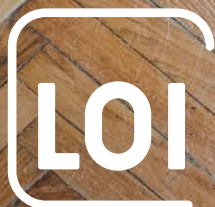


Bekijk een hoofdstuk uit de lesstof



OVER DE LESSTOF

Alleen bij de LOI ontvang je speciaal ontwikkeld lesmateriaal, waardoor het bijzonder geschikt is om zelfstandig te bestuderen. Dat zie je terug in de slimme opbouw.

Toegankelijk geschreven

Het lesmateriaal is toegankelijk geschreven, overzichtelijk en zo opgebouwd dat je je kennis steeds verder verdiept.

Relevant

Aan het begin van ieder hoofdstuk wordt aangegeven wat je gaat leren én waarom het belangrijk is dat je dat leert. Zo weet je altijd waar je naartoe werkt en wat je aan deze kennis hebt.

Trefwoorden

In de kantlijn staan trefwoorden. Hiermee kun je een onderwerp makkelijk en snel terugvinden.

Oefenopgaven

Met de oefenopgaven test je of je de opgedane kennis kunt toepassen. Aan het eind van het hoofdstuk zijn de antwoorden opgenomen. Kun je de oefenopgaven niet goed uitwerken, dan betekent dit dat je het bijbehorende deel van de leerstof nog eens moet doornemen.

Parate-kennisvragen

Aan het einde van het hoofdstuk vind je de parate-kennisvragen. Hiermee kun je testen of je de leerstof voldoende kent. De vragen zijn genummerd. Het antwoord kun je snel terugvinden dankzij de genummerde verwijzrondjes in de kantlijn.

Inzendopgaven

Als je de antwoorden op de parate-kennisvragen weet en de oefenopgaven goed kunt uitwerken, ga je verder met de inzendopgaven. Deze stuur je via de online leeromgeving ter beoordeling naar je docent. Binnen een paar dagen heb je een uitgebreid antwoord terug.

Bekijk nu een hoofdstuk uit de leerstof en ervaar het zelf

1

ELEKTRICITEITSLEER

Elektrische verschijnselen zoals bliksem en vonken zijn al sinds mensenheugenis bekend. Elektriciteit is een natuurverschijnsel en geen uitvinding, zoals sommige mensen wel denken. Wel zijn er een heleboel uitvindingen gedaan die gebruikmaken van elektriciteit. Denk bijvoorbeeld aan de gloeilamp, de computer of de elektrische auto. Zonder elektriciteit zou de maatschappij van vandaag prompt tot stilstand komen.

In dit hoofdstuk behandelen we de grondbeginselen van de elektriciteitsleer. Aan de hand van een aantal experimenten met statische elektriciteit wordt het fenomeen elektrische lading besproken. Vervolgens wordt uitgelegd wat elektrische spanning is, en hoe dit in een gesloten stroomkring zorgt voor een elektrische stroom. Ook leest u hoe u zelf elektrische spanning of stroomsterkte kunt meten. Ten slotte behandelen we de weerstand van apparaten en draden, en van welke factoren deze weerstand afhangt.

Statische elektriciteit

We beginnen onze ontdekkingsreis door de magische wereld van de elektriciteit met een aantal proeven. Op basis van deze proeven kunnen we enkele interessante en essentiële conclusies trekken over elektrische verschijnselen.

Demonstratieproef 1: papiersnippers

U pakt een pvc-buis (elektriciteitsbuis) en een wollen doek. U wrijft vervolgens een paar keer krachtig met de doek over de pvc-buis, en houdt de buis meteen daarna bij de papiersnippers. Wat u ziet gebeuren is dat de papiersnippers naar de pvc-buis schieten en daar als het ware aan vast blijven kleven. Ze worden dus duidelijk agetrokken door de buis.

NB Deze proef kunt u ook zelf thuis uitvoeren.



Afb. 1 Proef met de papiersnippers. (Bron: OGN.)

Demonstratieproef 2: waterstraal

U pakt een pvc-buis (elektriciteitsbuis) en een wollen doek. U wrijft vervolgens een paar keer krachtig met de doek over de pvc-buis, en houdt de buis meteen daarna bij de straal met stromend water uit de kraan. Wat u ziet gebeuren, is dat de waterstraal afbuigt naar de pvc-buis. Het water wordt dus duidelijk aangetrokken door de buis.

NB Deze proef kunt u ook zelf thuis uitvoeren.



Afb. 2 Proef met de waterstraal. (Bron: OGN.)

Demonstratieproef 3: pvc en perspex

Deel 1:

U hangt een pvc-buis aan een statief en wrijft die op met een wollen doek. Vervolgens wrijft u ook een tweede pvc-buis op en houdt die bij de hangende buis.

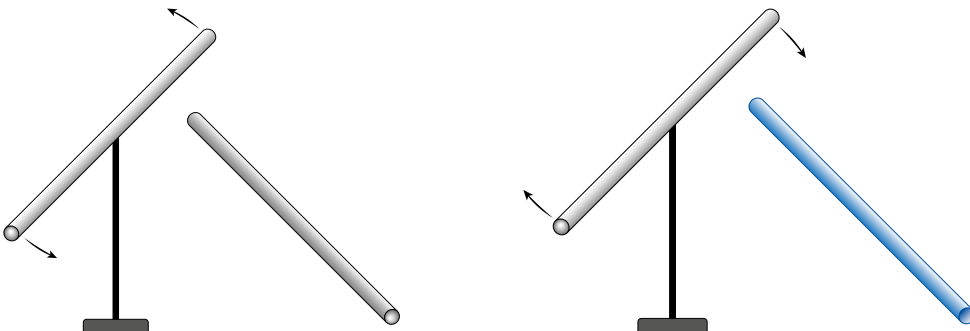
Wat u ziet gebeuren, is dat de hangende buis wegdraait van de andere buis: de buizen stoten elkaar duidelijk af.

Deel 2:

U hangt een pvc-buis aan een statief en wrijft die op met een wollen doek. Vervolgens wrijft u een perspex staaf op met een zijden doek en houdt die bij de hangende buis.

Wat u ziet gebeuren, is dat de hangende buis naar de perspex staaf toedraait: de buizen trekken elkaar duidelijk aan.

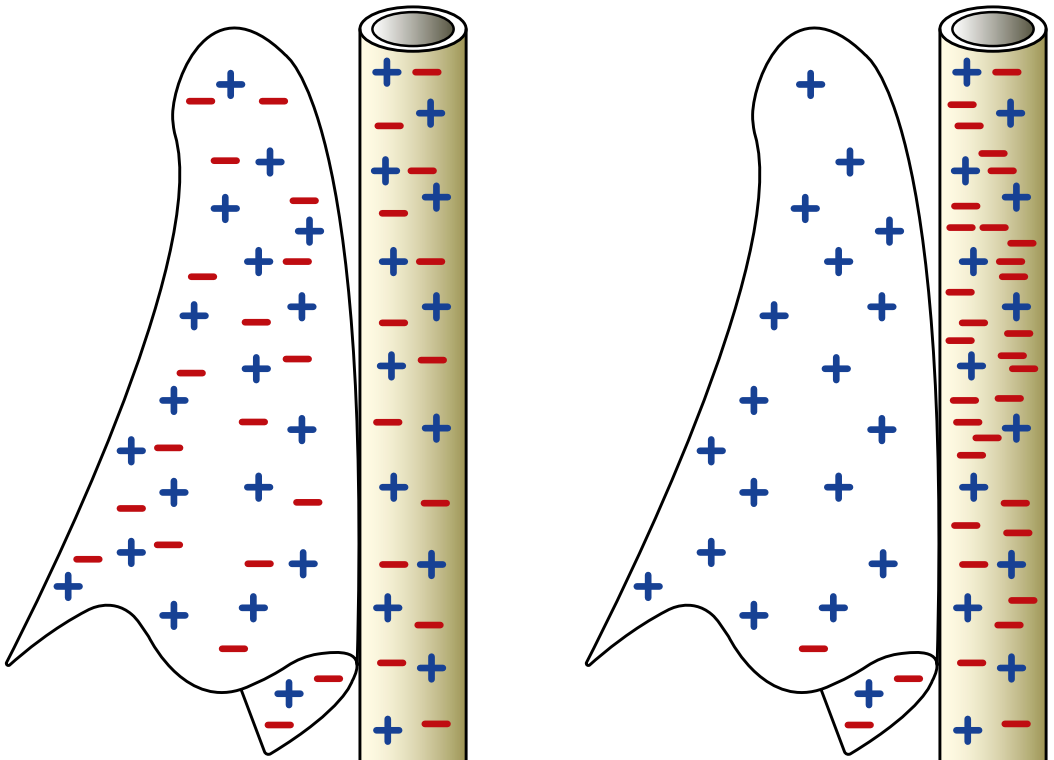
NB Bekijk ook de video in de mediatheek.



