

6 Elektriciteit

6.0 Overzicht

6.1 Lading

- Wat is het symbool van elektrische lading en wat is de eenheid van lading?
- Kan elektrische lading ontstaan of verdwijnen?
- Wanneer is er aantrekkende kracht en wanneer afstotende kracht?
- Waarvoor wordt een elektroscop gebruikt en hoe werkt een elektroscop?
- Wat gebeurt er in een Van de Graaff generator en wat kan je er mee doen?
- Wat wordt er bedoeld met de elementaire lading? Hoe groot is die?

6.2 Spanning en stroom

- Wat is het symbool van elektrische spanning en wat is de eenheid van spanning?
- Hoe bereken je de elektrische energie uit de lading en de spanning?
- Wat is het symbool van elektrische energie en wat is de eenheid van energie?
- Welke spanningsbronnen zijn er?
- Wat gebeurt er met de spanning als je twee spanningsbronnen in serie schakelt?
- Hoeveel spanning heeft het lichtnet in Europa?
- Wat is een condensator en wat kun je er mee doen?
- Wat is elektrische stroom?

6.3 Stroomkring

- Wat wordt bedoeld met een stroomkring?
- Waarvoor dient de spanningsbron in de stroomkring?
- Wat is de stroomsterkte?
- Wat is het symbool van stroomsterkte en wat is de eenheid van stroomsterkte?
- Hoe moet een stroommeter (ampèremeter) worden aangesloten?
- Hoe geef je een ampèremeter aan?
- Welke eigenschappen heeft een ideale stroommeter?
- Hoe moet een spanningsmeter (voltmeter) worden aangesloten?
- Hoe geef je een voltmeter aan?
- Welke eigenschappen heeft een ideale spanningsmeter?

6.4 Weerstand

- Wat is het symbool van weerstand en wat is de eenheid van weerstand?
- Wat is de wet van Joule?
- Hoe ziet een (I, U)-diagram eruit van een ohmse weerstand?
- Hoe ziet een (I, U)-diagram eruit van een gloeilamp?
- Met welke formule bereken je de weerstand van een draad?
- Wat is de soortelijke weerstand?
- Hoe bereken je de doorsnede A van een draad?
- Hoe bereken je de diameter uit de doorsnede?

6.5 Serieschakeling en parallelschakeling

- Hoe zijn weerstanden geschakeld in een serieschakeling?
- Wat weet je van de stroomsterkte in een serieschakeling?
- Wat weet je van de spanning in een serieschakeling?
- Hoe verdeelt de spanning zich in een serieschakeling?
- Wat bedoel je met de vervangingsweerstand?
- Hoe bereken je de vervangingsweerstand in een serieschakeling?
- Hoe zijn weerstanden geschakeld in een parallelschakeling?
- Wat weet je van de spanning in een parallelschakeling?
- Wat weet je van de stroomsterkte in een parallelschakeling?
- Hoe verdeelt de stroom zich in een parallelschakeling?
- Hoe bereken je de vervangingsweerstand in een parallelschakeling?
- Wat is een gemengde schakeling?

6.6 Elektrische energie

- Met welke formule bereken je de elektrische energie?
- Wat is het vermogen?
- Wat is het symbool van vermogen en wat is de eenheid van vermogen?
- Wat is de wet van Joule?
- Welke grootte hoort bij de eenheid kilowattuur (kWh)?
- Hoeveel joule is één kilowattuur?
- Welke formules krijg je als je de wet van Ohm met de wet van Joule combineert?
- Wat is rendement?
- Wat is het symbool van rendement en waarom heeft rendement geen eenheid?

6.7 Bijzondere weerstanden

- Welke eigenschap heeft een NTC-weerstand?
- Welke eigenschap heeft een lichtgevoelige weerstand (LDR)?
- Welke eigenschap heeft een diode?
- Welke eigenschap heeft een licht-emitterende diode (LED)?

6.8 De huisinstallatie

- Hoe komt elektriciteit het huis binnen?
- Waarom is er een hoofdschakelaar en een hoofdzekering?
- Wat doet een kWh-meter?
- Wat zijn groepen?
- Wat is de functie van een zekering?
- Hoe werkt een aardlekschakelaar?
- Welke soort draden worden er in een huis gebruikt?
- Wat is het verschil tussen een 1-polige en een 2-polige schakelaar?
- Hoe zijn stopcontacten geschakeld?
- Wat is het verschil tussen een geaard en een niet-geaard stopcontact?
- Wanneer is er sprake van overbelasting?
- Wat is kortsluiting?
- Wanneer is er een lekstroom?

6.1 Lading

Elektrische lading

Protonen en elektronen hebben een elektrische lading. Protonen hebben een positieve lading en elektronen een negatieve lading. De elektrische lading zorgt ervoor dat protonen en elektronen elkaar aantrekken en een atoom vormen. Door elektronen uit te wisselen kunnen atomen samenklonteren tot moleculen of kristallen. Hieruit ontstaan vaste stoffen, vloeistoffen en gassen. Dit wordt allemaal veroorzaakt door de elektrische lading. Maar wat elektrische lading is weet niemand. Dat is niet zo vreemd, want "materie" en "energie" zijn ook grootheden, waarvan je niet kunt zeggen wat het is. In de natuurkunde maken we ons daar niet al te druk om. De aanwezigheid van lading blijkt uit de krachten die deeltjes op elkaar uitoefenen. En de gevolgen van deze elektrische krachten kunnen soms met het blote oog worden waargenomen.

De grootte elektrische lading heeft het symbool Q .

De eenheid van elektrische lading is de coulomb (C).

Wat we ook weten is dat lading altijd behouden blijft. Net zoals materie en energie niet zomaar ontstaat of verdwijnt is dat bij elektrische lading ook zo.

Elektrische lading kan niet ontstaan en kan niet verdwijnen.

Een voorwerp is neutraal als het evenveel protonen als elektronen bevat. Is er een overschot aan elektronen, dan heeft het voorwerp een negatieve lading. Bij een tekort aan elektronen heeft het voorwerp een positieve lading.

Lading komt niet vrij in de natuur voor maar wordt altijd "gedragen" door een materie-deeltje. Draggers van lading worden **ladingdragers** genoemd. Protonen en elektronen zijn de elementaire ladingdragers van positieve en negatieve lading.

Elektrische krachten

Elektrisch geladen voorwerpen oefenen krachten op elkaar uit. Positieve lading stoot positieve lading af; negatieve lading stoot negatieve lading af; positieve lading trekt negatieve lading aan; negatieve lading trekt positieve lading aan.

positieve lading stoot positieve lading af
negatieve lading stoot negatieve lading af
positieve lading trekt negatieve lading aan
negatieve lading trekt positieve lading aan

+	←→	+
-	←→	-
+	→←	-
-	→←	+

Voorwerpen kunnen worden opgeladen door ze tegen elkaar te wrijven. De wrijvingskracht zorgt er voor dat er **elektronen overspringen**. Het voorwerp dat elektronen verliest krijgt een positieve lading en het voorwerp dat elektronen ontvangt krijgt een negatieve lading. Door het overspringen van elektronen krijgen voorwerpen een tegengestelde lading, waardoor ze elkaar gaan aantrekken.

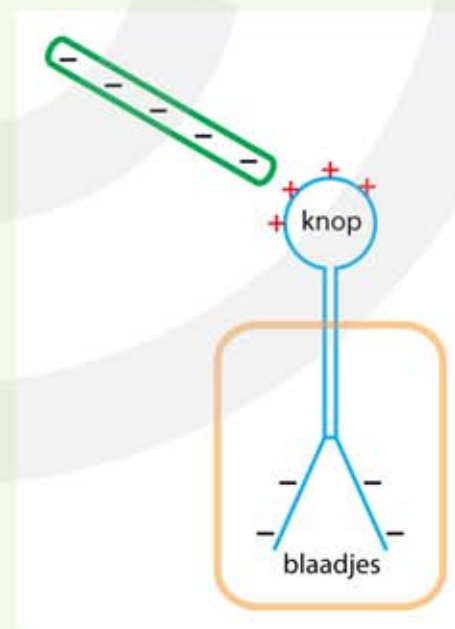
Bij een elektrisch geladen voorwerp zie je iets bijzonders. Een negatief geladen voorwerp heeft elektronen opgenomen. Deze extra elektronen stoten elkaar af en gaan daarom zo ver mogelijk bij elkaar vandaan. Dit veroorzaakt het bekende effect dat je haren overeind gaan staan als je wordt opgeladen. In een **elektroscoop** wordt dit effect zichtbaar gemaakt.

VOORBEELD elektroscoop

Breng je een negatief geladen staaf in de buurt van de knop van een elektroscoop dan gaan de blaadjes uitslaan. De negatief geladen staaf oefent een afstotende kracht uit op de elektronen, waardoor de elektronen van de knop naar de blaadjes gaan. De blaadjes krijgen een negatieve lading en gaan elkaar afstoten.

Zodra de staaf weggaat verdwijnt de afstotende kracht en stromen de elektronen terug naar de knop. De blaadjes stoten elkaar niet meer af.

Raak je de knop aan met de staaf dan springen er elektronen over van de staaf naar de knop, waardoor de knop geen positieve lading meer heeft. De elektronen in de blaadjes kunnen niet meer terug naar de knop. De blaadjes blijven elkaar afstoten, ook als de staaf weg is.



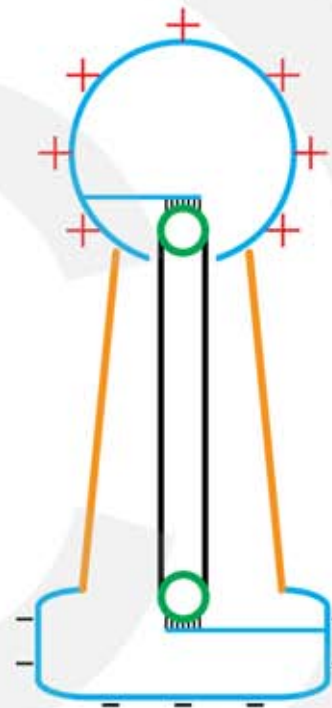
Figuur 1 Elektroscoop.

Met een **elektriseermachine**, zoals een Van de Graaff generator, kan positieve en negatieve lading van elkaar worden gescheiden. De ene kant van de machine krijgt een positieve- en de andere kant een negatieve lading. In een elektriseermachine kan de gescheiden lading niet terugstromen.

VOORBEELD Van de Graaff generator

Bij een Van de Graaff generator wordt positieve en negatieve lading van elkaar gescheiden. Aan de onderkant springen elektronen van de rubberband naar de kam. Hierdoor krijgt de onderkant een negatieve lading en de band een positieve lading. Bovenaan springen elektronen van de bol naar de band. De rubberband wordt neutraal en de bol krijgt een positieve lading.

De bol is goed geïsoleerd zodat de lading niet weg kan lekken. Als je in de buurt van de bol komt kan er een vonk overspringen.



Figuur 2 Van de Graaff generator.

Omdat elektronen elkaar afstoten zal het overschot (of tekort) aan elektronen zich bij voorkeur aan de buitenkant van een geladen voorwerp bevinden. Als je zelf wordt opgeladen bevindt de lading zich aan de buitenkant van je lichaam. Je haren krijgen allemaal dezelfde lading en stoten elkaar af, waardoor ze recht overeind gaan staan.

De kleinst mogelijke lading die voorkomt is de lading van een proton en van een elektron. Dit is de **elementaire lading** en heeft een grootte van $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. De letter e wordt gebruikt om de elementaire lading aan te geven. De lading van het proton is $+e$ en de lading van het elektron is $-e$. De elementaire lading is erg klein. Om een voorwerp een merkbare lading te geven zijn miljarden elektronen nodig.

proton heeft lading $+e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
elektron heeft lading $-e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

VOORBEELD geladen bol

Een negatief geladen bol heeft een lading van $-4,0 \cdot 10^{-7}$ C. Dit wordt veroorzaakt door een overschot aan elektronen.

Bereken hoeveel elektronen er teveel zijn.

