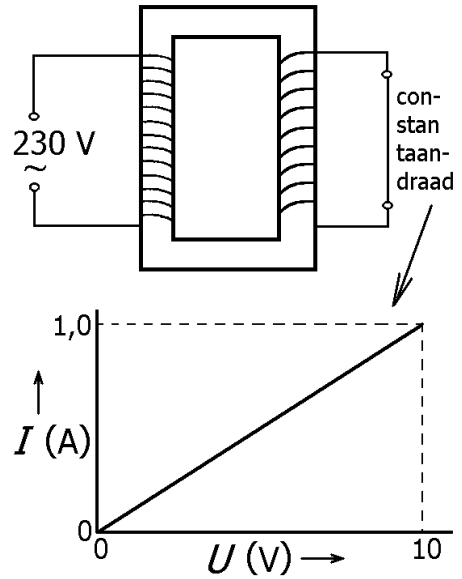
Zal de stroomsterkte door de primaire spoel groter worden, kleiner worden of gelijk blijven als de lamp wordt gedimd? Licht je antwoord toe.

### Opgave 9

De primaire spoel van een ideale transformator wordt op het lichtnet aangesloten (230 V). Een constantaandraad verbindt de aansluitpunten van de secundaire spoel met elkaar. Zie de schakeling hiernaast. De draad ontvangt een vermogen van 2,5 W. Onder de schakeling staat een diagram afgebeeld dat het verband weergeeft tussen de spanning over de draad en de stroomsterkte door de draad.

a.

Bepaal met behulp van het diagram de spanning over de constantaandraad.



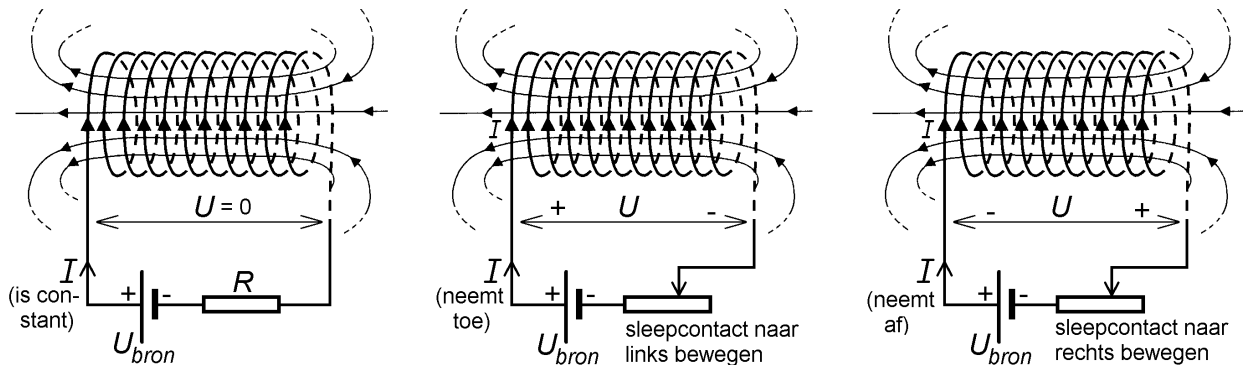
b.

Bereken hoeveel keer de primaire spoel meer windingen heeft dan de secundaire spoel.

# § 7 Zelfinductie van een spoel

## Zelfinductie

In de onderstaande figuren loopt er een elektrische stroom  $I$  door een spoel. Zoals we in een eerdere paragraaf gezien hebben, wekt deze stroom een magneetveld in en rondom de spoel op. In de figuren is een aantal veldlijnen van dit magneetveld getekend. Binnenin de spoel lopen de veldlijnen van rechts naar links. Dit betekent dat er een magnetische flux door de windingen van de spoel loopt. Deze flux is evenredig met de stroomsterkte. Als de stroomsterkte bijvoorbeeld twee keer zo groot zou worden, zou de flux door de windingen ook twee keer zo groot worden.



In de linker figuur blijft de stroomsterkte constant en zal de flux door de spoel dus ook niet veranderen in de tijd. Er is dan geen inductiespanning  $U$  tussen de aansluitdraden van de spoel. De stroomsterkte is gelijk aan de bronspanning  $U_{bron}$  gedeeld door de weerstand  $R$ . We nemen daarbij aan dat de weerstand van de spoel verwaarloosbaar klein is (de windingen zijn gemaakt van dik draad).