Afb. 3 Proef met pvc en perspex. (Bron: OGN.)

Alle verschijnselen in de vorige proeven zijn te verklaren door *statische elektriciteit*. Dit werkt in het geval van pvc en wol als volgt.

Door het wrijven 'springt' negatieve lading van de wollen doek naar de pvc-buis. Op de pvc-buis komt een 'overschot' aan negatieve elektrische lading: hij wordt negatief geladen. En op de wollen doek komt een 'tekort' aan negatieve elektrische lading: hij wordt positief geladen. Halen we de wollen doek en de pvc-buis uit elkaar, dan kan de lading niet meer terug en blijft die op de wollen doek en de pvc-buis zitten (zie afbeelding 4).



Afb. 4 Een wollen doek en pvc-buis voor opwrijven (links) en na opwrijven (rechts). (Bron: OGN.)

Zo'n niet-bewegende lading noemen we *statisch*. Het voorgaande betekent dat als een stof niet gewreven is, er evenveel positieve als negatieve lading in de stof zit. De stof heet dan *neutraal*. Let op dat neutraal dus niet betekent dat er 'geen lading' aanwezig is.

De Grieken waren de eersten die elektrische ladingen bestudeerden. Zij ontdekten dat als ze met een dierenvel een stuk barnsteen opwreven, de barnsteen vervolgens kleine pluusjes enzovoort aantrok. Barnsteen heet in het Grieks *elektron*, vandaar dat wij nu het hebben over elektrische verschijnselen et cetera.

Elektrische ladingen kunnen elkaar afstoten of aantrekken. Er zijn twee soorten elektrische ladingen. Er is ooit afgesproken dat de lading die ontstaat op een pvc-buis, gewreven met een wollen doek, negatief wordt genoemd. En de lading op een perspex staaf, gewreven met zijde, positief.

Welke conclusies kunt u nu uit de vorige proeven trekken?

- Bij deze proeven wordt geen elektrische lading gecreëerd of vernietigd. Het is alleen zo dat de ladingen die op de voorwerpen zitten, van elkaar gescheiden wordt. Na wrijving dragen de twee voorwerpen een tegengestelde lading.
- Twee gelijksoortige ladingen stoten elkaar af. Dus $+$ en $+$ stoten elkaar af, net als $-$ en $-$.
- Twee ongelijksoortige ladingen trekken elkaar aan. Dus $+$ en $-$ trekken elkaar juist aan.

Voorbeeld

Twee negatief geladen pvc-buizen stoten elkaar af.

Een negatief geladen pvc-buis en een positief geladen perspex staaf trekken elkaar aan.

En hoe zit het dan precies met de buigende waterstraal? Een molecule water heeft twee kanten: een positief geladen kant en een negatief geladen kant. De positief geladen kant van elk watermolecule zal naar de negatief geladen pvc-buis draaien. Een gevolg daarvan is dat de aantrekkende kracht groter is dan de afstotende kracht, waardoor de waterdruppels naar de pvc-buis toe zullen bewegen. Een soortgelijk verhaal geldt voor de proef met de papiersnippers.

Bliksem

Een ander voorbeeld van de scheiding van lading door middel van wrijving is onweer. In onweerswolken stromen sterk stijgende warme lucht en sterk dalende koude lucht vlak langs elkaar heen. Met deze stromingen worden ook elektrisch geladen deeltjes meegevoerd. Daardoor wordt de wolk elektrisch geladen. Wanneer de spanning tussen positieve en negatieve ladingen groot genoeg is, treedt er *doorslag* op: een geweldige *ontlading* die te zien is als *bliksem*.

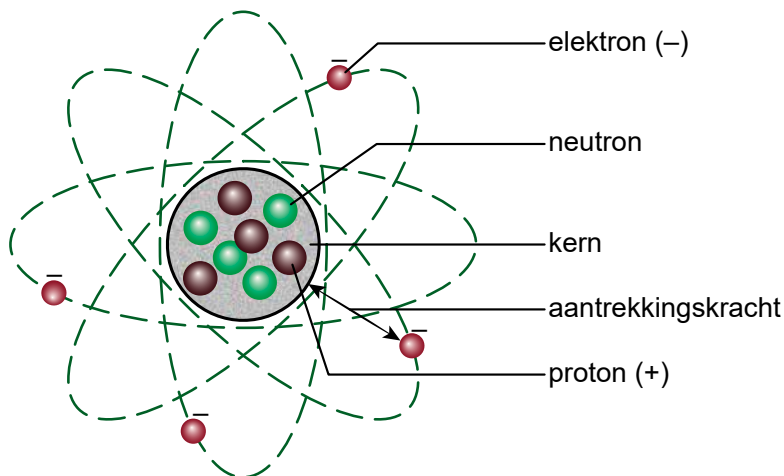


Afb. 5 Het vliegerexperiment van Benjamin Franklin. (Bron: 123RF)

De Amerikaan Benjamin Franklin voerde in 1752 een gevaarlijk experiment uit. Om erachter te komen of onweerswolken elektrisch geladen waren, liet hij tijdens een onweersbui een vlieger op. De vlieger raakte door de wolk inderdaad elektrisch geladen (zie afbeelding 5).

Het atoommodel van Rutherford

Het was diezelfde Benjamin Franklin die als eerste het onderscheid tussen positieve en negatieve lading aanbracht. Hij noemde glas dat opgewreven was, positief geladen. In 1897 ontdekte de Britse wetenschapper J. J. Thomson het bestaan van het *elektron*: een deeltje met een hele kleine massa en negatieve lading. Zijn bevindingen werden later, begin 20ste eeuw, aangevuld door de in Nieuw-Zeeland geboren Britse natuurkundige Ernest Rutherford. Hij formuleerde een model van de materie waarin niet alleen elektronen voorkomen, maar ook protonen en neutronen. Een *proton* is ook een klein deeltje, maar positief geladen en met een veel grotere massa dan een elektron (om precies te zijn: 1.800 keer zo groot). *Neutronen* hebben een even grote massa als protonen, maar zijn elektrisch neutraal. De protonen, neutronen en elektronen vormen samen een *atoom*. Volgens het model van Rutherford bestaat een atoom uit een kern van neutronen en positief geladen protonen, met daaromheen een wolk van negatief geladen elektronen (zie afbeelding 6).



Afb. 6 Schematische weergave van het atoommodel van Rutherford. (Bron: OGN.)

Normaal gesproken is een enkel atoom elektrisch neutraal, dat wil zeggen dat er evenveel elektronen in de wolk zitten als protonen in de kern.

Samengevat kunnen we dus stellen dat negatieve lading uit elektronen bestaat, en positieve lading uit protonen. Een hoeveelheid lading wordt uitgedrukt in de eenheid *coulomb*, afgekort C. De lading van een proton wordt de elementaire lading genoemd, hiervoor gebruikt men het symbool e . Er geldt dat $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

Geleiders en isolatoren

In een atoom bepaalt het aantal protonen in de kern met welke soort stof we te maken hebben. De configuratie van de elektronenwolk bepaalt de elektrische eigenschappen

van een stof. Niet alle elektronen hebben namelijk dezelfde afstand tot de kern. Elektronen verder van de kern vandaan ondervinden een kleinere elektrische aantrekkingskracht, en kunnen daarom gemakkelijker losgemaakt worden.

Stoffen waarbij veel energie nodig is om de buitenste elektronen los te maken van een atoom (denk bijvoorbeeld aan het opwrijven), noemen we *isolatoren*. Een isolator geleidt elektrische stroom bijzonder slecht. Bekende isolatoren zijn: glas, rubber, kurk, droog hout, kunststoffen enz.