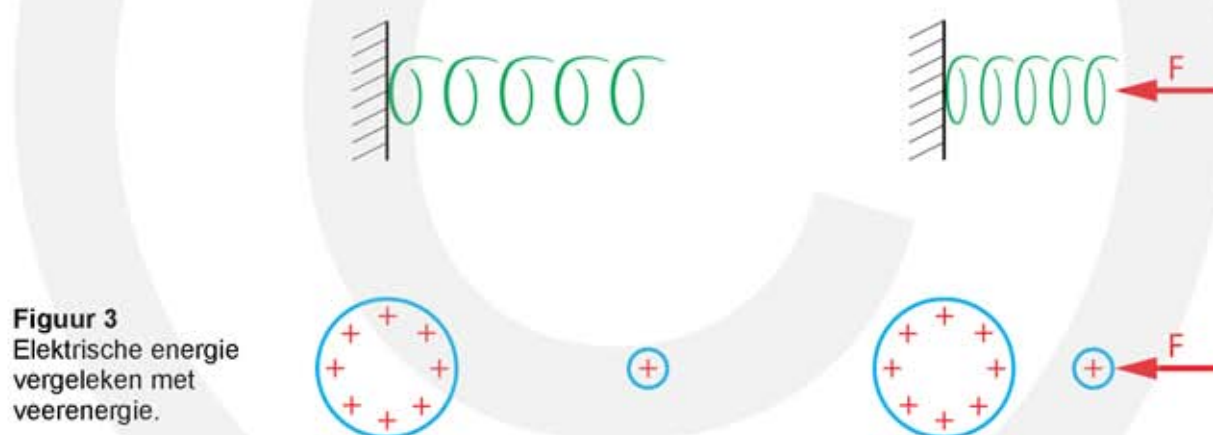
- $Q = N \cdot e$ waarin N het aantal elektronen is
- $N = Q / e = \frac{-4,0 \cdot 10^{-7}}{-1,6 \cdot 10^{-19}} = 2,5 \cdot 10^{12}$ elektronen

6.2 Spanning en stroom

Elektrische spanning

Deeltjes met dezelfde soort lading stoten elkaar af. Je moet daarom arbeid uitoefenen om ze naar elkaar toe te brengen. De arbeid die je verricht om geladen deeltjes dicht bij elkaar te brengen verdwijnt niet, maar blijft aanwezig als elektrische energie. Gaan de deeltjes van elkaar vandaan, dan komt de elektrische energie vrij.

Het opslaan van elektrische energie lijkt op het opslaan van veerenergie, zie figuur 3. Bij het indrukken van een veer verricht je arbeid. Bij het loslaten van de veer komt de veerenergie beschikbaar. Hetzelfde geldt voor ladingen. In figuur 3 onderaan oefen je een kracht uit om gelijksoortige lading naar elkaar toe te bewegen. Arbeid wordt hierbij omgezet in elektrische energie. De elektrische energie komt vrij als de afstand tussen de ladingen toeneemt.



Figuur 3
Elektrische energie
vergeleken met
veerenergie.

In figuur 3 worden positieve ladingen naar elkaar toe gebracht. Als de positieve ladingen dicht bij elkaar zijn hebben we een spanning gecreëerd. Je kunt deze spanning vergelijken met de druk van een gas. Het op elkaar persen van gasmoleculen en van positieve of negatieve ladingen kost energie.

Stel dat het verplaatsen van één coulomb lading van A naar B één joule aan arbeid kost, dan zeggen we dat tussen A en B een spanning staat van één volt.

Tussen twee punten staat een spanning van één volt als er één joule arbeid nodig is om één coulomb lading van het ene naar het andere punt te verplaatsen.

Spanning heeft het symbool U .

De eenheid van spanning is de volt (V).

Voor elektrische energie geldt:

$$E_{el} = Q \cdot U$$

- E_{el} is de elektrische energie in joule (J)
- Q is de lading in coulomb (C)
- U is de spanning in volt (V)

VOORBEELD spanning

De arbeid die nodig is om 3,0 C lading te verplaatsen is 36 J.

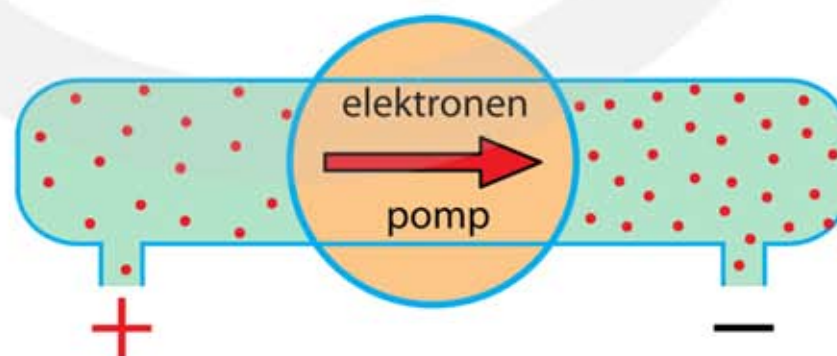
Bereken de elektrische spanning.

- $E_{el} = Q \cdot U \rightarrow U = E_{el} / Q$
- $U = \frac{36}{3,0} = 12 \text{ V}$

Spanningsbron

Om spanning te creëren is een spanningsbron nodig. Je kunt een spanningsbron zien als een pomp die elektronen pompt van een plaats met weinig elektronen naar een plaats met veel elektronen. In figuur 4 is er aan de linkerkant een tekort aan elektronen en is er dus netto een positieve lading. Aan de rechterkant is er een overschot aan elektronen en is er netto een negatieve lading. Hierdoor ontstaat er een spanningsverschil tussen de linkerkant en de rechterkant.

Figuur 4
Een spanningsbron is een pomp waarmee elektronen worden samengeperst.



Een spanningsbron is een elektronenpomp. Elektronen worden op elkaar geperst waardoor elektrische spanning ontstaat.

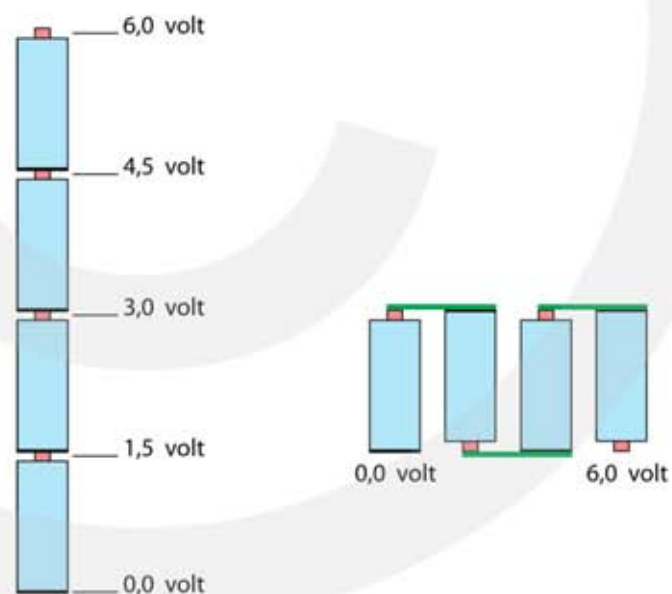
Een voorbeeld van een elektronenpomp is de **Van de Graaff generator**, die we eerder zijn tegengekomen. Bij de Van de Graaff generator worden er elektronen van de bol via de transportband naar beneden verplaatst, zie figuur 2.

Met een **batterij** kan ook een spanning worden aangelegd. Een batterij bestaat uit chemische cellen, waarmee per cel een spanning van ongeveer 1,5 V wordt gemaakt. Als de chemische reacties zijn uitgewerkt kan de batterij geen spanning of stroom meer leveren.

Een (elektrische) **voeding** wordt aangesloten op het lichtnet. In een voeding zit een transformator die de netspanning van 230 V omzet naar een lagere spanning van bijvoorbeeld 12 V. Bij een **variabele spanningsbron** kan de spanning worden ingesteld, bijvoorbeeld tussen 0 en 30 V.

Spanningsbronnen in serie

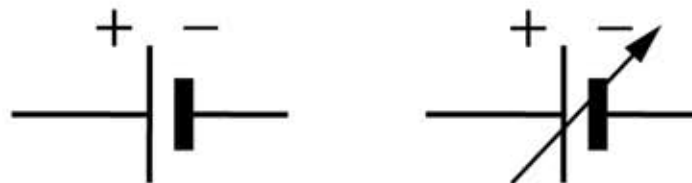
Door spanningsbronnen achter elkaar (in serie) te schakelen wordt de spanning vergroot. Net zoals de druk van een gas groter wordt als je meerdere pompen achter elkaar schakelt is dit bij spanningsbronnen (elektronenpompen) ook het geval.



Figuur 5
Door spanningsbronnen in serie te schakelen wordt de spanning vergroot.

Een spanningsbron wordt met de volgende symbolen aangegeven.

Figuur 6
Symbolen voor een spanningsbron. Links vaste spanning; rechts variabele spanning.

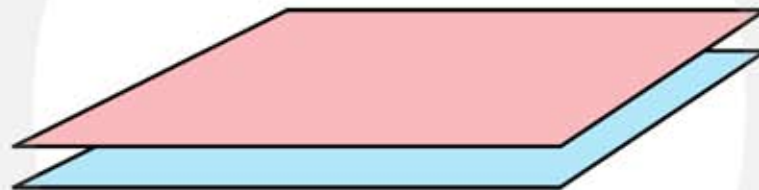


De spanning in het elektriciteitsnet in Europa is **230 V**. De netspanning is een wisselspanning. Honderd keer per seconde keren de pluspool en de minpool om; de pluspool wordt minpool en omgekeerd. Omdat de cyclus van plus naar min 50 keer per seconde wordt doorlopen zeggen we dat de wisselspanning een frequentie heeft van **50 Hz**. In de Verenigde Staten is de netspanning 110 V en heeft de wisselspanning een frequentie van 60 Hz.

De spanning van het lichtnet is 230 volt.

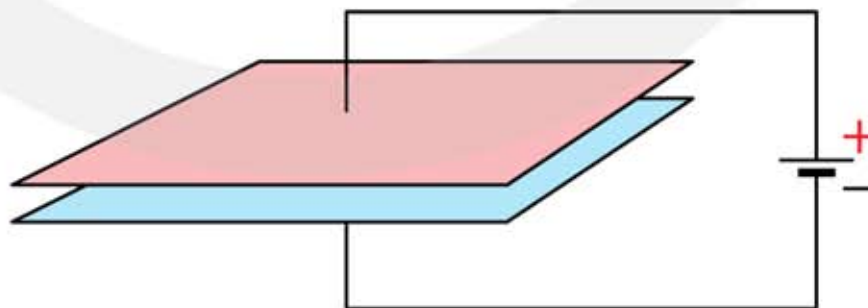
Condensator

Elektrische energie kan worden opgeslagen in een **condensator**. Een condensator bestaat uit twee dunne metalen platen die vlak naast elkaar liggen. Tussen de metaalplaten zit een stof waar elektronen niet doorheen kunnen gaan, zie figuur 7.



Figuur 7
Een condensator.

Een condensator wordt aangesloten op een spanningsbron, zie figuur 8. De bovenste plaat is verbonden met de plus-pool en de onderste plaat met de min-pool. De spanningsbron pompt elektronen van de bovenste plaat naar de onderste plaat. De bovenste plaat krijgt hierdoor een positieve lading en de onderste plaat een negatieve lading.

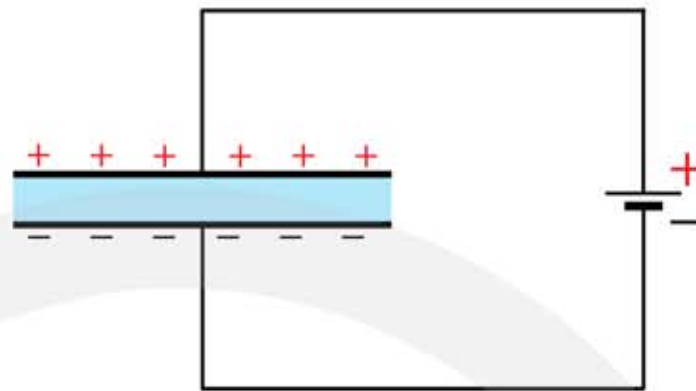


Figuur 8
Een condensator aangesloten op een spanningsbron.

De negatieve lading van de onderste plaat zorgt ervoor dat het steeds moeilijker wordt om nog meer elektronen van de bovenste naar de onderste plaat te pompen. Elektronen worden immers afgestoten door de onderste plaat, die een steeds grotere negatieve lading krijgt. Op een bepaald moment houdt het pompen van elektronen op. De condensator is dan helemaal opgeladen.