In de middelste figuur is de vaste weerstand vervangen door een schuifweerstand waarvan het sleepcontact naar links bewogen wordt. Omdat de weerstand daardoor afneemt, zal de stroomsterkte in de stroomkring toenemen. Omdat de stroomsterkte toeneemt, neemt ook de flux door de spoel toe en ontstaat er een inductiespanning  $U$  in de spoel. De linker aansluitdraad wordt daarbij positief en de rechter aansluitdraad negatief. Zie het plus- en minteken in de figuur.

In de rechter figuur wordt het sleepcontact van de schuifweerstand naar rechts bewogen. Daardoor neemt de weerstand toe en zal de stroomsterkte in de stroomkring afnemen. Hierdoor neemt de flux door de spoel af en wordt er wederom een inductiespanning opgewekt. Dit keer is de linker aansluitdraad negatief en de rechter aansluitdraad positief. Zie weer het plus- en minteken in de figuur.

Het verschijnsel dat er een inductiespanning tussen de aansluitpunten van een spoel wordt opgewekt ten gevolge van de veranderende stroomsterkte door de spoel, wordt zelfinductie genoemd.



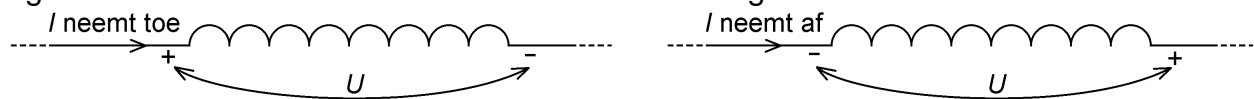
## Polariteit van de spanning over de spoel

Als er een inductiespanning in een spoel ontstaat, is het ene aansluitpunt positief en het andere aansluitpunt negatief. Met de wet van Lenz kunnen we bepalen welke van de twee aansluitpunten positief is en welke negatief. De wet van Lenz luidt als volgt.

**De inductiespanning is altijd zodanig, dat hij de verandering van de magnetische flux tegenwerkt.**

In de bovenstaande middelste figuur neemt de magnetische flux toe omdat de stroomsterkte toeneemt. In dit geval werkt de inductiespanning  $U$  de bronspanning  $U_{\text{bron}}$  tegen. De spanning over de schuifweerstand is dan  $U_{\text{bron}} - U$ . In de bovenstaande rechter figuur neemt de magnetische flux af omdat de stroomsterkte afneemt. Nu 'helpt' de inductiespanning de bronspanning. De spanning over de schuifweerstand is dan  $U_{\text{bron}} + U$ .

In de onderstaande figuren is het schakelschema van een spoel getekend. In beide figuren loopt de stroom  $I$  van links naar rechts (zie de richting van de pijl). In de linker figuur neemt de stroomsterkte toe en in de rechter figuur neemt de stroomsterkte af.



In beide figuren is ook de spanning  $U$  over de spoel aangegeven. Als de stroomsterkte toeneemt (linker figuur), is de aansluitdraad waarmee de stroom de spoel binnenkomt positief en de aansluitdraad waarmee de stroom de spoel uitgaat, negatief. Als de stroomsterkte afneemt (rechter figuur), is de aansluitdraad waarmee de stroom de spoel binnenkomt negatief en de aansluitdraad waarmee de stroom de spoel uitgaat, positief.

Als ezelsbrug kan het woord STIP dienen, wat symbool staat voor "Als de Stroom Toeneemt, is de Ingang Positief."

## Verband tussen de spanning en de stroom bij een spoel

Zoals we in een voorgaande paragraaf hebben gezien, is de in de spoel opgewekte spanning  $U$  (de inductiespanning dus) evenredig met het tempo waarin de magnetische flux door de spoel verandert. De magnetische flux door de spoel is evenredig met de stroomsterkte  $I$  door de spoel. Dit betekent dus dat de spanning over de spoel evenredig is met het tempo waarin de stroomsterkte verandert. We schrijven dit als volgt op.

$$U = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

In deze formule is  $\Delta I$  de verandering van de stroomsterkte en  $\Delta t$  de tijdsduur waarin dat gebeurt. Verder is  $L$  de evenredigheidsconstante en wordt de coëfficiënt van zelfinductie van de spoel genoemd of kortweg de zelfinductie van de spoel. We drukken  $L$  uit in de eenheid Henry, afgekort H. Het is belangrijk om te beseffen dat in de gehele paragraaf de elektrische weerstand van de spoel wordt verwaarloosd. De (koperen) windingen van de spoel zijn dus van voldoende dik draad gemaakt zodat we kunnen zeggen dat ze geen weerstand hebben.