Stoffen waarbij bij kamertemperatuur al veel elektronen losgemaakt zijn van de kern, noemen we *geleiders*. Die elektronen kunnen vrijelijk bewegen tussen de verschillende atomen van de geleider, daarom noemen we ze *vrije elektronen* of *geleidingselektronen*. In de volgende paragraaf zullen we nader ingaan op welke manier een elektrische stroom door een geleider kan lopen. Voorbeelden van geleiders zijn metalen (koper, ijzer, goud etc.) en koolstof (bijvoorbeeld een potloodstaafje).

Spanning en stroom

Elektriciteit wordt onder andere gebruikt voor de distributie van energie. De elektriciteit wordt opgewekt in de elektriciteitscentrale en gaat vervolgens via hoogspanningskabels naar huizen en bedrijven. Daarbij spelen twee begrippen uit de elektriciteitsleer een cruciale rol: elektrische spanning en elektrische stroom. In deze paragraaf zullen we die beide begrippen toelichten.

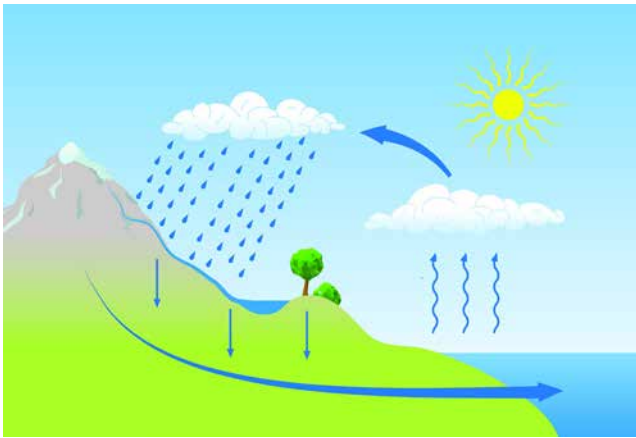


Afb. 7 Hoogspanningsmasten met hoogspanningskabels. (Bron: 123RF)

De waterkringloop: een analogie

Om uit te leggen hoe elektrische spanning en elektrische stroom samenhangen, bekijken we eerst een ander verschijnsel uit de natuur: de *waterkringloop*. We zullen laten zien dat er veel overeenkomsten zijn tussen de waterkringloop en een elektrische stroomkring.

Misschien herinnert u zich de waterkringloop nog wel uit de aardrijkskundeles. Door de warmte van de zon verdampt water (bijvoorbeeld van de zee). Warme lucht stijgt op totdat de lucht een hoogte bereikt waar het kouder is. Door de afkoeling condenseert het water in de lucht en ontstaan er wolken. Wolken bestaan uit vele kleine waterdruppeltjes. Als een wolk te zwaar wordt, dan zal het water weer naar beneden komen als neerslag (bijvoorbeeld regen of hagel). Zie ook afbeelding 8.



Afb. 8 De waterkringloop. (Bron: 123RF)

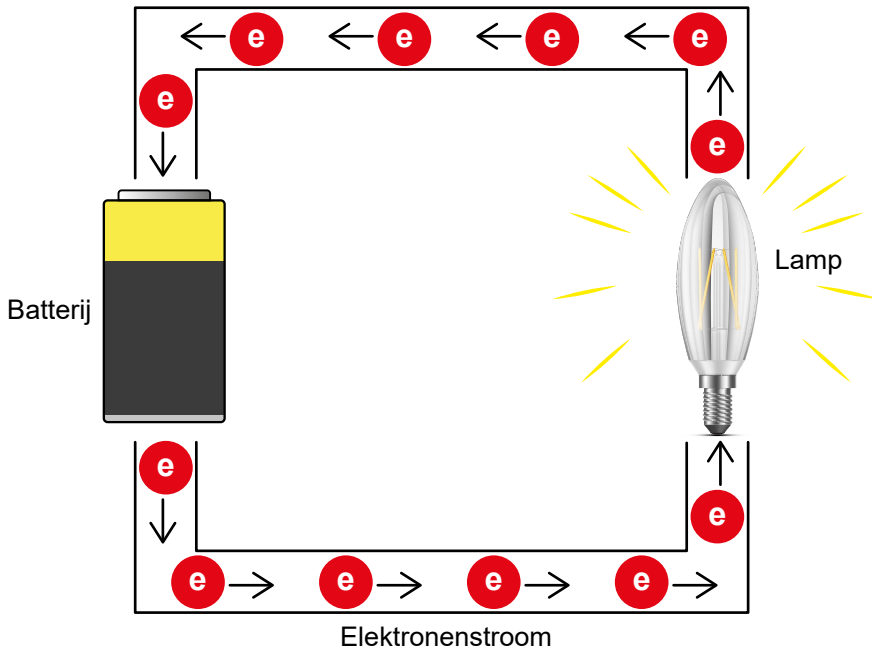
De neerslag zal de aarde op verschillende hoogten bereiken. In de bergen ontstaan rivieren, waardoor water *van hoog naar laag* zal stromen, totdat het uiteindelijk de zee bereikt. Er is altijd een *hoogteverschil* nodig om het water te laten stromen; zonder hoogteverschil staat het water stil (zoals in een meer). De snelheid waarmee het water stroomt, hangt af van de steilheid van het aardoppervlak.

In de waterkringloop zorgt de warmte-energie van de zon voor een *pompwerking*: het water wordt keer op keer in de atmosfeer rondgepompt.

De elektrische stroomkring

In een elektrische stroomkring is het een *spanningsbron* (zoals een batterij) die zorgt voor een pompwerking. Laten we het voorbeeld van de batterij maar eens uitwerken.

Een spanningsbron heeft altijd twee aansluitpunten: de polen. Bij een batterij is de ene pool positief en de andere negatief. In de batterij worden elektronen als gevolg van een chemische reactie van de pluspool naar de minpool 'gepompt'. Daardoor ontstaat er een soort hoogteverschil tussen de twee polen van de batterij. Dit verschil noemen we de *elektrische spanning*. De eenheid van elektrische spanning is naar de Italiaanse natuurkundige Alessandro Volta vernoemd: *volt*, afgekort V.



Afb. 9 Gesloten elektrische stroomkring met een batterij en een lampje. (Bron: OGN.)

Wanneer we een lampje met draden aansluiten op de batterij, dan ontstaat er een gesloten *stroomkring* (zie afbeelding 9). De spanning tussen de beide polen van de batterij zorgt ervoor dat de elektronen (buitenom de batterij) van de minpool door het lampje naar de pluspool zullen bewegen. Vergelijk dit met de waterdruppels in een rivier. In een rivier zorgt de zwaartekracht ervoor dat water van hoog naar laag stroomt, in een elektrische stroomkring is dat elektrische aantrekkingskracht. De bewegende elektronen vormen samen een *elektrische stroom*. Hoe meer elektronen een bepaald punt in de stroomkring passeren, hoe groter de *stroomsterkte* is. De stroomsterkte wordt uitgedrukt in *ampère* (afgekort: A). Deze eenheid is genoemd naar André-Marie Ampère, een Franse natuur- en wiskundige uit de late 18de en vroege 19de eeuw.

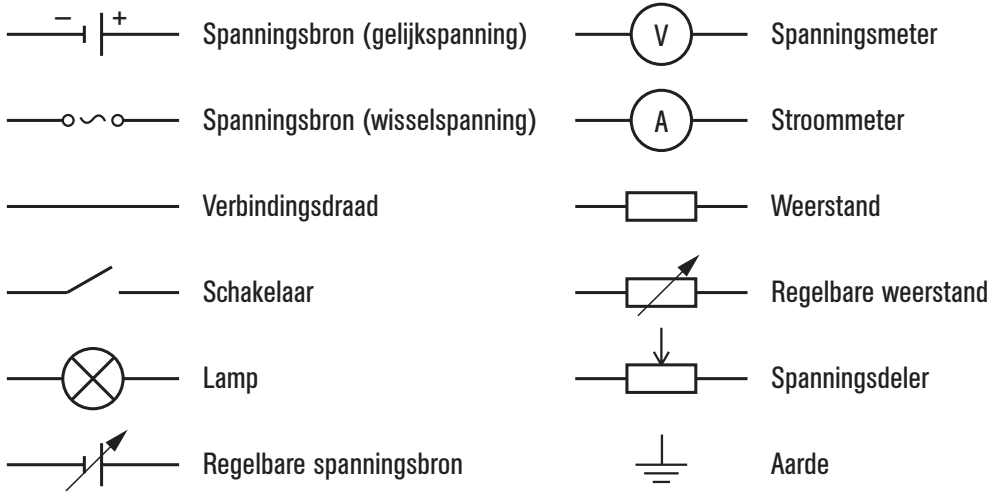
Voor de ontdekking van het elektron, eind 19de eeuw, dacht men dat elektrische stroom uit bewegende positief geladen deeltjes bestond. Vandaar dat we vandaag de dag nog steeds zeggen dat een stroom *van plus naar min* vloeit. Ook al zijn het eigenlijk de elektronen die van min naar plus bewegen.