Figuur 9

Bij een opgeladen condensator heeft de ene plaat een positieve en de andere plaat een negatieve lading. Tussen de platen zit een isolerende stof, zodat de lading niet binnendoor kan terugstromen.



Elektrische stroom

Het bewegen van geladen deeltjes heet elektrische stroom. De negatief geladen elektronen stromen van een negatief geladen plaats naar een positief geladen plaats.

De Amerikaan Benjamin Franklin (1706 – 1790) ontdekt dat er positieve en negatieve lading is. In zijn electriciteitstheorie vat hij elektrische stroom op als het stromen van positieve lading. Deze afspraak wordt nu nog steeds gebruikt en dat is jammer. Want intussen weten we dat niet positieve lading, maar de negatief geladen elektronen bewegen. Maar dat kon Franklin niet weten, want het elektron is pas in 1897 ontdekt door Joseph John Thomson (Engeland, 1856 – 1940).

In de natuurkunde is afgesproken dat de **richting van de elektrische stroom** gelijk is aan de richting waarin **positieve lading beweegt**. Deze afspraak kan verwarring geven, want de richting van de stroom is tegengesteld aan de bewegingsrichting van de elektronen, terwijl juist de elektronen bewegen. Bij elektrische schakelingen is alleen de richting van de stroom belangrijk. Dat in werkelijkheid elektronen de andere kant uit gaan doet er niet toe.

Elektrische stroom is het bewegen van geladen deeltjes (elektronen).

Elektrische stroom gaat van plus naar min (afgesproken).

Elektronen bewegen tegengesteld aan de richting van de stroom.

Geleiders en isolatoren

Een geleider is een stof waarin elektronen gemakkelijk kunnen stromen.

Een isolator is een stof waarin elektronen niet kunnen stromen.

Geleiders: metalen – grafiet – houtskool – zoutoplossingen

Isolators: glas – porcelijn – steen – rubber – plastic – hout – vast zout

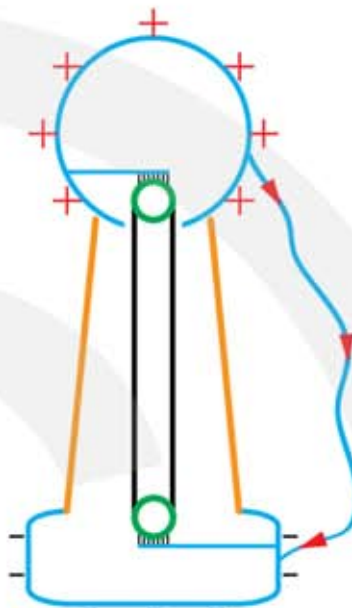


Figuur 10 Koper is een heel goede geleider en wordt daarom gebruikt in elektriciteitsdraden. Om ervoor te zorgen dat elektronen niet van de ene naar de andere draad kunnen stromen wordt om de koperdraad een isolerende plastic mantel aangebracht.

6.3 Stroomkring

Stroomkring en stroomrichting

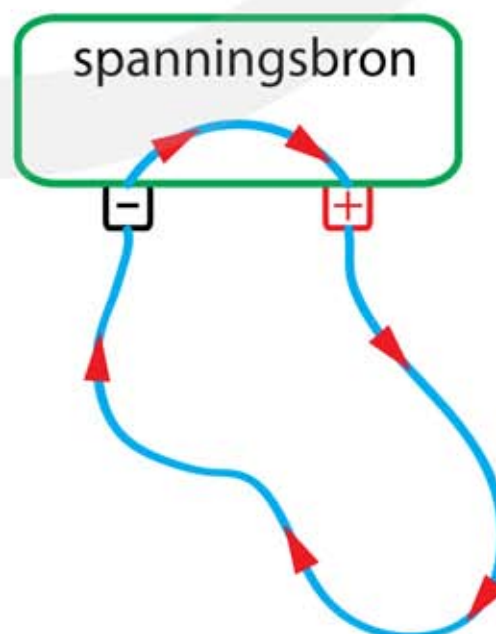
Als positieve en negatieve lading van elkaar gescheiden is kan er heel even stroom lopen. Bij een Van de Graaff generator springt er dan een vonk over. In een fractie van een seconde is alle lading teruggestroomd.



Figuur 11
Ontladen van een
Van de Graaff generator.

Om elektrische energie continue te kunnen gebruiken moet een **stroomkring** worden gemaakt. Een stroomkring wordt ook elektrisch **circuit** genoemd. Hierin lopen de elektronen in een kring rond. Doordat een spanningsbron is opgenomen in de kring houdt het rondgaan van de elektronen niet op. Elektronen worden aangevoerd bij de negatieve pool van de spanningsbron, gaan door het circuit en komen terug bij de positieve pool. Binnen in de spanningsbron worden de elektronen terug naar de negatieve pool gepompt, waarna ze een nieuw rondje kunnen maken. Het rondpompen van elektronen door een spanningsbron kost energie.

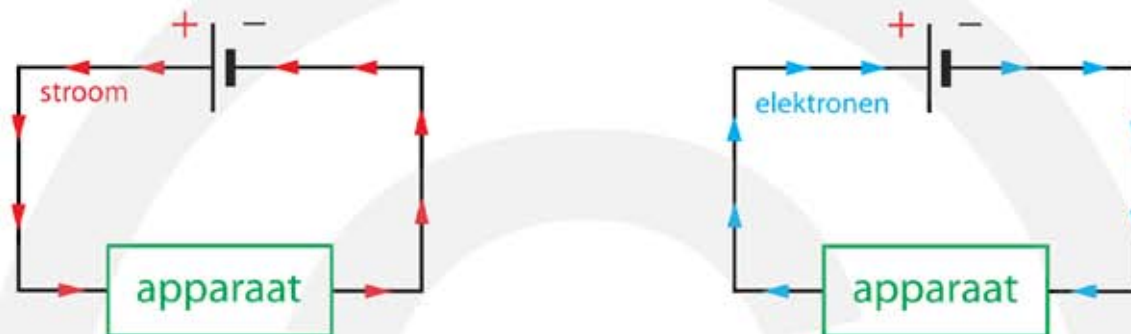
Is er een apparaat aangesloten dan wordt onderweg de elektrische energie omgezet in een andere vorm van energie. De spanningsbron zorgt ervoor dat de elektronen weer nieuwe energie krijgen om het volgende rondje te maken. In figuur 12 is het rondgaan van elektrische stroom aangegeven.



Figuur 12
Stroomkring.

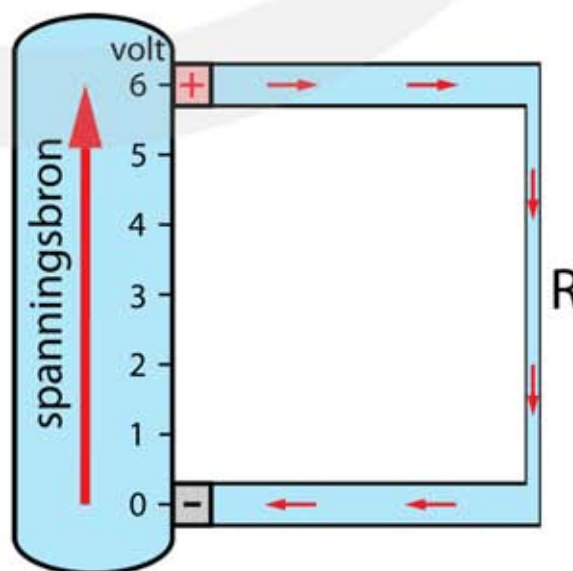
Bij een continue stroom lopen elektronen in een kring rond.

De spanningsbron zorgt ervoor dat na ieder rondje de energie wordt aangevuld.



Figuur 13 In een stroomkring loopt de elektrische stroom van plus naar min (links). De elektronen lopen andersom, van min naar plus (rechts). Binnen in de spanningsbron is de stroomkring gesloten. Hier wordt de energie van de elektronen aangevuld.

Het stromen van elektronen volgt ruwweg dezelfde regels als het stromen van water. Elektronen en watermoleculen kunnen niet zomaar ontstaan of verdwijnen. Bij een continue stroom gaan zowel elektronen als watermoleculen in een kring rond. Hierbij ondervinden ze weerstand. Om de weerstand te overwinnen is er een spanning (bij elektronen) of een hoogteverschil of drukverschil (bij water) nodig. Is de weerstand onderweg groot, bijvoorbeeld omdat de stroom door een dun draadje gaat, dan moet de spanning groot zijn om de lading snel genoeg te kunnen rondpompen.



Figuur 14
Bij een stroomkring wordt de spanning gebruikt om de stroom door een dun draadje te persen. Om de stroom door de dikke aan- en afvoerdraden te laten gaan is vrijwel geen spanning nodig.

Stroomsterkte

De stroomsterkte is de hoeveelheid lading die per seconde voorbij stroomt.

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

- I is de stroomsterkte in ampère (A)
- Q is de lading die voorbij is gekomen in coulomb (C)
- t is de tijd die hiervoor nodig is in seconde (s)

De eenheid van stroomsterkte is ampère (A).

Eén ampère (A) = één coulomb per seconde (C/s).

Het meten van de stroomsterkte

Stroom meet je met een stroommeter, ook wel ampèremeter genoemd.

Een ampèremeter meet hoeveel coulomb er per seconde passeert.

Een stroommeter moet in de stroomkring worden opgenomen.

Een stroommeter geef je aan met een cirkel om de hoofdletter A.

Een stroommeter heeft aansluitbussen voor de pluspool en voor de minpool. Meestal is de pluspool rood en de minpool zwart. De stroom loopt door de stroommeter van de pluspool naar de minpool. Als je de richting van de stroom uit de spanningsbron volgt dan moet de rode bus zo dicht mogelijk bij de pluspool en de zwarte bus zo dicht mogelijk bij de minpool worden aangesloten.

Bij een stroommeter moet je het **meetbereik** kiezen. Dit is de maximale stroom die de stroommeter in deze stand kan meten. Het meetbereik stel je in door de juiste aansluitbus te kiezen of door een draaischakelaar op de juiste stand te zetten. Bij duurdere meters wordt het meetbereik automatisch ingesteld. Bij een bereik van 500 mA is de uitslag van de meter maximaal bij een stroom van 500 mA. Is de stroom groter, dan moet er een minder gevoelige stand worden gekozen, bijvoorbeeld 5 A.

Figuur 15
Ampèremeter met drie meetbereiken:
Boven: maximaal 5 A
Midden: maximaal 0,5 A
Onder: maximaal 0,05 A



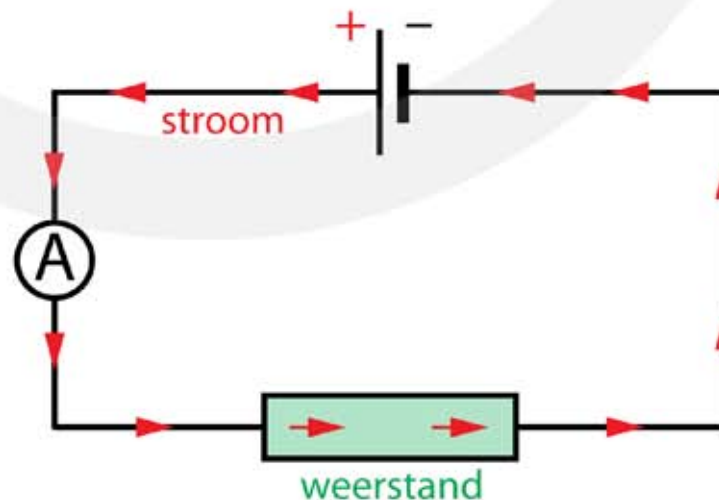
Een ampèremeter meet hoeveel lading er per seconde voorbij stroomt. Elektronen moeten daarom ongehinderd door een ampèremeter kunnen gaan, omdat anders de stroomsterkte die je meet kleiner is dan de stroomsterkte door het circuit zonder de aanwezigheid van de ampèremeter. Als de elektronen ongehinderd door de ampèremeter stromen verliezen ze geen energie, zodat de spanning over een ideale ampèremeter nul is.

De hoeveelheid hinder die de elektronen onderweg ondervinden noem je de **weerstand**. In de volgende paragraaf leer je hier meer over.

De weerstand van een ideale stroommeter is oneindig klein.

Over een ideale stroommeter staat geen spanning.