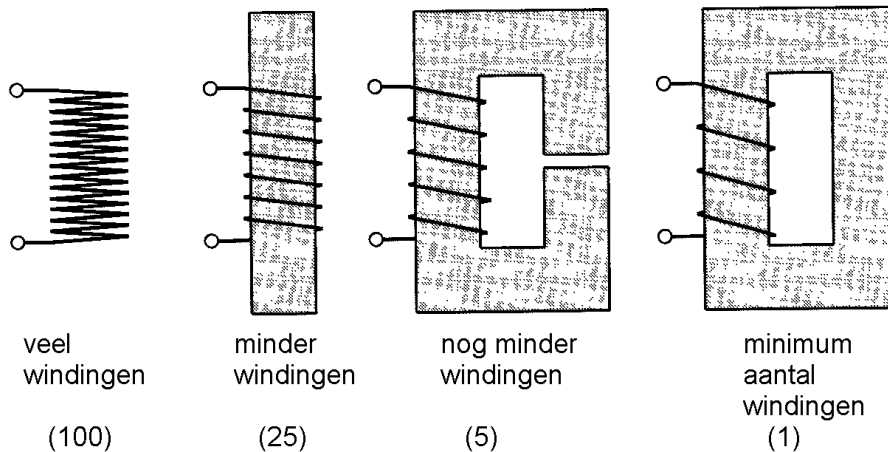
### Getallenvoorbeeld

Van een spoel bedraagt de zelfinductie 2 H (dit is een hoge waarde!). Als de stroomsterkte door de spoel in 1 ms toeneemt van 0 A tot 0,5 A, kan de spanning over de spoel als volgt berekend worden.

$$U = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t} = 2 \cdot \frac{0,5}{0,001} = 1000 \text{ V}$$

### Invloed van het aantal windingen en van een weekijzeren kern

Hoe meer windingen de spoel heeft, des te groter zijn zelfinductie is. Dit is logisch want elke winding draagt bij aan de sterkte van het magneetveld. Bovendien zal de aanwezigheid van een weekijzeren kern in de spoel de zelfinductie sterk vergroten. Ook dat is logisch omdat het weekijzer het magnetische veld versterkt.



De vier hiernaast getekende spoelen hebben ongeveer dezelfde zelfinductie. De spoel zonder weekijzeren kern (links) moet pakweg 100 keer zoveel windingen hebben als een kern met een gesloten weekijzeren kern (rechts).

### Vergelijking met de tweede wet van Newton

De bij een spoel behorende formule  $U = L \cdot \frac{\Delta I}{\Delta t}$  heeft dezelfde vorm als  $F = m \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t}$ .

Deze laatste formule wordt de tweede wet van Newton genoemd. Hierin geeft de massa  $m$  aan in welke mate het voorwerp zich tegen snelheidsveranderingen verzet. Op dezelfde manier geeft de zelfinductie  $L$  aan in welke mate de spoel zich tegen stroomsterkteveranderingen verzet.

# Opgaven bij § 7

In de volgende opgaven nemen we steeds aan dat de elektrische weerstand van de spoel nul is.

## Opgave 1

Welke formule beschrijft het verband tussen de spanning en de stroomsterkte van een spoel?

## Opgave 2

Door een spoel met een zelfinductie van  $0,030\text{ H}$  loopt een constante stroom van  $0,20\text{ A}$ .

a.  
Hoe groot is de spanning over de spoel?

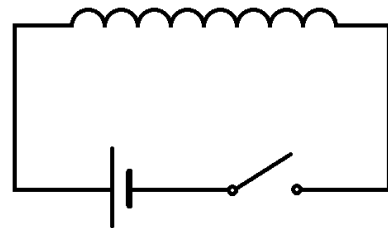
Gedurende  $60\text{ ms}$  neemt de stroomsterkte toe van  $0,20\text{ A}$  tot  $1,50\text{ A}$ .

b.  
Bereken in deze nieuwe situatie de spanning over de spoel.