Om een elektrische stroom te kunnen laten vloeien, moet aan twee voorwaarden worden voldaan:

- er moet een elektrische spanning aangebracht zijn
- er moet een gesloten stroomkring zijn.

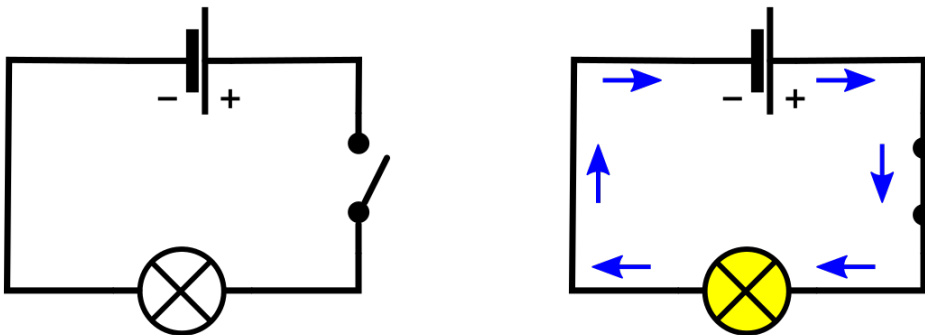
Een stroomkring kunnen we schematisch weergegeven door middel van een *schakelschema*.

Voor de verschillende elektrische componenten in een schakeling bestaan standaard-symbolen (zie afbeelding 10).



Afb. 10 Enkele veelvoorkomende elektrische symbolen. (Bron: OGN.)

De schakeling van een batterij, een schakelaar en een lampje wordt getekend zoals weergegeven in afbeelding 11.



Afb. 11 Een schakelschema voor een open stroomkring (links) en een gesloten stroomkring (rechts). (Bron: OGN.)

Wanneer de schakelaar openstaat, kan er geen elektrische stroom lopen. Wordt de schakelaar gesloten, dan zal er wel een elektrische stroom gaan lopen. De pijlen in afbeelding 11 geven de *stroomrichting* aan (dus van plus naar min). Bedenk dat de elektronen in de tegengestelde richting bewegen.

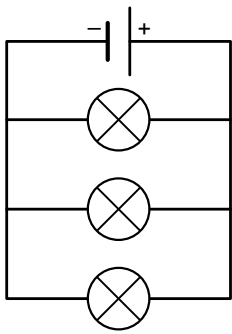
Een ander voorbeeld van een stroomkring is het licht op uw fiets. De spanningsbron van deze stroomkring is de dynamo. Van de dynamo loopt een draad naar de verlichting. Het metalen frame van de fiets is als het ware de tweede draad: de dynamo én de verlichting zijn met het frame verbonden. Hierdoor wordt de stroomkring gesloten.

Een belangrijk verschil tussen een batterij en een dynamo als spanningsbron is dat een batterij een *gelijkspanning* levert, en een dynamo een *wisselspanning*. Meer over het verschil tussen gelijk- en wisselspanning leest u in een later hoofdstuk.

Twee typen schakelingen

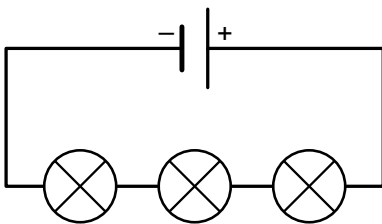
Voordat we de diverse componenten nader bekijken, bespreken we eerst twee fundamentele vormen van het schakelen van componenten. Deze kennis hebt u nodig bij het bestuderen van sommige componenten.

In afbeelding 12 ziet u een spanningsbron afgebeeld, samen met drie lampjes. Deze vorm van schakelen heet een *parallelschakeling*: de weerstanden zijn ‘naast elkaar’ geschakeld. Een kenmerk van een parallelschakeling is dat over alle componenten *dezelfde spanning* staat.



Afb. 12 Een parallelschakeling van drie lampjes. (Bron: OGN.)

In afbeelding 13 ziet u een andere schakeling van drie lampjes en een spanningsbron. Nu echter zijn de weerstanden niet naast elkaar, maar ‘achter elkaar’ geschakeld. Deze vorm van schakelen heet een *serieschakeling*. Een kenmerk van een serieschakeling is dat de stroom door alle componenten *dezelfde stroomsterkte* heeft.



Afb. 13 Een serieschakeling van drie lampjes. (Bron: OGN.)

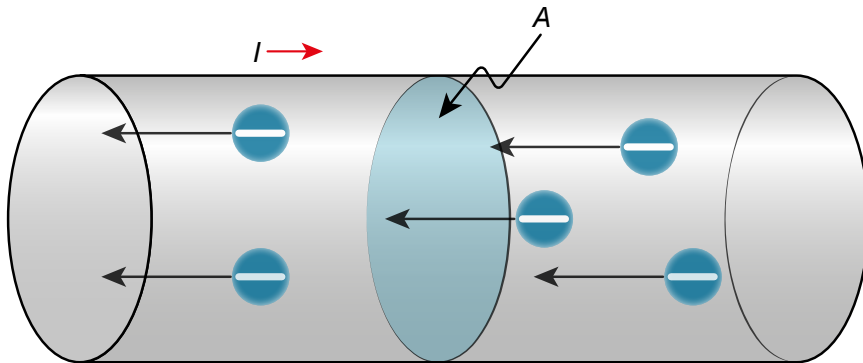
In het hoofdstuk ‘Schakelen van weerstanden’ gaan we verder in op de eigenschappen van deze schakelvormen. Voor nu is het voldoende dat u deze vormen kunt herkennen.

Potentiaalverschil en stroomsterkte

We zullen nu de elektrische grootheden spanning en stroomsterkte wat nauwkeuriger definiëren. Zoals we op een berg de hoogte (ten opzichte van het zeeniveau) kennen, zo bestaat er ook een ‘elektrische hoogte’. Die noemen we de *elektrische potentiaal*. Een hoogte wordt uitgedrukt in meters, een elektrische potentiaal in volts.

Een hoogteverschil is het niveau van het hoogste punt min het niveau van het laagste punt. Een elektrische spanning is hetzelfde als het *potentiaalverschil* tussen de hoogste en de laagste potentiaal. Het niveau van de potentiaal bij de aarde wordt meestal als nulpotentiaal gekozen (vergelijk dit met het zeeniveau van water). In formules gebruiken we het symbool U voor elektrische spanning of potentiaalverschil.

De stroomsterkte is gedefinieerd als de hoeveelheid lading die per seconde een doorsnede van een geleider passeert (zie afbeelding 14). Een stroomsterkte van 1 A (spreek uit: één ampère) komt overeen met $6,25 \times 10^{18}$ elektronen (oftewel 1 C) die elke seconde de doorsnede passeren. De stroomsterkte wordt aangeduid met het symbool I .



Afb. 14 De elektrische stroomsterkte is de hoeveelheid lading die elke seconde de doorsnede (aangeduid met de letter A van het Engelse 'area') passeert. (Bron: OGN.)

De richting van de stroom is altijd van de hoge naar de lage potentiaal, net zoals water altijd van hoog naar laag stroomt.



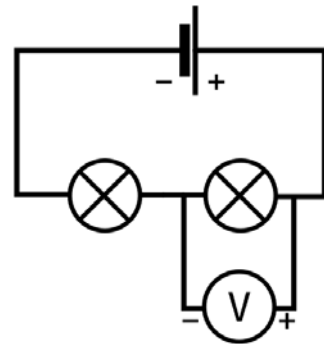
Afb. 15 Water stroomt altijd van hoog naar laag. (Bron: www.alamy.com.)