Figuur 16
Een ampèremeter meet hoeveel coulomb lading er per seconde passeert en moet daarom in de stroomkring worden opgenomen.



Het meten van de spanning

Spanning meet je met een spanningsmeter, ook wel voltmeter genoemd.

Een voltmeter meet hoeveel spanning er staat over een apparaat.

Een voltmeter staat over het apparaat, NIET in de stroomkring.

Een voltmeter geef je aan met een cirkel om de hoofdletter V.

Een voltmeter heeft aansluitbussen voor de pluspool en voor de minpool. Meestal is de pluspool rood en de minpool zwart. De spanning wordt gemeten tussen de pluspool en de minpool. Als je de richting van de stroom uit de spanningsbron volgt dan moet de rode bus zo dicht mogelijk bij de pluspool en de zwarte bus zo dicht mogelijk bij de minpool worden aangesloten. De pluspool heeft dan een positieve spanning ten opzichte van de minpool.

Bij een spanningsmeter moet je het **meetbereik** kiezen. Dit is de maximale spanning die de spanningsmeter in deze stand kan meten. Het meetbereik stel je in door de juiste aansluitbus te kiezen of door een draaischakelaar op de juiste stand te zetten. Bij duurdere meters wordt het meetbereik automatisch ingesteld. Bij een bereik van 200 mV is de uitslag van de meter maximaal bij een spanning van 200 mV. Als de spanning groter is moet er een minder gevoelige stand worden gekozen, bijvoorbeeld 2 V.

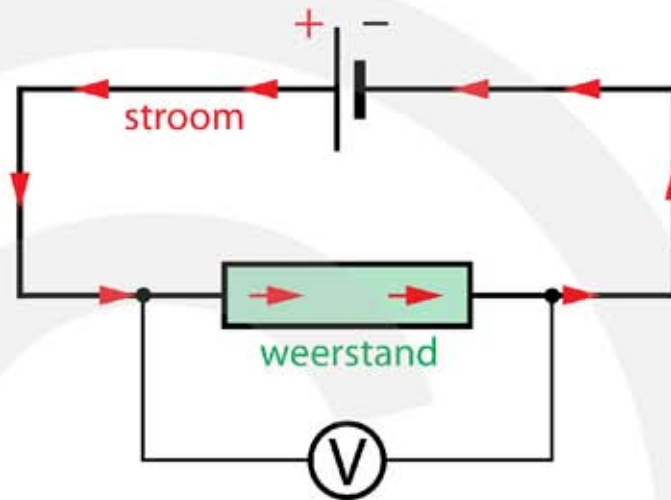
Figuur 17
Voltmeter met drie meetbereiken:
Boven: maximaal 30 V
Midden: maximaal 15 V
Onder: maximaal 3 V



Een voltmeter mag er niet voor zorgen dat de spanning kleiner wordt door de aanwezigheid van de meter, omdat je anders een lagere waarde van de spanning meet dan de waarde die er zou zijn als de voltmeter er niet was. Vandaar dat er geen elektronen door een voltmeter mogen stromen. Daarom wordt de weerstand van een spanningsmeter zo groot mogelijk gemaakt. Bij een ideale spanningsmeter is de weerstand oneindig groot. Er gaat dan geen stroom door de spanningsmeter.

De weerstand van een ideale spanningsmeter is oneindig groot.

Door een ideale spanningsmeter loopt geen stroom.



Figuur 18
Een voltmeter meet hoeveel spanning er staat over een weerstand en moet daarom over de weerstand worden aangesloten.

Digitale multimeters

Tegenwoordig werk je meestal met een digitale multimeter. Met zo'n meter kun je zowel de stroomsterkte als de spanning meten en vaak ook nog de weerstand.



Figuur 19
Digitale multimeter.

6.4 Weerstand

De wet van Ohm

Elektronen die door een stof bewegen ondervinden weerstand omdat ze onderweg voortdurend tegen atomen en tegen andere elektronen botsen. Ze worden afgeremd en verliezen bij iedere botsing een beetje van hun energie. Is de weerstand groot, dan botsen de elektronen vaak en hebben ze een lage snelheid. De Duitser Georg Ohm heeft in 1826 de relatie tussen de spanning en de stroom vastgesteld, waardoor zijn naam de eenheid van weerstand is geworden.

Weerstand heeft het symbool R (Engels: resistance).

De eenheid van weerstand is ohm Ω (Griekse letter omega).

Als de weerstand groot is moet er veel spanning worden aangelegd om een grote stroom te krijgen. Bij een lage weerstand kan met weinig spanning een grote stroom worden verkregen. De weerstand is de verhouding tussen de aangelegde spanning en de stroom: $R = U / I$. Dit kun je ook schrijven als $U = I \cdot R$.

De wet van Ohm.

$$U = I \cdot R$$

- U is de spanning in volt (V)
- I is de stroomsterkte in ampère (A)
- R is de weerstand in ohm (Ω)

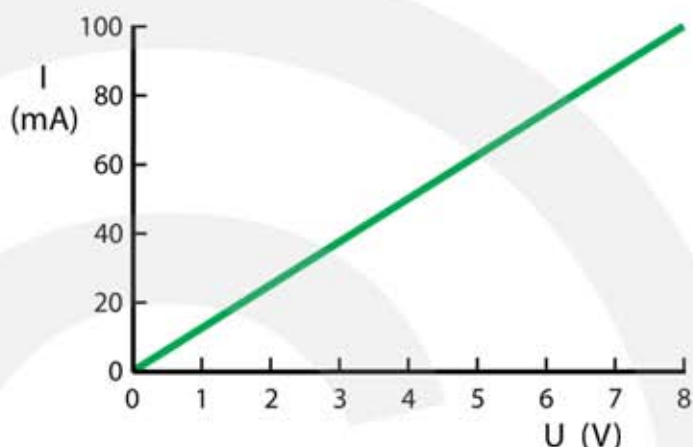
Een weerstand die onafhankelijk is van de spanning en van de stroomsterkte heet een **ohmse weerstand**. Soms is de weerstand echter wél afhankelijk van de stroomsterkte. Bijvoorbeeld in een gloei-lamp, een LED-lamp of een elektromotor. Verandert de weerstand wél als de stroom verandert dan spreek je van een **niet ohmse weerstand**.

Het (stroomsterkte, spanning)-diagram

In een **(I, U)-diagram** staat op de verticale as de stroomsterkte en op de horizontale as de spanning. Bij een ohmse weerstand is de grafiek een rechte lijn door de oorsprong. De stroom is in dat geval **recht evenredig** met de spanning. Wordt de spanning bijvoorbeeld 3,5 keer zo groot, dan wordt de stroom ook 3,5 keer zo groot.

Bij een ohmse weerstand is de (I,U)-grafiek een rechte lijn door de oorsprong. De stroom is dan recht-evenredig met de spanning.

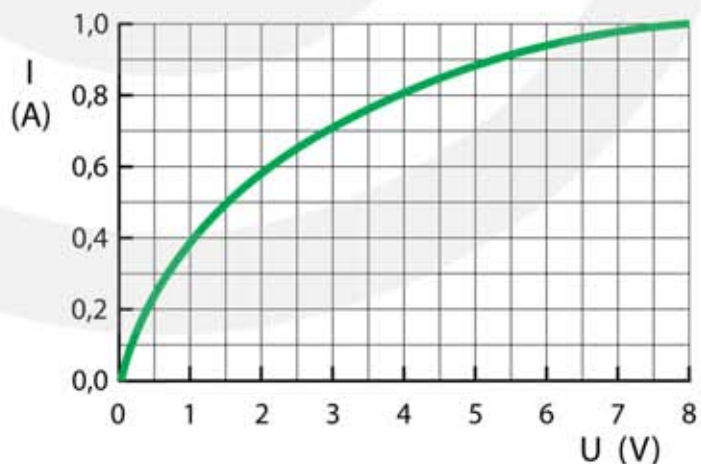
Figuur 20
Een (I, U)-diagram van metaal draad.
De stroom is recht-evenredig met de spanning.



De weerstand van een lampje

Een (I,U)-grafiek van een gloeilamp is geen rechte lijn. Als de spanning groter wordt neemt de stroom toe, maar de toename is minder dan die van de spanning. Dit komt omdat de weerstand van het gloeidraadje toeneemt als de stroom groter wordt. Hoe groter de stroom hoe warmer de gloeidraad. Als de lamp brandt stijgt de temperatuur tot meer dan 2000 °C. De elektronen botsen daarbij vaker en harder met de atomen, waardoor de weerstand toeneemt. Een gloeilamp is daarom geen ohmse weerstand.

Figuur 21
Een (I, U)-diagram van een gloeilamp. In dit geval is de stroom niet recht-evenredig de spanning. Dit komt omdat de temperatuur van het dunne metaal draadje in de lamp sterk toeneemt als er veel stroom loopt.



De weerstand van een draad

De weerstand van een draad hangt af van:

- de lengte van de draad
- de doorsnede van de draad
- het soort metaal
- de temperatuur

Deze invloeden geven samen de volgende formule:

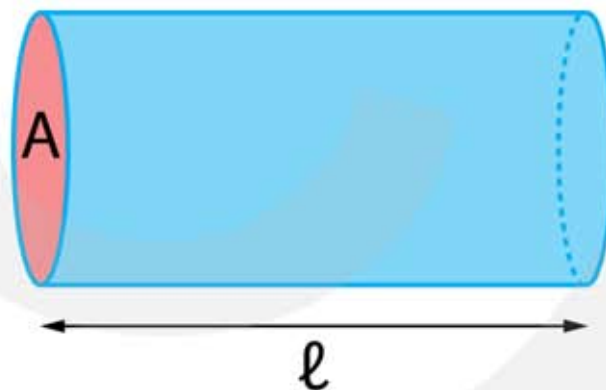
$$R = \rho \cdot \frac{\ell}{A}$$

- R is de weerstand in ohm (Ω)
- ρ is de soortelijke weerstand ($\Omega \cdot \text{m}$)
- ℓ is de lengte van de draad in meter (m)
- A is de doorsnede van de draad in vierkante meter (m^2)

Voor een cilindervormige draad geldt voor de **doorsnede A**

$$A = \pi \cdot r^2$$

- A is de kopse oppervlakte van de draad (m^2); dit is de doorsnede van de draad
- r is de straal in meter (m); $d = 2r$, d is de diameter in meter (m)



Figuur 22
Doorsnede A en
lengte ℓ van een draad.

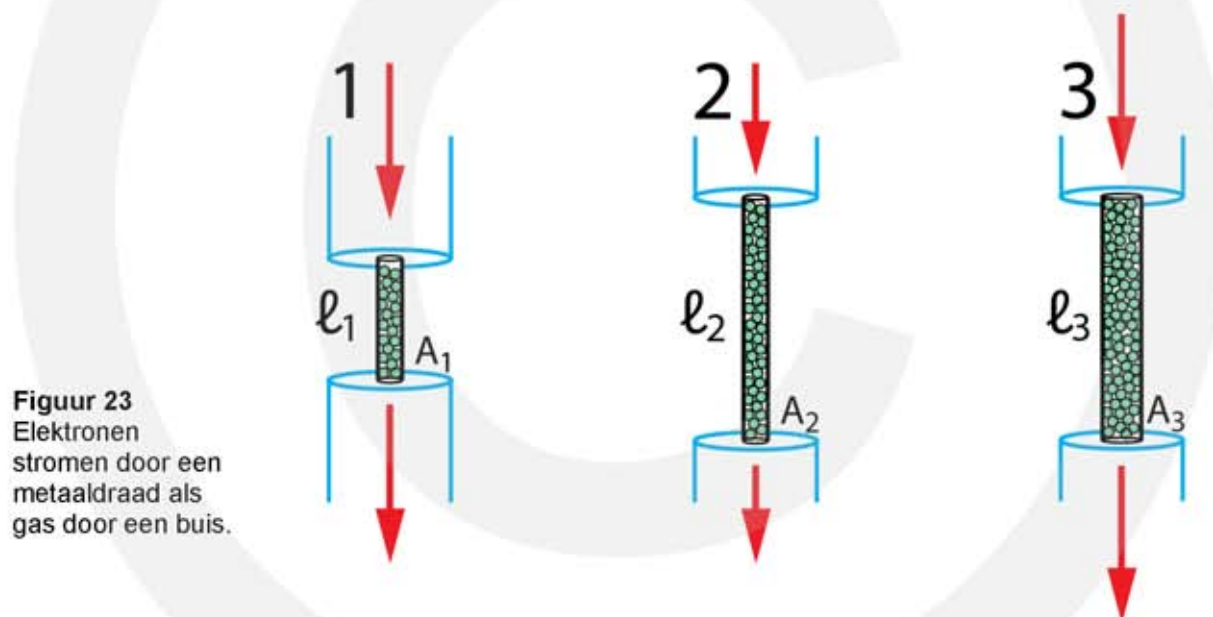
De soortelijke weerstand ρ (rho) is een eigenschap van een materiaal. Koper heeft een lage waarde van $17 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$. Kunststoffen zoals perspex en teflon hebben een grote waarde $\rho \approx 10^{20} \Omega \cdot \text{m}$.