## Opgave 3

In de figuur hiernaast heeft de spoel een zelfinductie van  $5,0\text{ mH}$  ( $\text{mH} = \text{millihenry}$ ) en levert de spanningsbron een spanning van  $10\text{ V}$ . Op een bepaald moment wordt de schakelaar gesloten.

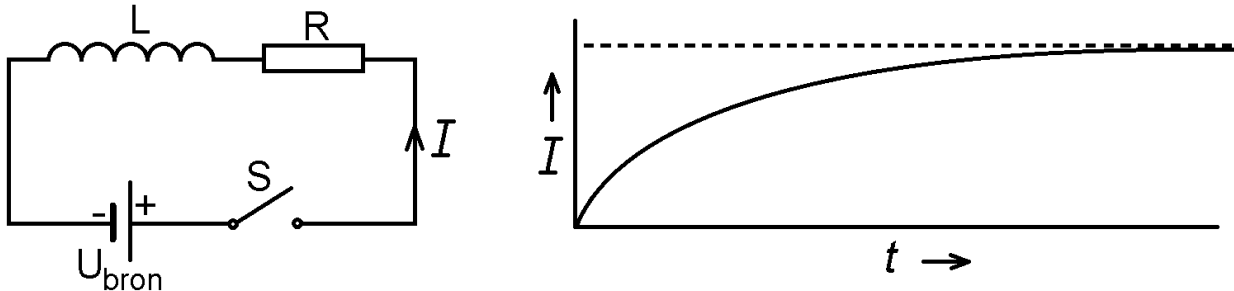
a.  
Leg uit dat de stroomsterkte lineair met de tijd toeneemt.



b.  
Bereken de stroomsterkte na één milliseconde.

#### Opgave 4

In de onderstaande linker figuur zijn spoel L en serieweerstand R op een spanningsbron met spanning  $U_{\text{bron}}$  aangesloten. Op een bepaald moment wordt de schakelaar S gesloten. De stroomsterkte door de stroomkring neemt dan toe zoals in de rechter figuur is weergegeven.



a.

Leg uit dat het onmogelijk is dat de stroomsterkte direct van nul naar zijn eindwaarde springt.

b.

Leg uit dat het tempo waarin de stroom toeneemt, steeds kleiner wordt. Gebruik daarbij het feit dat de spanning over de spoel gelijk is aan  $U_{\text{bron}} - I \cdot R$ .

c.

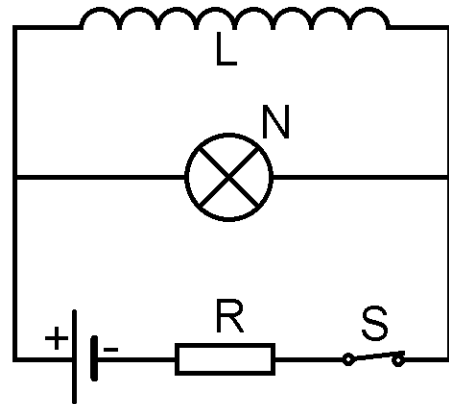
Leg uit of na het sluiten van de schakelaar het linker uiteinde van de spoel positief of negatief is ten opzichte van het rechter uiteinde van de spoel.

d.

Geef een uitdrukking voor de maximale waarde van de stroomsterkte (behorend bij de stippellijn in het diagram).

### Opgave 5

In de figuur hiernaast is spoel L met een grote zelfinductie parallel geschakeld aan neonlamp N. Het geheel is aangesloten op een spanningsbron met een kleine spanning (zeg 10 V). Ter beveiliging van de spanningsbron is serieweerstand R in de schakeling opgenomen. In eerste instantie is S gesloten. De spanning over N is te klein om hem licht te laten geven.



Op een gegeven moment wordt S geopend en wordt de stroom naar de parallelschakeling van L en N verbroken. Er ontstaat dan een inductiespanning in de spoel.

a.

Leg uit of de linker kant van spoel positief of negatief is ten opzichte van de rechter kant van de spoel.

b.

Leg uit dat de neonlamp even fel oplicht na het openen van S.

c.

Leg het nut uit van de serieweerstand R.

### Opgave 6 (valt buiten de lesstof)

De zelfinductie  $L$  van een spoel is evenredig met het kwadraat van het aantal windingen. Probeer daar een verklaring voor te geven.