Spanning en stroomsterkte meten

Ook in de elektrotechniek geldt: meten is weten. Bijvoorbeeld als u een (gedeeltelijk) defect apparaat hebt. Dan is het belangrijk dat u weet hoe u de juiste meetinstrumenten op de juiste manier weet te hanteren. Zodat u de spanning op een bepaalde plaats in een apparaat kunt meten. Of de stroomsterkte door (een gedeelte van) het apparaat. In deze paragraaf zullen we het meten van de spanning en de stroomsterkte elk apart behandelen.

Spanning meten

Met een *voltmeter* meten we de spanning (of anders gezegd: het potentiaalverschil) tussen twee punten. Dat betekent dat een voltmeter *parallel* met een component of schakeling aangesloten moet worden (zie afbeelding 16 rechts). In afbeelding 16 (links) ziet u ook een foto van een analoge voltmeter. Merk op dat de voltmeter een *richting* heeft: de hoge potentiaal wordt aangesloten op een rode connector, de lage potentiaal op de zwarte connector. Het afgebeelde type voltmeter heeft drie meetbereiken (5, 15 en 30 volt), elk met een eigen rode connector.



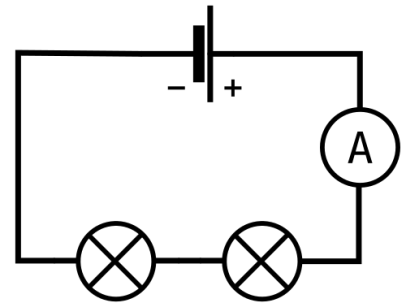
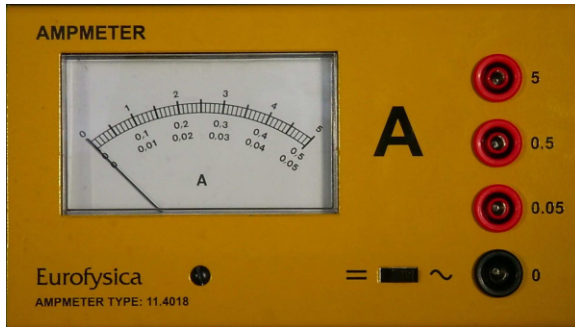
Afb. 16 Een analoge voltmeter (links) wordt parallel met een lampje geschakeld (rechts).

(Bron: OGN.)

Een voltmeter moet de schakeling waaraan gemeten wordt zo min mogelijk beïnvloeden. Dat betekent dat de meter maar heel klein beetje stroom nodig mag hebben om de meter correct te laten werken. Daarom heeft een voltmeter altijd een *hoge elektrische weerstand*. Meer over de weerstand van componenten of apparaten leest u in de volgende paragraaf.

Stroomsterkte meten

Voor het meten van stroomsterkte gebruiken we een *ampèremeter*. Omdat de elektrische stroom door de draden van de schakeling vloeit, moeten we de stroomkring onderbreken en de ampèremeter op de ontstane open plaats ertussen schakelen. Dat wil zeggen: *in serie*. De stroom zal daarna door de ampèremeter gaan (zie afbeelding 17 rechts). In afbeelding 17 (links) ziet u ook een foto van een analoge ampèremeter. Net als de voltmeter heeft ook de ampèremeter een *richting*. Dit type ampèremeter heeft drie bereiken: 0,05 A, 0,5 A en 5 A.



Afb. 17 Een analoge ampèremeter (links) wordt in serie met twee lampjes geschakeld (rechts).

(Bron: OGN.)

Ook voor de ampèremeter geldt dat de schakeling waaraan gemeten wordt, zo min mogelijk beïnvloed mag worden. De stroom moet bijna ongehinderd door de ampèremeter kunnen vloeien; daarom heeft een ampèremeter een *lage elektrische weerstand*.

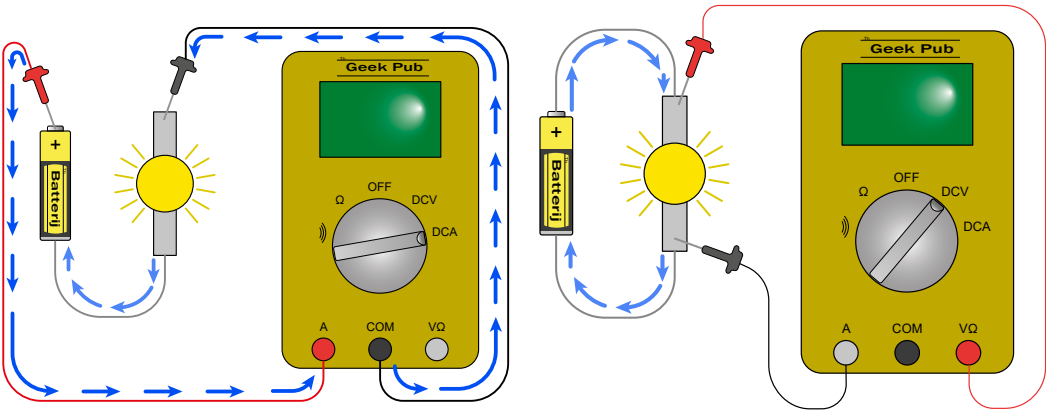
De multimeter

Met een *multimeter* zijn verschillende elektrische grootheden (gelijkspanning, wisselspanning, gelijkstroom, wisselstroom, weerstand, etc.) digitaal te meten. Met een schakelaar op de multimeter kunnen we selecteren welke grootheid we willen meten, en met welk meetbereik (zie afbeelding 18). Het voordeel van een digitale uitlezing is dat het maken van afleesfouten geringer is dan bij een uitlezing van een analoge meter (met een wijzer). Een multimeter wordt ook wel een universeelmeter genoemd.



Afb. 18 Een digitale multimeter. (Bron: OGN.)

Voor het meten van stroomsterkte dient de multimeter op een andere manier aangesloten te worden dan voor het meten van spanning. In afbeelding 19 is weergegeven hoe u de multimeter aansluit voor het meten van stroomsterkte (links) of spanning (rechts).



Afb. 19 Zo sluit u een digitale multimeter aan voor het meten van stroomsterkte (links) of spanning (rechts). (Bron: OGN.)

Elektrische weerstand

In Nederland werken elektrische apparaten op een wisselspanning van 230 V. Hoeveel stroomsterkte er bij die spanning door een elektrisch apparaat loopt, wordt bepaald door de elektrische weerstand van dat apparaat. Of beter gezegd: door de weerstand van de onderdelen van dat apparaat. De weerstand is een eigenschap van een elektrisch onderdeel. In de tabel ziet u een overzicht van de stroomsterkte voor verschillende apparaten.

Apparaat	Stroomsterkte (A)
spaarlamp 10 W	0,04
televisie	0,5
koelkast	0,6
strijkijzer	10
wasdroger	8
wasmachine	13

De *verhouding* tussen *de spanning* over een onderdeel van het apparaat en *de stroomsterkte* door dat onderdeel noemen we de *elektrische weerstand*. Dat kunnen we ook in een formule zetten:

$$R = \frac{U}{I}.$$

Hierin is R de weerstand (de R komt van het Engelse ‘resistance’), U de spanning en I de stroomsterkte. Deze formule staat bekend als *de wet van Ohm* (vernoemd naar de Duitse natuurkundige Georg Ohm). De eenheid van weerstand is de ohm, hiervoor noteren we de Griekse letter Ω .

Voorbeeld

De stroomsterkte in een bepaalde lamp is 0,33 A bij een spanning van 230 V. De weerstand is dan:

$$R_{\text{lamp}} = \frac{U}{I} = \frac{230}{0,33} = 690 \, \Omega$$

Bij een strijkijzer is de stroomsterkte bij een spanning van 230 V bijvoorbeeld 10 A. De weerstand is dan:

$$R_{\text{strijkijzer}} = \frac{U}{I} = \frac{230}{10} = 23 \, \Omega$$

Het strijkijzer heeft dus de kleinste weerstand.