De verhouding tussen de soortelijke weerstand van het beste en slechtste geleidende materiaal is 10^{28} en daarmee behoort de variatie in ρ tot de grootste die er in de natuurkunde te vinden is. Ter vergelijking, de diameters van de kleinste bacterie 10^{-7} m en van de melkweg 10^{21} m hebben dezelfde verhouding als de soortelijke weerstand van koper en perspex. En dan hebben we supergeleiding, waarbij de soortelijke weerstand bij lage temperatuur onmeetbaar klein wordt, nog niet eens meegerekend.

Aan het einde van deze paragraaf vind je tabellen waarin voor een aantal stoffen de soortelijke weerstand is gegeven.

Om bovenstaande formule te begrijpen kunnen we opnieuw het stromen van elektronen vergelijken met het stromen van water. Laten we eens kijken naar hoe water stroomt door een buis gevuld met kiezelstenen, zie figuur 23. De aan- en afvoerkanalen zijn breed, zodat het water daar geen weerstand ondervindt. Bij de vernauwing moet het water door een dun kanaal met kiezelstenen. Kanaal 2 is twee keer zo lang als kanaal 1, waardoor de weerstand twee keer zo groot is. Kanaal 3 is ook twee keer zo lang als kanaal 1, maar heeft ook een twee keer zo grote doorsnede. Daarom is de weerstand van kanaal 3 net zo groot als die van kanaal 1. De grootte en de stapeling van de kiezelstenen bepaalt hoe moeilijk het is voor het water om door het materiaal te stromen. Je ziet dat de weerstand wordt bepaald door de lengte van het kanaal, de doorsnede en de kiezelstenen.

Voor elektronen geldt dezelfde redenering. In plaats van kiezelstenen zijn het nu de atomen die hinder veroorzaken. De grootte van de soortelijke weerstand wordt bepaald door de soort atomen én de manier waarop die zijn gestapeld.



Figuur 23
Elektronen stromen door een metaaldraad als gas door een buis.

VOORBEELD koperdraad

Een koperdraad met een lengte van 530 m heeft een weerstand van 6,0 Ω.

Bereken de doorsnede van de koperdraad

- $R = \rho \cdot \ell / A$ met $\rho = 17 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$
- $R = 6,0 \Omega$; $\ell = 530 \text{ m}$
- $6 = 17 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{530}{A} \rightarrow$
- $A = 17 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{530}{6} = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$ (= 1,5 mm²)

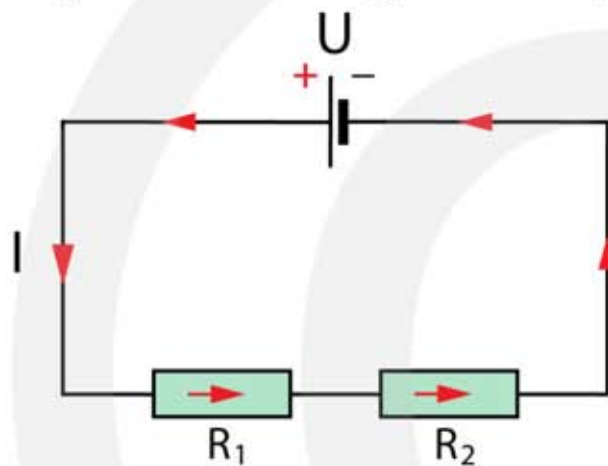
metaal	soortelijke weerstand T= 293 K (10 ⁻⁹ Ω m)
aluminium	27
beryllium	33
bismut	1190
cadmium	75
calcium	43
chroom	130
goud	22
ijzer	105
kalium	67
kobalt	65
koper	17
kwik	960
lood	210
magnesium	46
molybdeen	56
natrium	47
nikkel	78
platina	106
tantaal	155
tin	115
uraan	220
wolfraam	55
zilver	16

legering	samenstelling	soortelijke weerstand T= 293 K (10 ⁻⁹ Ω m)
brons	90% Cu 10% Sn	300
constantaan	55% Cu 1% Mn 44% Ni	450
duraluminium	95% Al 5% Cu	50
gietijzer	94% Fe 2,5% Si 3,5% C	100
invar	64% Fe 36% Ni	100
manganien	84% Cu 12% Mn 4% Ni	430
messing	60% Cu 40% Zn	70
nichroom	60% Ni 22% Fe 18% Cr	1100
nieuw zilver	60% Cu 20% Ni 20% Zn	330
soldeer	50% Pb 50% Sn	150
koolstofstaal	99% Fe 1% C	180
roestvrij staal	85% Fe 14% Cr 1% C	720

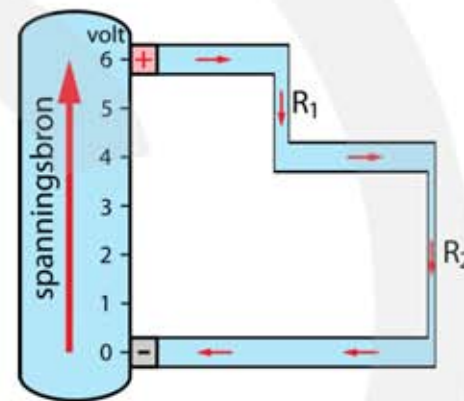
6.5 Serieschakeling en parallelschakeling

Serieschakeling

Als twee weerstanden R_1 en R_2 achter elkaar zijn geschakeld gaat de stroom eerst door weerstand R_1 en daarna door weerstand R_2 . Dit noemen we een **serieschakeling**. In een serieschakeling gaat door beide weerstanden dezelfde hoeveelheid stroom, zie figuur 24. De aangelegde spanning verdeelt zich over de twee weerstanden. Hoe de spanning zich verdeelt hangt af van de grootte van de weerstanden. De grootste weerstand krijgt de meeste spanning. Dit is geïllustreerd in figuur 25.



Figuur 24 In een serieschakeling gaat de totale stroom door iedere weerstand: $i_1 = i_2$. De spanning verdeelt zich over de weerstanden. Er geldt: $U = U_1 + U_2$



Figuur 25 Stroom gaat rond in een kring. Door R_1 en R_2 gaat dezelfde stroom. R_2 is groter dan R_1 . Om de stroom door R_2 te persen is meer spanning nodig.

Serieschakeling:

De stroomsterkte is voor alle weerstanden gelijk: $I_{bron} = I_1 = I_2$

De spanning verdeelt zich: $U_{bron} = U_1 + U_2$

Verdeling van de spanning bij een serieschakeling

De grootte van de weerstanden bepaalt hoe de spanning zich verdeelt. Over de grootste weerstand staat de meeste spanning.

Bij een serieschakeling geldt: $I_1 = I_2 \rightarrow \frac{U_1}{R_1} = \frac{U_2}{R_2}$. Hieruit volgt:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

- U_1 en U_2 zijn de spanningen over de weerstanden 1 en 2 in volt (V)
- R_1 en R_2 zijn de weerstanden in ohm (Ω)

Vervangingsweerstand bij een serieschakeling

De in serie geschakelde weerstanden kun je vervangen door één andere weerstand, zonder dat hierdoor I_{bron} verandert. De weerstand die hiervoor nodig is heet de **vervangingsweerstand** R_V .

Voor een serieschakeling van R_1 en R_2 geldt:

$$R_V = R_1 + R_2$$

- R_V is de vervangingsweerstand in ohm (Ω)
- R_1 is de eerste weerstand in de serieschakeling in ohm (Ω)
- R_2 is de tweede weerstand in de serieschakeling in ohm (Ω)

VOORBEELD serieschakeling

Een spanningsbron levert een spanning van 6,0 V over een serieschakeling van twee weerstanden R_1 en R_2 , zie figuur 24. $R_1 = 30 \Omega$ en $R_2 = 20 \Omega$.

Bereken de spanning over R_1 en over R_2

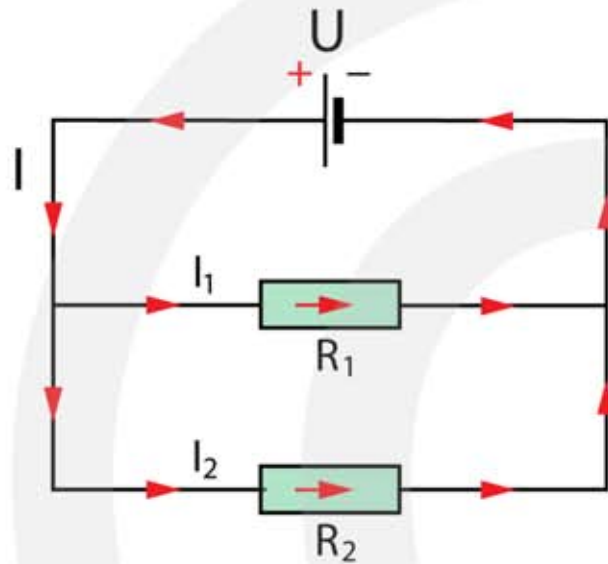
- vervangingsweerstand: $R_V = R_1 + R_2$
- $R_V = 30 + 20 = 50 \Omega$
- $U_{\text{bron}} = I_{\text{bron}} \cdot R_V$
- $6 = I_{\text{bron}} \cdot 50 \rightarrow I_{\text{bron}} = \frac{6}{50} = 0,12 \text{ A}$
- $I_{\text{bron}} = I_1 = I_2$
- $U_1 = I_1 \cdot R_1 \rightarrow U_1 = 0,12 \cdot 30 = 3,6 \text{ V}$
- $U_2 = I_2 \cdot R_2 \rightarrow U_2 = 0,12 \cdot 20 = 2,4 \text{ V}$

Toon aan dat $U_{\text{bron}} = U_1 + U_2$

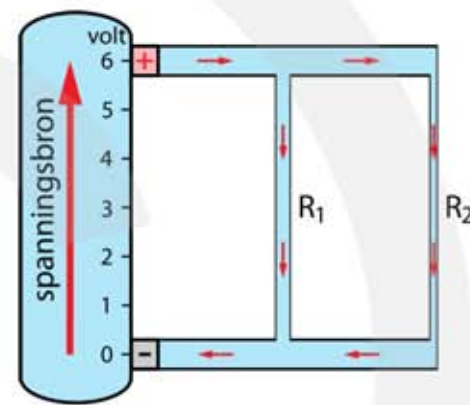
- $U_1 = 3,6 \text{ V}$; $U_2 = 2,4 \text{ V}$
- $U_1 + U_2 = 3,6 + 2,4 = 6,0 \text{ V}$

Parallelschakeling

Als twee weerstanden R_1 en R_2 naast elkaar zijn geschakeld verdeelt de stroom zich over de twee takken. Dit noemen we een **parallelschakeling**. In een parallelschakeling krijgen beide weerstanden dezelfde spanning, want iedere weerstand is direct verbonden met de spanningsbron. De stroom uit de spanningsbron splitst zich in twee, zie figuur 26. Een deel van de stroom gaat door weerstand 1 en de rest door weerstand 2. Hoe de stroom zich verdeelt hangt af van de grootte van de weerstanden. Door de kleinste weerstand gaat de meeste stroom, zie figuur 27.



Figuur 26 In een parallelschakeling wordt de stroom gesplitst. De spanning over iedere weerstand is hetzelfde. $U = U_1 = U_2$. De stroom wordt verdeeld: $I = I_1 + I_2$.



Figuur 27 Er zijn twee stroomkringen. Over R_1 en R_2 staat dezelfde spanning. R_2 is groter dan R_1 . Door R_1 gaat meer stroom dan door R_2 .

