

6 Elektriciteit

vwo

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 elektroscoop gebruikt en hoe werkt een elektroscoop?
- Wat gebeurt er in een Van de Graaff generator en wat kan je er mee doen?
- Wat is het elementaire ladingsquantum en hoe groot is dit?

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?
- Wat is de elektrische potentiaal en wat kun je ermee?
- Wat gebeurt er in een spanningsbron?
- Welke spanningsbronnen zijn er?
- Wat gebeurt er met de spanning als je 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?
- Wat is de richting van de elektrische stroom?
- Wat zijn geleiders, halfgeleiders en isolatoren?
- Waarom zijn alle metalen goede elektrische geleiders?
- Wat zijn valentie-elektronen?
- Waarom wordt van een elektronengas gesproken?
- Wanneer is een vloeistof een elektrische geleider?
- Wanneer is een gas een elektrische geleider?

6.3 Stroomkring

- Wat wordt bedoeld met een stroomkring?
- Waarvoor dient de spanningsbron in de stroomkring?
- Wat bedoel je met de weerstand in een stroomkring?
- Wat is de stroomsterkte?
- Wat is het symbool van stroomsterkte en wat is de eenheid van stroomsterkte?
- Hoe bepaal je de hoeveelheid verplaatste lading uit een (I, t) -diagram?
- Hoe bepaal je de stroomsterkte uit een (Q, t) -diagram?
- Hoe geef je een stroommeter (ampèremeter) aan?
- Hoe moet een stroommeter (ampèremeter) worden aangesloten?
- Welke eigenschappen heeft een ideale stroommeter?
- Hoe geef je een spanningsmeter (voltmeter) aan?

- Hoe moet een spanningsmeter (voltmeter) worden aangesloten?
- Welke eigenschappen heeft een ideale spanningsmeter?
- Wat is het meetbereik bij een stroommeter of spanningsmeter?
- Wat is het verschil tussen een analoge en een digitale meter?

6.4 Weerstand

- Wat is het symbool van weerstand en wat is de eenheid van weerstand?
- Wat is de wet van Ohm?
- 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?
- Waarom is de weerstand afhankelijk van de temperatuur?
- Wat is de weerstands-temperatuurcoëfficiënt?
- Wat is het verschil tussen een PTC-weerstand en een NTC-weerstand?

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 totale weerstand 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 totale weerstand in een parallelschakeling?
- Wat is de geleidbaarheid en wat is de eenheid van geleidbaarheid?
- 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?
- Hoe kan elektriciteit worden opgeslagen?
- Wat is de capaciteit van een accu en welke eenheid heeft capaciteit?
- Wat is de energiedichtheid van een accu en welke eenheid heeft dit?

6.7 Variabele weerstand en spanningsdeler

- Wat is een variabele weerstand en hoe geef je een variabele weerstand aan?
- Hoeveel aansluitpunten heeft een variabele weerstand?

- Wat is een spanningsdeler.
- Hoeveel aansluitpunten heeft een spanningsdeler?

6.8 De regels van Kirchhoff

- Wat is de stroomregel van Kirchhoff?
- Door welke natuurkundige wet wordt deze regel veroorzaakt?
- Wat is een knooppunt in een elektrisch netwerk?
- Wat is de spanningsregel van Kirchhoff?
- Door welke natuurkundige wet wordt deze regel veroorzaakt?
- Wat is een lus in een elektrisch netwerk?
- Wat is een Wheatstonebrug en wanneer gebruik je zo'n brug?

6.9 Bijzondere weerstanden

- Welke eigenschap heeft een NTC-weerstand?
- Met welke schakeling maak je van een NTC-weerstand een thermometer?
- Welke eigenschap heeft een lichtgevoelige weerstand (LDR)?
- Welke eigenschap heeft een diode?
- Waar worden diodes voor gebruikt?
- Welke eigenschap heeft een licht-emitterende diode (LED)?

6.10 De huisinstallatie

- Hoe wordt elektriciteit in een centrale opgewekt?
- Wat is een transformator en waarvoor wordt een transformator gebruikt?
- Waarom wordt hoogspanning gebruikt bij het transport van elektrische energie?
- 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 of te delen kunnen atomen samenbinden 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. Soms kunnen de gevolgen van deze elektrische krachten 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 zeker 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 materiedeeltje. Dragere van lading worden **ladingdragere** genoemd. Protonen en elektronen zijn de elementaire ladingdragere 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 ervoor 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.