Uit het vorige voorbeeld blijkt dat bij een gelijke spanning de stroomsterkte kleiner is als de weerstand groter is. We zeggen ook: de stroomsterkte is *omgekeerd evenredig* met de weerstand. Dat wordt ook duidelijk wanneer we de formule voor de wet van Ohm anders schrijven:

$$I = \frac{U}{R}.$$

U ziet dat de R in de noemer van de breuk staat. Dus als R groter wordt, dan wordt I kleiner.

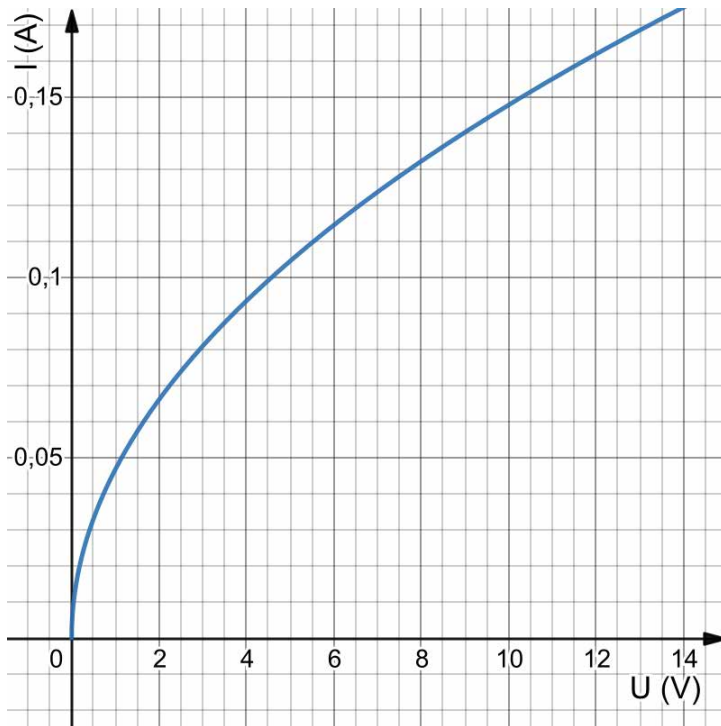
Het I,U-diagram

Laten we eens twee experimenten bekijken.

Demonstratieproef

U wilt de weerstand van een gloeilampje (zo eentje voor de fiets) bepalen. Daartoe sluit u het gloeilampje aan op een regelbare spanningsbron. Met de instelknop kunt u verschillende niveaus voor de spanning instellen. Ook sluit u een voltmeter (parallel) en een ampèremeter (in serie) aan. Vervolgens begint u bij een spanning van 0 V (controleren met de voltmeter voor de nauwkeurigheid!) en meet u de stroomsterkte door het lampje. Daarna verhoogt u de spanning steeds in stappen van 1,0 V: u noteert steeds de ingestelde spanning en de stroomsterkte. U gaat net zolang door totdat het lampje op een gegeven moment doorbrandt. Tot slot zet u de gemeten stroomsterkte uit tegen de spanning in een grafiek (zie afbeelding 20).

De grafiek van afbeelding 20 noemen we een *I,U-diagram*. Op de horizontale as staat de spanning U , op de verticale as de stroomsterkte I . U ziet dat de grafiek gekromd is: de *verhouding* tussen de stroomsterkte en de spanning is *niet constant*. Daarom is ook de weerstand van het gloeilampje niet constant, die varieert met de spanning. Om de weerstand bij een bepaalde spanning te berekenen, lezen we de stroomsterkte bij die spanning af uit de grafiek.



Afb. 20 *I,U*-diagram voor een gloeilampje van 0,45 W. (Bron: OGN.)

Voorbeeld

De stroomsterkte bij 1,0 V is ongeveer 0,05 A. De weerstand bij 1,0 V is dus

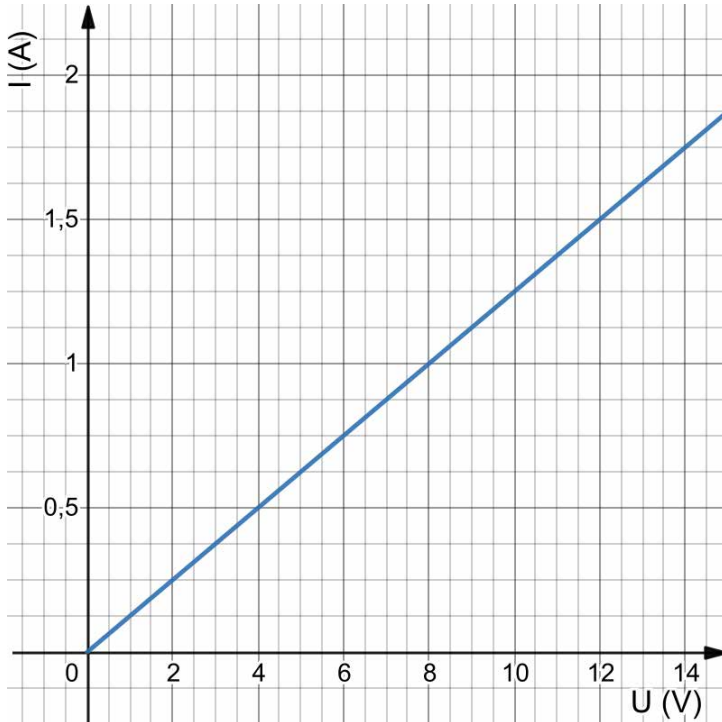
$$R = \frac{1}{0,05} = 20 \, \Omega.$$

Demonstratieproef

Deze proef lijkt heel erg op de proef met het gloeilampje. Alleen nemen we deze keer een stuk constantaandraad van 0,5 m van 0,2 mm dik en bepalen we daarvan de weerstand. Ook deze keer beginnen we weer bij een spanning van 0 V, en verhogen deze steeds in stappen van 1,0 V tot 15,0 V. Wanneer de gemeten stroomsterkte tegen de ingestelde spanning uitgezet wordt in een grafiek, krijgen we het I,U-diagram van afbeelding 21.

U ziet dat het I,U-diagram voor constantaan een rechte lijn is: de *verhouding* tussen stroomsterkte en spanning is dus *constant*. Uit het I,U-diagram lezen we af: bij $U = 8,0 \text{ V}$ is de stroomsterkte $I = 1,0 \text{ A}$. De richtingscoëfficiënt van de lijn in het diagram is dus

$\frac{1,0}{8,0} = 0,125$. Maar we hebben I door U gedeeld, en dat is $\frac{1}{R}$ (het omgekeerde van de weerstand). De weerstand wordt berekend als $R = \frac{1}{1/8} = 8 \, \Omega$. Uit de grafiek blijkt dat die voor constantaan constant is.



Afb. 21 I,U -diagram voor 0,5 m constantaandraad van 0,2 mm dik. (Bron: OGN.)

Constantaan is een legering van 40% nikkel en 60% koper. Constantaan heet zo omdat de weerstand van dit materiaal praktisch niet beïnvloed wordt door temperatuurschommelingen.

Een apparaat of onderdeel met een weerstand die constant is voor alle spanningen, heet een *ohmse weerstand*.

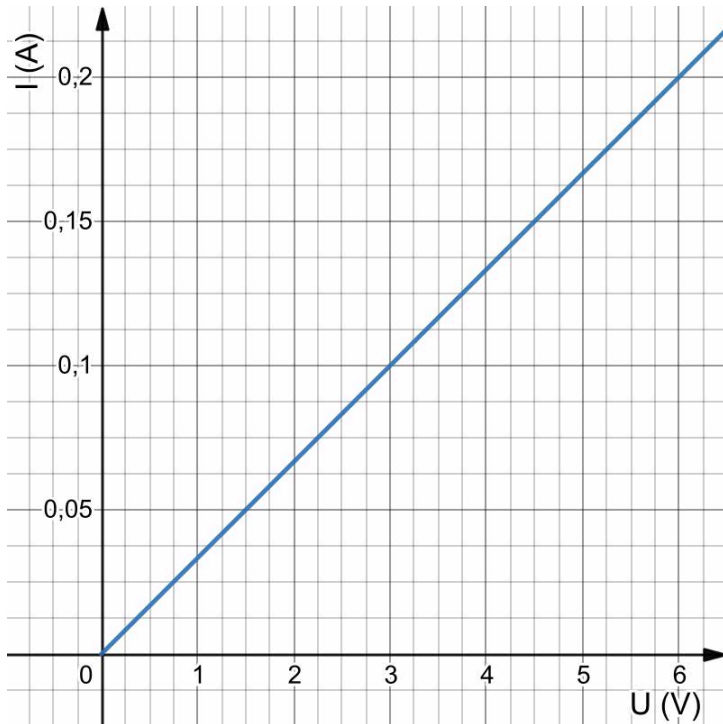
NB De richtingscoëfficiënt van een I,U -diagram wordt uitgedrukt in de eenheid A/V (omdat we stroomsterkte delen door spanning). Voor stroom gedeeld door spanning (dat is het omgekeerde van weerstand) gebruikt men het begrip *geleiding*, met als symbool G . In formule:

$$G = \frac{1}{R} = \frac{I}{U}.$$

De eenheid van geleiding is de *siemens* (afgekort: S). Naarmate een I,U -diagram steiler loopt, is de geleiding groter (en de weerstand dus groter).