Parallelschakeling:

De spanning over alle weerstanden is gelijk: $U_{\text{bron}} = U_1 = U_2$

De som van de stromen is gelijk aan de totale stroom: $I_{\text{bron}} = I_1 + I_2$

De grootte van de weerstanden bepaalt hoe de stroom zich verdeelt over de takken. De verhouding tussen de stromen I_1 en I_2 en de weerstanden R_1 en R_2 volgt uit $U_{\text{bron}} = I_1 \cdot R_1 = I_2 \cdot R_2$. Door de kleinste weerstand loopt de meeste stroom.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

Vervangingsweerstand bij een parallelschakeling

Bij de splitsing vertakt de stroom zich en verderop komen ze weer samen. De parallel geschakelde weerstanden kun je vervangen door een andere weerstand, zonder dat hierdoor I_{bron} verandert. De weerstand die hiervoor nodig is heet de **vervangingsweerstand** R_V .

Voor een parallelschakeling van R_1 en R_2 geldt:

$$\frac{1}{R_V} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

- R_V is de vervangingsweerstand in ohm (Ω)
- R_1 is de eerste weerstand in de parallelschakeling in ohm (Ω)
- R_2 is de tweede weerstand in de parallelschakeling in ohm (Ω)

VOORBEELD parallelschakeling

Een spanningsbron levert een spanning van 6,0 V over een parallelschakeling van twee weerstanden R_1 en R_2 , zie figuur 26. $R_1 = 30 \Omega$ en $R_2 = 20 \Omega$.

Bereken de stroom door R_1 en door R_2

- $U_1 = U_2 = 6,0 \text{ V}$
- $U_1 = I_1 \cdot R_1 \rightarrow 6 = I_1 \cdot 30 \rightarrow I_1 = \frac{6}{30} = 0,20 \text{ A}$
- $U_2 = I_2 \cdot R_2 \rightarrow 6 = I_2 \cdot 20 \rightarrow I_2 = \frac{6}{20} = 0,30 \text{ A}$

Bereken de totale stroom door het circuit

- $I_{\text{bron}} = I_1 + I_2$
- $I_{\text{bron}} = 0,20 + 0,30 = 0,50 \text{ A}$

Bereken de vervangingsweerstand uit U_{bron} en I_{bron}

- $U_{\text{bron}} = 6,0 \text{ V}$; $I_{\text{bron}} = 0,50 \text{ A}$
- $R_V = \frac{U_{\text{bron}}}{I_{\text{bron}}} = \frac{6,0}{0,50} = 12 \Omega$

Bereken de vervangingsweerstand van R_1 en R_2

- $\frac{1}{R_V} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$
- $\frac{1}{R_V} = \frac{1}{30} + \frac{1}{20} = 0,08333 \rightarrow R_V = \frac{1}{0,08333} = 12 \Omega$

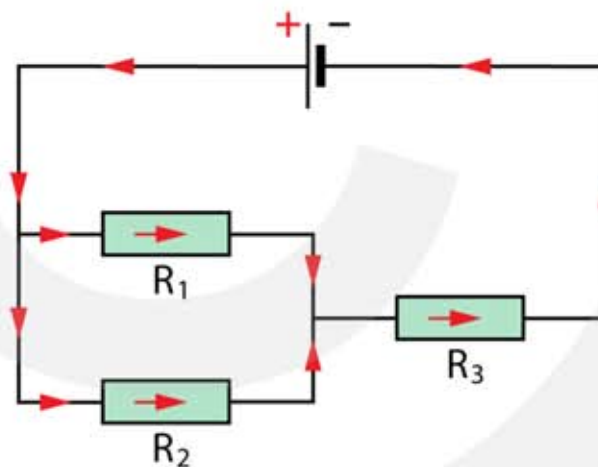
Overzicht serie en parallel

In onderstaand schema heb je een overzicht van de formules die je moet gebruiken bij een serieschakeling en een parallelschakeling.

	serie	parallel
spanning	$U_{\text{bron}} = U_1 + U_2$	$U_{\text{bron}} = U_1 = U_2$
stroomsterkte	$I_{\text{bron}} = I_1 = I_2$	$I_{\text{bron}} = I_1 + I_2$
weerstand	$R_V = R_1 + R_2$	$\frac{1}{R_V} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$

Gemengde schakeling

Bij een schakeling van drie weerstanden kunnen ze alle drie parallel staan, allemaal in serie, of een combinatie, met twee weerstanden parallel en de derde in serie. In het laatste geval spreken we van een gemengde schakeling, zie figuur 28.



Figuur 28
Gemengde schakeling.

Om uit te rekenen wat de spanning en de stroom bij iedere weerstand is moet je de gemengde schakeling stapje voor stapje vereenvoudigen. De totale vervangingsweerstand berekenen je door steeds de vervangingsweerstand van twee weerstanden te berekenen.

STAPPENPLAN

- 1 Zoek twee weerstanden die parallel of in serie staan.
- 2 Bereken de vervangingsweerstand van deze twee weerstanden.
- 3 Vervang in het schema de twee weerstanden door de vervangingsweerstand
- 4 Ga terug naar stap 1 en herhaal de procedure.

VOORBEELD gemengde schakeling

Een gemengde schakeling zoals in figuur 28 is aangesloten op een spanning van $U_{\text{bron}} = 5,0 \text{ V}$. De weerstanden zijn: $R_1 = 30 \Omega$, $R_2 = 20 \Omega$ en $R_3 = 8,0 \Omega$.

Bereken de bronstroom I_{bron}

- R_{12} is de vervangingsweerstand van R_1 en $R_2 \rightarrow \frac{1}{R_{12}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$
- $\frac{1}{R_{12}} = \frac{1}{30} + \frac{1}{20} = 0,08333 \rightarrow R_{12} = 12 \Omega$
- R_{123} is de vervangingsweerstand van R_{12} en R_3
- $R_{123} = R_{12} + R_3 = 12 + 8 = 20 \Omega$
- $U_{\text{bron}} = I_{\text{bron}} \cdot R_{123} \rightarrow 5 = I_{\text{bron}} \cdot 20 \rightarrow I_{\text{bron}} = \frac{5}{20} = 0,25 \text{ A}$

Bereken de spanning over de weerstanden R_1 en R_2

- $I_{\text{bron}} = 0,25 \text{ A}$; $R_{12} = 12 \Omega$
- $U_{12} = I_{12} \cdot R_{12} \rightarrow U_{12} = 0,25 \cdot 12 \rightarrow U_{12} = 3,0 \text{ V}$
- parallel: $U_1 = U_2 \rightarrow$ over R_1 en over R_2 staat een spanning van $3,0 \text{ V}$

Bereken de spanning over de weerstand R_3

- $U_3 = I_3 \cdot R_3 \rightarrow U_3 = 0,25 \cdot 8 \rightarrow U_3 = 2,0 \text{ V}$
- de spanning over R_3 is $2,0 \text{ V}$

MERK OP: $U_{12} + U_3 = 3,0 + 2,0 = 5,0 = U_{\text{bron}}$

Bereken de stroom door weerstanden R_1 en R_2

- $U_1 = I_1 \cdot R_1 \rightarrow 3,0 = I_1 \cdot 30 \rightarrow I_1 = \frac{3}{30} = 0,10 \text{ A}$
- $U_2 = I_2 \cdot R_2 \rightarrow 3,0 = I_2 \cdot 20 \rightarrow I_2 = \frac{3}{20} = 0,15 \text{ A}$

Bereken de stroom door weerstand R_3

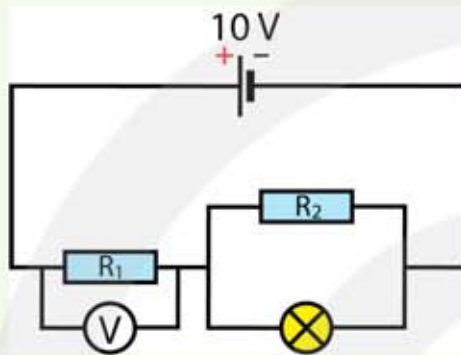
- $U_3 = I_3 \cdot R_3 \rightarrow 2,0 = I_3 \cdot 8 \rightarrow I_3 = \frac{2}{8} = 0,25 \text{ A}$

MERK OP: $I_3 = I_{\text{bron}}$

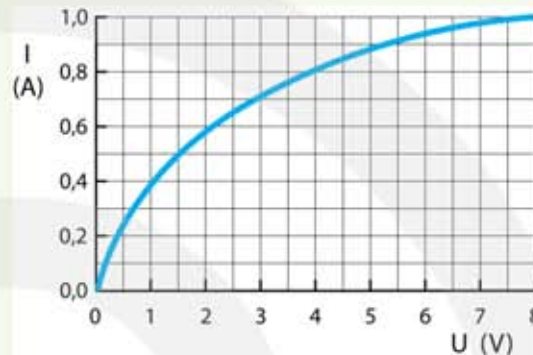
MERK OP: $I_1 + I_2 = I_3$

VOORBEELD gemengde schakeling met lampje

Een lampje is opgenomen in een gemengde schakeling, zie figuur 29. Het (I, U)-diagram van het lampje is gegeven in figuur 30. $R_2 = 10 \Omega$. De voltmeter geeft 6,0 V aan.



Figuur 29 Gemengde schakeling



Figuur 30 (I, U)-diagram

Bereken stroom van de spanningsbron I_{bron} .

- $U_{\text{bron}} = U_1 + U_{\text{lamp}}$
- $10 = 6 + U_{\text{lamp}} \rightarrow U_{\text{lamp}} = 10 - 6 = 4 \text{ V}$
- aflezen in figuur 30: $I_{\text{lamp}} = 0,8 \text{ A}$
- $U_2 = U_{\text{lamp}} = 4 \text{ V}$
- $U_2 = I_2 \cdot R_2 \rightarrow 4 = I_2 \cdot 10 \rightarrow I_2 = \frac{4}{10} = 0,4 \text{ A}$
- $I_{\text{bron}} = I_2 + I_{\text{lamp}} \rightarrow I_{\text{bron}} = 0,4 + 0,8 = 1,2 \text{ A}$

Bereken weerstand R_1 .

- $I_{\text{bron}} = I_1 = 1,2 \text{ A}$
- $U_1 = I_1 \cdot R_1 \rightarrow 6 = 1,2 \cdot R_1 \rightarrow R_1 = \frac{6}{1,2} = 5,0 \Omega$

6.6 Elektrische energie

Elektrische apparaten zetten elektrische energie om in een andere vorm van energie.

- een elektromotor zet elektrische energie om in arbeid (beweging)
- een lamp zet elektrische energie om in licht (straling)
- een radio zet elektrische energie om in geluid
- een broodrooster zet elektrische energie om in warmte
- een mobiele telefoon zet elektrische energie om in straling

Voor de spanning geldt $E_{el} = Q \cdot U$ en voor de stroomsterkte geldt: $I = \frac{Q}{t} \rightarrow Q = I \cdot t$

Combineren we deze formules dan vinden we een formule waarmee je kunt uitrekenen hoeveel elektrische energie een apparaat na verloop van tijd heeft verbruikt.

$$E_{el} = U \cdot I \cdot t$$

- E_{el} is de elektrische energie in joule (J)
- U is de spanning in volt (V)
- I is de stroomsterkte in ampère (A)
- t is de tijd in seconde (s)

Het elektrisch vermogen

Het elektrisch vermogen geeft aan hoeveel energie er in één seconde wordt omgezet. De eenheid van het elektrische vermogen is genoemd naar de Schot James Watt, die in 1764 een uitvinding deed waardoor de stoommachine twintig keer efficiënter werd. Zijn uitvinding is de start geweest van de industriële revolutie in Engeland.

Het **vermogen** wordt aangegeven met hoofdletter P van "power" en is de hoeveelheid energie die per seconde wordt omgezet.

Het vermogen is de hoeveelheid energie die per seconde wordt omgezet.

$$P = \frac{E}{t} \rightarrow E = P \cdot t$$

- P is het vermogen in watt (W)
- E is de hoeveelheid energie die wordt omgezet (J)
- t is de tijd die hiervoor nodig is in seconde (s)

MERK OP Omdat bovenstaande formule voor vermogen voor iedere soort energie geldt hoef je niet P_{el} of E_{el} te schrijven. Maar het mag natuurlijk wel.

VOORBEELD gloeilamp

Op een gloeilamp staat 60 W; 230 V. Deze lamp brandt 2,5 uur.

Bereken hoeveel elektrische energie in 2,5 uur wordt omgezet

- $t = 2,5 \cdot 60 \cdot 60 = 9000$ s
- $E = P \cdot t \rightarrow E = 60 \cdot 9000 = 540.000 = 5,4 \cdot 10^5$ J (= 540 kJ)

De wet van Joule

Combineren we: $E_{el} = U \cdot I \cdot t$ met $E = P \cdot t$, dan vinden we de wet van Joule. Weet je de spanning en de stroomsterkte dan kun je met deze wet het vermogen van een apparaat uitrekenen.

De wet van Joule

$$P_{el} = U \cdot I$$

- P_{el} is het elektrische vermogen in watt (W) of in joule per seconde (J/s)
- U is de spanning in volt (V)
- I is de stroomsterkte in ampère (A)

VOORBEELD MP3 speler

Twee in serie geschakelde batterijen van 1,5 V leveren tijdens het afspelen een stroomsterkte van 57 mA.

Bereken hoeveel energie de batterijen leveren bij het afspelen van een nummer dat 2 minuten en 30 seconden duurt.

- $U = 2 \cdot 1,5 = 3,0$ V ; $I = 57$ mA = 0,057 A
- $P = U \cdot I \rightarrow P = 3,0 \cdot 0,057 = 0,171$ W
- de afspeeltijd is 2 min en 30 s = 150 s
- $E = P \cdot t \rightarrow E = 0,171 \cdot 150 = 25,65 = 26$ J

Gebruik van elektrische energie

Hoewel de joule de eenheid van energie is gebruiken elektriciteitsbedrijven liever een andere eenheid, de **kilowattuur (kWh)**. Eén kilowattuur is gelijk aan 1 kW (1000 W) dat gedurende 1 uur (3600 s) wordt geleverd. Met $E = P \cdot t$ vind je: $1 \text{ kWh} = 1000 \cdot 3600 \text{ J} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ}$. Ieder huis heeft een kilowattuurmeter (kWh-meter), waarmee de opgenomen elektrische energie wordt gemeten. Een gemiddeld gezin in Nederland gebruikt in een jaar ongeveer 4000 kWh aan elektrische energie.

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$$

LET OP

kWh = kilowatt **keer** uur en niet kilowatt **per** uur

VOORBEELD wasmachine

Een wasmachine met een vermogen van 2,4 kW doet 2,0 uur over een wasbeurt. Eén kWh kost € 0,20.

Bereken hoeveel elektrische energie in een wasbeurt wordt verbruikt.

- de wasmachine verbruikt $2,4 \cdot 2 = 4,8 \text{ kWh}$ aan elektrische energie
- dit is gelijk aan $4,8 \cdot 3,6 \cdot 10^6 = 1,728 \cdot 10^7 = 1,7 \cdot 10^7 \text{ J}$

Bereken hoeveel je voor een wasbeurt moet betalen.

- energieverbruik is 4,8 kWh per wasbeurt
- $4,8 \cdot 0,20 = 0,96 \rightarrow$ één wasbeurt kost € 0,96

Combinatie van de wet van Ohm en de wet van Joule

De wet van Ohm ($U = I \cdot R$) en de wet van Joule ($P = U \cdot I$) kun je met elkaar combineren. Je krijgt dan twee nieuwe formules die soms handig zijn om te gebruiken.

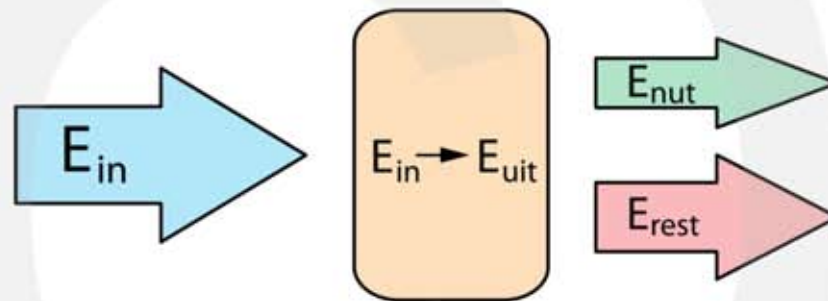
$$P_{\text{el}} = I^2 \cdot R \quad \text{en} \quad P_{\text{el}} = \frac{U^2}{R}$$

Rendement

In ieder werkend elektrisch apparaat ontstaat warmte. Dit komt omdat de bewegende elektronen tegen atomen en andere elektronen botsen die hierdoor harder gaan trillen. Bij verwarmingselementen zoals kachel, broodrooster, strijkijzer, kookplaat, soldeerbout, föhn is het toenemen van de temperatuur gewenst. In deze apparaten wordt bijna alle elektrische energie omgezet in warmte. Bij andere apparaten, zoals elektromotor, computer, lamp, mp3-speler, telefoon is warmteontwikkeling niet gewenst.

Bij energieomzetting maak je daarom onderscheid tussen nuttige energie E_{nut} en niet-nuttige energie E_{rest} . De energie die een apparaat opneemt is E_{in} wordt maar voor een deel nuttig gebruikt. Dit deel noem je E_{nut} . De rest energie E_{rest} is niet nuttig. Dit deel wil je zo klein mogelijk maken. Bij elektrische apparaten is E_{in} altijd gelijk aan de opgenomen elektrische energie van het apparaat. E_{nut} is de nuttige energie die het apparaat levert.

Figuur 31
De opgenomen energie E_{in} wordt in omgezet in nuttige energie E_{nut} en in niet-nuttige energie E_{rest} .



Het **rendement** is de verhouding tussen de nuttige energie E_{nut} en de opgenomen energie E_{in} . Meestal wordt het rendement in procenten gegeven. Het symbool voor rendement is η (Griekse letter èta). Omdat $E = P \cdot t$ is de verhouding tussen E_{nut} en E_{in} gelijk aan de verhouding tussen P_{nut} en P_{in} .

$$\eta = \frac{E_{nut}}{E_{in}} = \frac{P_{nut}}{P_{in}} \cdot 100\%$$

- η (èta) is het rendement en heeft geen eenheid (want het is een verhouding)
- E_{in} is de opgenomen energie in joule (J)
- E_{nut} is de gewenste energie in joule (J)
- P_{in} is het opgenomen vermogen in watt (W)
- P_{nut} is het gewenste vermogen in watt (W)

Omdat in ieder apparaat warmte wordt ontwikkeld is het rendement altijd minder dan 100%.

VOORBEELD gloeilamp

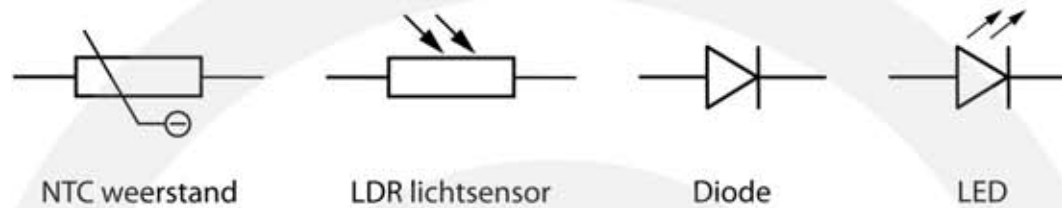
Een gloeilamp heeft een vermogen van 60 W. In deze lamp wordt 5,0% van de elektrische energie omgezet in licht.

Bereken hoeveel warmte deze lamp in 2,0 uur produceert.

- opgenomen elektrische energie: $E_{in} = P_{in} \cdot t \rightarrow$
- $E_{in} = 60 \cdot 2,0 \cdot 3600 = 4,32 \cdot 10^5 \text{ J}$
- $\eta = \frac{E_{nut}}{E_{in}} = \frac{P_{nut}}{P_{in}} \cdot 100\%$
- $\eta = 5,0\% \rightarrow \frac{E_{nut}}{E_{in}} = \frac{P_{nut}}{P_{in}} = 0,05$
- $\frac{E_{nut}}{4,32 \cdot 10^5} = 0,05 \rightarrow E_{nut} = 0,05 \cdot 4,32 \cdot 10^5 = 2,16 \cdot 10^4 \text{ J}$
- $E_{rest} = E_{in} - E_{nut} = 4,32 \cdot 10^5 - 2,16 \cdot 10^4 = 4,104 \cdot 10^5 = 4,1 \cdot 10^5 \text{ J}$

6.7 Bijzondere weerstanden

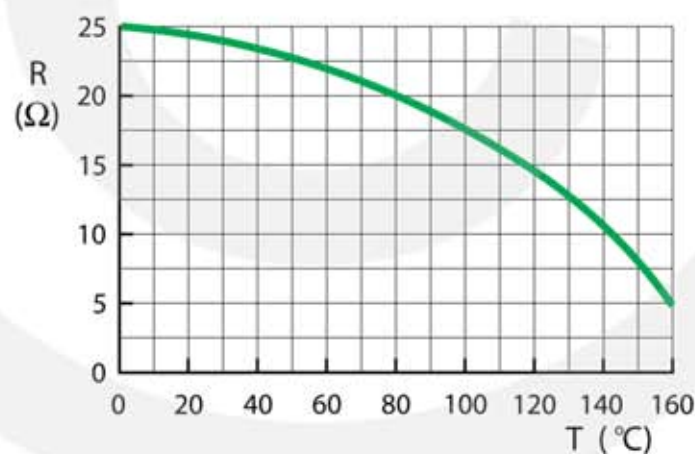
Bijzondere weerstanden zijn weerstanden die op een speciale manier reageren op de omgeving. Deze weerstanden hebben speciale namen en symbolen, zodat je ze herkent in een schakelschema.



Figuur 32 Elektrotechnische symbolen voor bijzondere weerstanden.

Negatieve Temperatuur Coëfficiënt weerstand (NTC)

Bij metalen neemt de weerstand toe als de temperatuur stijgt. De temperatuur coëfficiënt $\Delta R / \Delta T$ is positief. Dit komt omdat bij een hogere temperatuur de elektronen vaker en harder botsen met atomen en met andere elektronen.

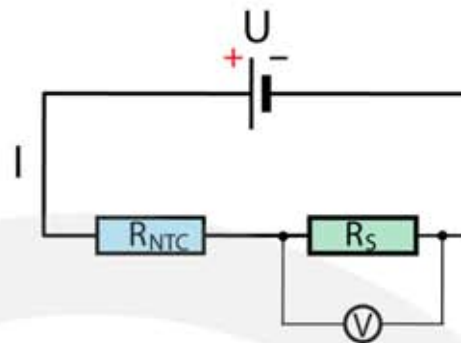


Figuur 33 (R, T)-diagram van een NTC weerstand.

In halfgeleiders (een speciaal soort materialen) geldt het omgekeerde, de weerstand neemt juist af bij hogere temperatuur. De temperatuurcoëfficiënt $\Delta R / \Delta T$ is negatief, vandaar NTC-weerstand. Ook voor NTC-materialen geldt dat de elektronen vaker en harder botsen, maar er is een ander effect dat sterker is. Bij NTC-materialen wordt het aantal elektronen dat deelneemt aan de geleiding veel groter als de temperatuur stijgt, waardoor de weerstand afneemt.

Een NTC-weerstand kan gebruikt worden als thermometer, zie figuur 34. Hiervoor wordt een NTC-weerstand in serie geschakeld met een vaste serieweerstand R_S . Als de temperatuur stijgt neemt R_{NTC} af. De stroom door het circuit wordt hierdoor groter, zodat de spanning over R_S ook groter wordt.

Figuur 34
Met een NTC weerstand kan een thermometer worden gemaakt.



VOORBEELD NTC temperatuursensor

Een NTC weerstand is opgenomen in een serieschakeling, zie figuur 34. Van de NTC weerstand is het (R, T)-diagram gegeven in figuur 33. De spanningsbron geeft een spanning van 5,0 V. De serieweerstand R_S waarover de voltmeter staat is 30Ω .