Voorbeeld

Een elektrisch broodrooster heeft twee gloeidraden die rondom een ijzerwerk gevlochten zijn. Jeroen demonteert een broodrooster en meet de stroomsterkte door één van de gloeidraden bij verschillende spanningen. Hij verwerkt zijn meetresultaten in een I,U -diagram (zie afbeelding 22).



Afb. 22 I,U -diagram voor de gloeidraad. (Bron: OGN.)

Gevraagd:

- Hoe groot is de geleiding van de gloeidraad?
- Hoe groot is de weerstand van de gloeidraad?

Oplossing:

- De helling van de grafiek is $\frac{0,2}{6,0} = 0,333$, dus $G = 0,333 \text{ S}$.
- $R = \frac{1}{G} = \frac{6,0}{0,2} = 30 \Omega$.

Rekenen met de wet van Ohm

De wet van Ohm geeft het verband tussen de drie elektrische grootheden spanning, stroomsterkte en weerstand. Als twee van deze drie grootheden bekend zijn, dan kan de derde berekend worden met de wet van Ohm.

De hoofdvorm van de wet van Ohm is $R = \frac{U}{I}$. Door in deze formule links en rechts van

het '='-teken met hetzelfde symbool te vermenigvuldigen (of door hetzelfde symbool te delen) krijgen we de volgende afgeleide vormen:

$$U = I \cdot R, \text{ en}$$

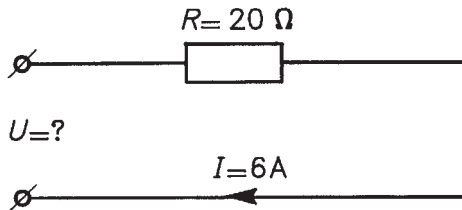
$$I = \frac{U}{R}.$$

De volgende voorbeelden laten zien hoe u rekt met de wet van Ohm. Voor de duidelijkheid is steeds ook een schema toegevoegd.

Voorbeeld 1

Door een weerstand van $20\ \Omega$ vloeit een stroom van $6\ \text{A}$ (zie afbeelding 23).

Bereken op welke spanning deze weerstand is aangesloten.



Afb. 23 (Bron: OGN.)

Gegeven: $R = 20\ \Omega$, $I = 6\ \text{A}$

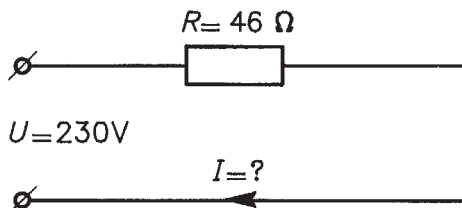
Gevraagd: U

Oplossing: $U = R \cdot I = 20 \cdot 6 = 120\ \text{V}$

Voorbeeld 2

Op een spanning van $230\ \text{V}$ is een weerstand aangesloten van $46\ \Omega$ (zie afbeelding 24).

Bereken hoeveel stroom door de weerstand vloeit.



Afb. 24 (Bron: OGN.)

Gegeven: $U\ 230\ \text{V}$, $R = 46\ \Omega$

Gevraagd: I

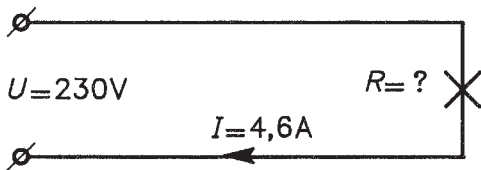
Oplossing: $I = \frac{U}{R}$

$$I = \frac{230}{46} = 5\ \text{A}$$

Voorbeeld 3

Door een gloeilamp, die aangesloten is op $230\ \text{V}$, vloeit een stroom van $4,6\ \text{A}$ (zie afbeelding 25).

Bereken hoe groot de weerstand van de gloeilamp is.



Afb. 25 (Bron: OGN.)

Gegeven: $U = 230 \text{ V}$, $I = 4,6 \text{ A}$ Gevraagd: R Oplossing: $R = \frac{U}{I}$

$$R = \frac{230}{4,6} = 50 \Omega$$

De weerstand van een geleider

Ook een elektriciteitskabel of het aansluitsnoer van een apparaat heeft elektrische weerstand. De kern van een kabel of snoer bestaat bijna altijd uit koper, omdat dat een erg goede geleider is. De weerstand van een geleider heeft twee gevolgen:

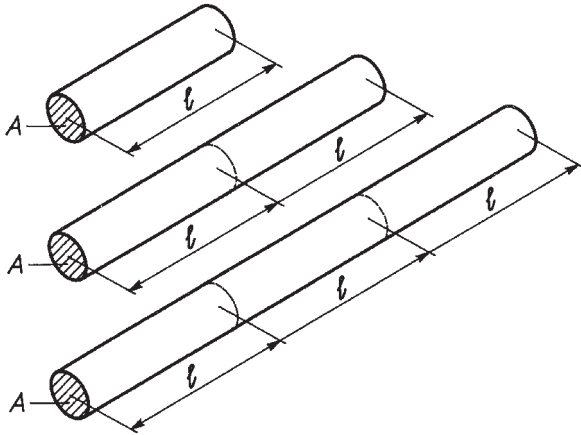
- spanningsverlies
- warmteontwikkeling in de geleider.

Bij een grote stroomsterkte zal de geleider vanwege de weerstand warm worden, of zelfs heet. Dat kan brandgevaar opleveren. Daarom is het belangrijk in elke situatie de juiste kabel of het juiste aansluitsnoer te kiezen. In deze paragraaf bespreken we drie factoren die van invloed zijn op de weerstand van een geleider, namelijk:

- de lengte van de geleider
- de doorsnede van de geleider
- het materiaal van de geleider.

Lengte van de geleider

Alle materialen, ook de materialen die als geleider gebruikt worden, hebben een elektrische weerstand. De grootte van de weerstand wordt mede bepaald door de lengte van de geleider. Wordt van een bos installatiedraad een lengte van één meter afgeknipt en vervolgens hiervan de weerstand gemeten, dan zal dit stuk een bepaalde weerstand hebben. Herhaalt men de meting, maar neemt men nu een stuk van twee meter, dan blijkt de weerstand tweemaal zo groot te zijn. Met andere woorden: *is de lengte tweemaal zo groot, dan is ook de weerstand tweemaal zo groot*. Uit proeven blijkt dat elke meter installatiedraad de weerstand van de draad met eenzelfde waarde doet toenemen (zie afbeelding 26). We kunnen dan ook zeggen dat de weerstand van een geleider *recht evenredig* is met de lengte daarvan.



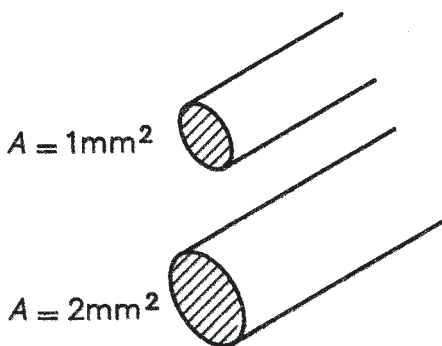
Afb. 26 Wordt de lengte twee keer zo groot, dan wordt ook de weerstand twee keer zo groot.