Bereken de spanning over R_S bij $T = 80 \text{ }^\circ\text{C}$

- aflezen in figuur 33 bij $80 \text{ }^\circ\text{C}$: $R_{NTC} = 20 \Omega$
- serieschakeling: $R_V = R_{NTC} + R_S$
- $R_V = 20 + 30 = 50 \Omega \rightarrow$
- $I_{bron} = \frac{U_{bron}}{R_V} = \frac{5,0}{50} = 0,10 \text{ A}$
- $I_S = I_{bron}$
- $U_S = I_S \cdot R_S \rightarrow U_S = 0,10 \cdot 30 = 3,0 \text{ V}$

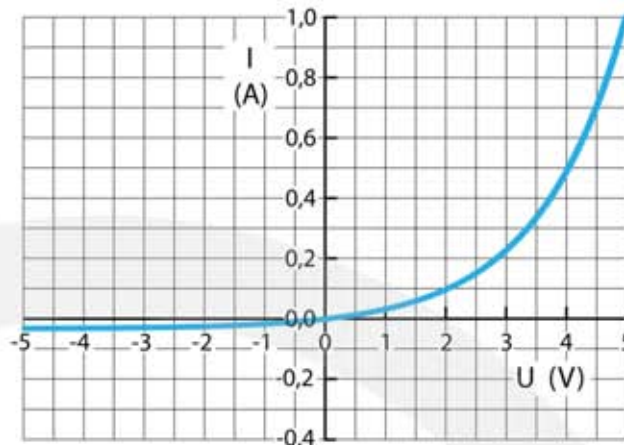
LDR lichtsensor

Een **Light Dependent Resistor** (LDR) is een lichtgevoelige weerstand. De weerstand van een LDR wordt kleiner als er licht op valt. Het belichten van een LDR heeft hetzelfde effect als het verhitten van een NTC-weerstand; het aantal elektronen dat deelneemt aan de geleiding neemt toe. Hoe meer licht hoe kleiner de weerstand. Vaak wordt een LDR weerstand, net als een NTC-weerstand, in serie met een vaste weerstand geschakeld om een lichtsensor te krijgen, zie figuur 34.

Diode

Een diode laat elektrische stroom maar in één richting door. Alleen in de **doorlaatrichting** kan er stroom door de diode gaan. In de tegenovergestelde richting, de **sperrichting**, wordt de stroom geblokkeerd. In het symbool van een diode wordt de doorlaatrichting aangegeven met een pijl en de sperrichting met een streep. Een minimale **drempelspanning** van ongeveer één volt is nodig om de diode te openen. Een diode heeft een grote weerstand in de sperrichting en een kleine weerstand in de doorlaatrichting. Zoals je ziet geldt voor een diode de wet van Ohm niet.

Figuur 35
 Een diode blokkeert de stroom in één richting (de sperrichting) en laat de stroom in de andere richting door (de doorlaatrichting).



Licht Emitterende Diode (LED)

Met speciale halfgeleidende materialen kunnen dioden worden gemaakt die licht geven als er stroom in de doorlaatrichting gaat. Dit zijn de zogenaamde LED's. Vroeger werden LED's alleen als controlelampje gebruikt, maar tegenwoordig kom je ze vooral tegen als lichtbron. Een LED kan een rendement hebben van 50%, terwijl een gloeilamp maar 5% rendement heeft en een spaarlamp ongeveer 25%. Een ander voordeel is dat een LED wel 20.000 uur kan branden voordat hij kapot gaat.

Een moderne ontwikkeling is het gebruik van organische LED's (OLED) voor beeldschermen van televisies, tablets en mobiele telefoons. OLED beeldschermen gebruiken weinig energie, hebben felle kleuren en zijn buigzaam.



Figuur 36 LED's worden steeds vaker gebruikt voor verlichting en voor beeldschermen.

6.8 De huisinstallatie

Draden waarmee de stroom het huis binnenkomt

De elektrische stroom komt het huis binnen met een ondergrondse hoofdkabel. Daarin zitten vier koperen stroomdraden, drie met een bruine isolatiemantel, en één met een blauwe isolatiemantel. De bruine draden zijn de **fasedraden**, waarmee de stroom het huis binnenkomt. Meestal wordt maar één van de drie fasedraden gebruikt. De blauwe draad is de **nuldraad**, waarmee de stroom wordt afgevoerd. De nuldraad staat in verbinding met de aarde (het grondwater), waardoor de spanning tussen de nuldraad en de aarde nul volt is. Behalve de hoofdkabel met de fasedraad en de nuldraad komt er ook een zilverkleurige, niet geïsoleerde, aardleiding het huis binnen. Na de groepenkast (meterkast) wordt de zilverkleurige aardleiding vervangen door een koperen **aarddraad** met een geel-groene isolatiemantel. De aardleiding is verbonden met een metalen staaf die vlak bij het huis diep in de grond steekt. De weerstand tussen de aardleiding en de aarde is minder dan één ohm.

Huisaansluitkast met de hoofdschakelaar en de hoofdzekering

De hoofdkabel die het huis binnen komt gaat eerst naar een huisaansluitkast, waarin zich de hoofdschakelaar en de hoofdzekering bevinden. Met de hoofdschakelaar kan de gehele huisinstallatie van het net kan worden afgeschakeld. Er is ook een hoofdzekering die de elektrische installatie uitzet als er teveel stroom loopt.



Figuur 37 Hoofdschakelaar

kWh-meter

De hoeveelheid elektrische energie die uit het net wordt opgenomen wordt met een kilowattuur-meter, afgekort kWh-meter, gemeten. Soms zijn er twee kWh-meters, één voor de daluren met goedkope stroom ('s nachts), en één voor de overige tijd (overdag).



Figuur 38 kWh-meter oud (links), nieuw (rechts)

Groepenkast met groepen

In de groepenkast wordt de hoofdkabel en de aardleiding gesplitst in een aantal parallelle takken. Zo'n aftakking heet een groep. Vanuit elke groep gaan verbindingdraden naar een gedeelte van het huis om dat deel van elektriciteit te voorzien. Iedere groep heeft een eigen 2-polige schakelaar, waarmee het deel van het huis dat door de groep van elektriciteit wordt voorzien kan worden afgeschakeld. Elke groep heeft ook een eigen zekering, zodat bij kortsluiting alleen het gedeelte van het huis waar de kortsluiting plaatsvindt wordt afgeschakeld. Sommige groepen hebben naast een zekering ook nog een aardlekschakelaar (zie hieronder).



Figuur 39 Groepenkast

Zekeringen

Om er voor te zorgen dat de stroom door een stroomdraad niet te groot kan worden is in elke groep een zekering opgenomen. De maximale stroom die een groep kan leveren wordt door de zekering begrensd op 16 A. De hoofdzekering is meestal een zekering van 35 A. De (groeps-) zekeringen kunnen smeltzekeringen zijn of automatische zekeringen.

– Smeltzekering –

In een smeltzekering bevindt zich een dun stroomdraadje dat bij een te hoge stroomsterkte doorsmelt, waardoor de verbinding wordt verbroken. Als dat gebeurt moet eerst de oorzaak worden verholpen voordat een nieuwe zekering wordt aangebracht.



Figuur 40 Smeltzekering

– Automatische zekering –

Automatische zekeringen hebben een knopje dat naar buiten springt, of een schakelaar die omklapt, als de stroomsterkte te groot wordt. Nadat de oorzaak is verholpen kan een automatische zekering handmatig weer in werking worden gezet.



Figuur 41 Automatische zekering

Aardlekschakelaar

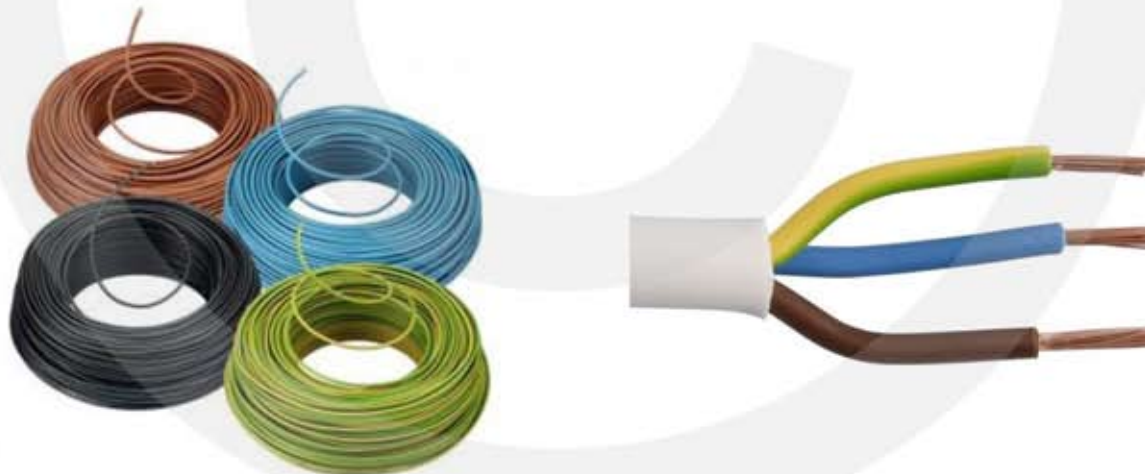
De aardlekschakelaar bevindt zich tussen de kWh-meter en de groep die hij beschermt. Een aardlekschakelaar reageert op het verschil in stroomsterkte in de fasedraad en de nuldraad. Normaal vindt alle stroom door de fasedraad zijn weg terug door de nuldraad. Maar als dat niet zo is, omdat er bijvoorbeeld stroom via je lichaam naar de aarde lekt, wordt binnen 0,2 seconde de groep uitgeschakeld. Dit gebeurt al bij een verschil in stroomsterkte van 30 mA, waarbij letsel nog niet optreedt.



Figuur 42 Aardlekschakelaar

Draden in huis

In het huis lopen leidingen met daarin drie stroomdraden, één met een bruine isolatiemantel, één met een blauwe isolatiemantel en één met een geel-groene isolatiemantel. De bruine draad is de **fasedraad**, waarmee de stroom wordt aangevoerd. De blauwe draad is de **nuldraad**, waarmee de stroom wordt afgevoerd. De nuldraad staat in verbinding met de aarde waardoor de spanning tussen de nuldraad en de aarde nul volt is. De geel-groene draad is de **aarddraad** die ook in verbinding staat met de aarde.



Figuur 43 Installatiedraad: fasedraad (bruin), nuldraad (blauw), aarddraad (geel-groen) en schakeldraad (zwart).

– Aarddraad –

De aarddraad dient als extra beveiliging en is aangesloten op buitenkant van een apparaat, zodat de buitenkant nooit onder spanning kan staan. Het is belangrijk dat elektrische apparaten met een metalen buitenkant geaard zijn. Het kan immers gebeuren dat door een defecte isolatie de fasedraad in contact komt met de buitenkant van het apparaat. Als je het apparaat dan aanraakt krijg je een schok, wat dodelijk kan zijn. Door de buitenkant te verbinden met de aarddraad kan dit nooit gebeuren, omdat de weerstand van je lichaam veel groter is dan die van de aarddraad.

– Schakeldraden –

In huis tref je ook stroomdraden aan met een zwarte isolatiemantel. Dit zijn schakeldraden. Een schakeldraad loopt van een schakelaar naar een vast lichtpunt en wordt bij het aanzetten van het licht door de schakelaar verbonden met de bruine fasedraad.

Schakelaars

Schakelaars kunnen 1-polig of 2-polig zijn.

- een 1-polige schakelaar onderbreekt alleen de fasedraad
- een 2-polige schakelaar onderbreekt zowel de fasedraad als de nuldraad



Figuur 44 Schakelaar

Stopcontacten

Op stopcontacten kun je elektrisch apparaten aansluiten die werken op 230 V. Stopcontacten kunnen geaard of niet-geaard zijn.

- bij geaarde stopcontacten is aan de zijkant een randaarde aangebracht, die in verbinding staat met de aardleiding
- bij niet-geaarde stopcontacten is deze voorziening niet aangebracht
- stopcontacten zijn parallel geschakeld



Figuur 45 Stopcontact

Gevaarlijke situaties

– Overbelasting –

Als de belasting van een groep zo groot is dat er meer dan 16 A aan stroom loopt smelt de groepszekering. Bij een nog grotere stroomsterkte worden de stroomdraden te warm, waardoor brand kan ontstaan. Het maximale vermogen dat door een groep kan worden geleverd is: $P_{\max} = U \cdot I_{\max} = 230 \cdot 16 = 3680 \text{ W}$

– Kortsluiting –

Als de fasedraad elektrisch contact maakt met de nuldraad of met de aarddraad ontstaat er kortsluiting. De stroomsterkte van de kortsluitstroom kan heel groot worden, wel 100 A, waardoor veel warmte wordt ontwikkeld en er brand kan ontstaan. Ook in deze situatie smelt de groepszekering.

– Lekstromen –

Lekstroom is elektrische stroom die wordt aangevoerd door de fasedraad maar die niet door de nuldraad wordt afgevoerd. In deze situatie schakelt de aardlekschakelaar de spanning af.