(Bron: OGN.)

Doorsnede van de geleider

Een tweede factor die de weerstand van een geleider bepaalt, is de doorsnede. Of beter gezegd: de oppervlakte van de doorsnede.

Nemen we twee stukken koperdraad elk met een lengte van één meter, waarvan de één een doorsnede heeft van 1 mm^2 en de andere een doorsnede van 2 mm^2 , dan zal de elektrische stroom in de dikke draad minder weerstand ondervinden dan in de dunne draad. U kunt dit vergelijken met een snelweg: hoe breder de snelweg, hoe meer auto's per seconde een bepaald punt kunnen passeren. Voor elektronen betekent een dikke draad dus minder weerstand. Het blijkt dat wanneer *de doorsnede verdubbeld wordt, de weerstand van de geleider dan gehalveerd wordt* (zie afbeelding 27). Met andere woorden: de weerstand van een geleider is *omgekeerd evenredig met de doorsnede* daarvan.

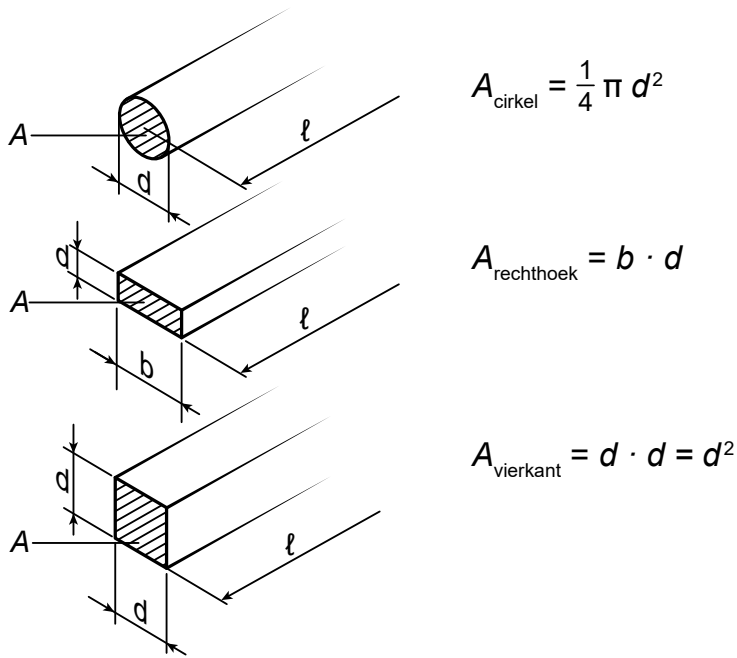


Afb. 27 Wordt de doorsnede twee keer zo groot, dan wordt de weerstand twee keer zo klein.

(Bron: OGN.)

Voor de oppervlakte van de doorsnede gebruikt men het symbool A (van het Engelse woord 'area'). De bijbehorende eenheid is de vierkante meter, afgekort m^2 . In de praktijk wordt de doorsnede van een geleider meestal gegeven in vierkante millimeter. 1 mm^2 komt overeen met 10^{-6} m^2 .

Het kan voorkomen dat niet de doorsnede van een geleider gegeven is, maar de afmetingen ervan. Met formules uit de wiskunde kan dan de oppervlakte van de doorsnede berekend worden voor bijvoorbeeld een cirkelvormige of rechthoekige doorsnede (zie afbeelding 28).



Afb. 28 Berekening van de oppervlakte van de doorsnede voor verschillende vormen. (Bron: OGN.)

Soortelijke weerstand

Niet alle materialen geleiden een elektrische stroom even goed, want dat is afhankelijk van het soort materiaal. Om de elektrische eigenschappen van verschillende materialen te kunnen vergelijken, gebruiken we de grootheid *soortelijke weerstand* (weerstand afhankelijk van het soort materiaal). De soortelijke weerstand is de weerstand die u meet bij 15 °C voor een stuk materiaal met een lengte van exact één meter en een doorsnede van exact 1 m². Zo is de soortelijke weerstand van koper bijvoorbeeld $0,0175 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$. Voor de soortelijke weerstand gebruiken we de Griekse letter ρ (spreek uit: roo), de bijbehorende eenheid is Ωm .

In de volgende tabel ziet u de soortelijke weerstand van een aantal verschillende materialen. Uit deze tabel is bijvoorbeeld af te lezen dat zilver een betere geleider is dan zink (want de soortelijke weerstand van zilver is lager dan die van zink). Of dat ijzer een slechtere geleider is dan koper.

materiaal	soortelijke weerstand (Ωm)	materiaal	soortelijke weerstand (Ωm)
aluminium	$0,03 \cdot 10^{-6}$	nikkel	$0,13 \cdot 10^{-6}$
constantan	$0,48 \cdot 10^{-6}$	nikkeline	$0,3 \cdot 10^{-6}$
goud	$0,022 \cdot 10^{-6}$	platina	$0,095 \cdot 10^{-6}$
koper	$0,0175 \cdot 10^{-6}$	ijzer of zachtstaal	$0,125 \cdot 10^{-6}$
kwik	$0,95 \cdot 10^{-6}$	tin	$0,13 \cdot 10^{-6}$
lood	$0,2 \cdot 10^{-6}$	wolfram	$0,05 \cdot 10^{-6}$
messing	$0,07 \cdot 10^{-6}$	zilver	$0,016 \cdot 10^{-6}$
nichroom	$1,03 \cdot 10^{-6}$	zink	$0,07 \cdot 10^{-6}$
koolstof	$100 - 1.000 \cdot 10^{-6}$	zwavelzuur 30%	$14.000 \cdot 10^{-6}$

Rekenen met de soortelijke weerstand

De drie factoren die gezamenlijk de weerstand van een geleider bepalen (lengte ℓ , doorsnede A en soortelijke weerstand ρ) kunnen in een formule gecombineerd worden:

$$R = \rho \cdot \frac{\ell}{A}.$$

Met deze formule is de weerstand van een geleider (of een ander soort materiaal) te berekenen als de afmetingen bekend zijn.

Voorbeeld

Bereken de weerstand van een bos installatiedraad met een lengte van 100 m en een doorsnede van 2,5 mm².

Gegeven: $\ell = 100 \text{ m}$, $A = 2,5 \text{ mm}^2$, $\rho = 0,0175 \cdot 10^{-6} \text{ Ωm}$

Gevraagd: R

De weerstand wordt nu:

$$R = \rho \cdot \frac{\ell}{A} = 0,0175 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{100}{2,5 \cdot 10^{-6}} = 0,7 \text{ Ω}$$

Spanningsverlies

Wordt een elektrisch toestel op een grote afstand van het elektrische voedingspunt aangesloten, dan moet de stroom deze afstand overbruggen om bij het toestel te komen. Om de stroom te laten vloeien, is spanning nodig. Zoals eerder al is uitgelegd, heeft iedere geleider, kort of lang, een elektrische weerstand. Wordt de lengte groter, dan wordt de te overbruggen weerstand ook groter. Met andere woorden: een deel van de totale spanning is nodig om de weerstand van de draad te overbruggen. Deze deelspanning wordt het *spanningsverlies* genoemd. Dat is logisch, want de spanning die nodig is om de weerstand van de geleider te overbruggen, komt niet ter beschikking van het toestel, maar is gebruikt om de stroom bij het toestel te krijgen.

Voorbeeld

Een elektrische terrasverwarming wordt aangesloten op 230 V door middel van een twee-aderige kabel met een doorsnede van 2,5 mm² en een lengte van 20 m. De aders zijn van koper gemaakt. De twee-aderige kabel bestaat uit één toevoerdraad (spanningsdraad) en één afvoerdraad (nuldraad). Wanneer de kachel ingeschakeld wordt,

vloeit er een stroom van 10 A. Met de formule $R = \rho \frac{\ell}{A}$ is te berekenen dat de weer-

stand van elke draad $0,14 \, \Omega$ is. De spanning over elke draad is $U_{draad} = R \cdot I = 0,14 \cdot 10 = 1,4 \, \text{V}$. Het totale spanningsverlies komt daarmee op $2,8 \, \text{V}$. Voor de kachel zelf blijft dan $U_{kachel} = 230 - 2,8 = 221,2 \, \text{V}$ over.