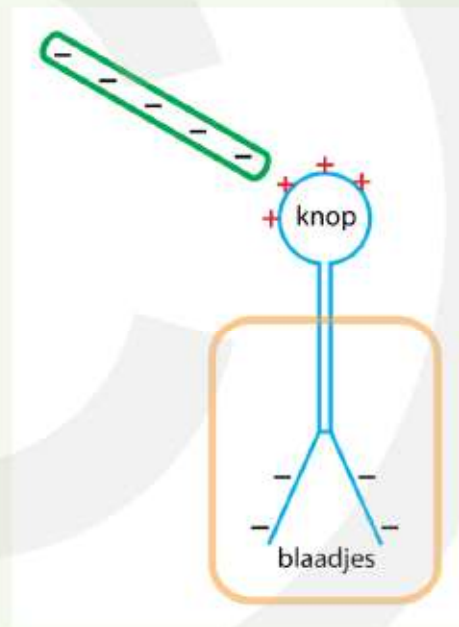
Bij een elektrisch geladen voorwerp zie je iets bijzonders. Een negatief geladen voorwerp heeft elektronen opgenomen. Deze extra elektronen stoten elkaar af en gaan daarom zo ver mogelijk bij elkaar vandaan. Dit veroorzaakt het bekende effect dat je haren overeind gaan staan als je wordt opgeladen. In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

VOORBEELD elektroscop

Breng je een negatief geladen staaf in de buurt van de knop van een elektroscop 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. Zie figuur 1.

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.



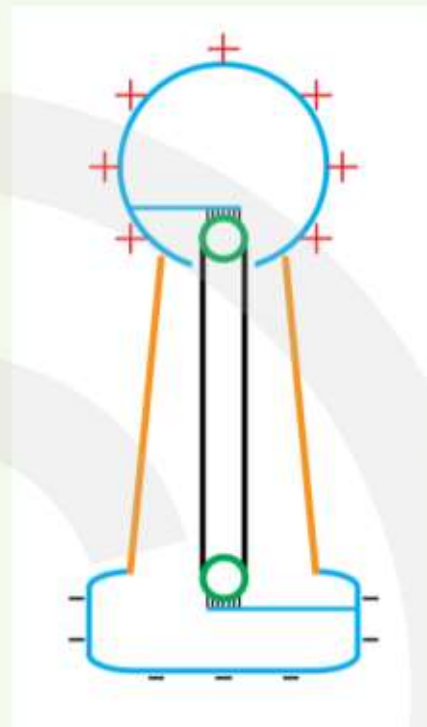
Figuur 1 Elektroscop.

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. Zie figuur 2.

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 ladingsquantum e** , en heeft een grootte van $1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. 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 $-e$.

$$\text{elementair ladingsquantum } e = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

VOORBEELD geladen bol

Een negatief geladen bol heeft een lading van $q = -4,0 \cdot 10^{-7} \text{ C}$.

Hoe groot is het overschot aan elektronen?

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

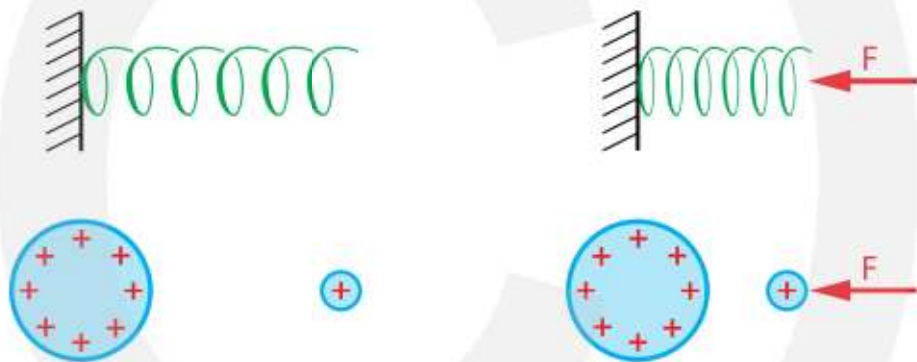
6.2 Spanning en stroom

Elektrische spanning

Deeltjes met dezelfde soort lading stoten elkaar af. Om ze naar elkaar toe te brengen moet je arbeid uitoefenen. Deze arbeid verdwijnt niet, maar blijft aanwezig als elektrische energie. De elektrische energie komt vrij als de afstand tussen de deeltjes toeneemt.

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. De kracht die hiervoor nodig is vermenigvuldigd met de afstand is de uitgeoefende arbeid: $W = F \cdot s$. Deze arbeid wordt opgeslagen als elektrische energie en kan worden gebruikt om bijvoorbeeld een elektromotor te laten werken.

Door gelijksoortige lading bij elkaar te brengen wordt een **spanning** gecreëerd. Je kunt deze spanning vergelijken met de druk van een gas. Stel dat de spanning tussen A en B vijf volt is, dan kost het vijf joule arbeid om één coulomb lading van A naar B te verplaatsen. Deze arbeid is opgeslagen als elektrische energie.

De spanning tussen de plaatsen A en B geeft aan hoeveel arbeid het kost om één coulomb lading van A naar B te brengen.

Spanning heeft het symbool U.

De eenheid van spanning is de volt (V).

Breng je niet één coulomb lading van A naar B maar bijvoorbeeld acht coulomb, dan kost dat acht keer zoveel arbeid. Je hebt immers acht keer één coulomb lading van A naar B gebracht. Hierdoor heb je acht keer zoveel elektrische energie gemaakt. Voor elektrische energie geldt:

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

- 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**

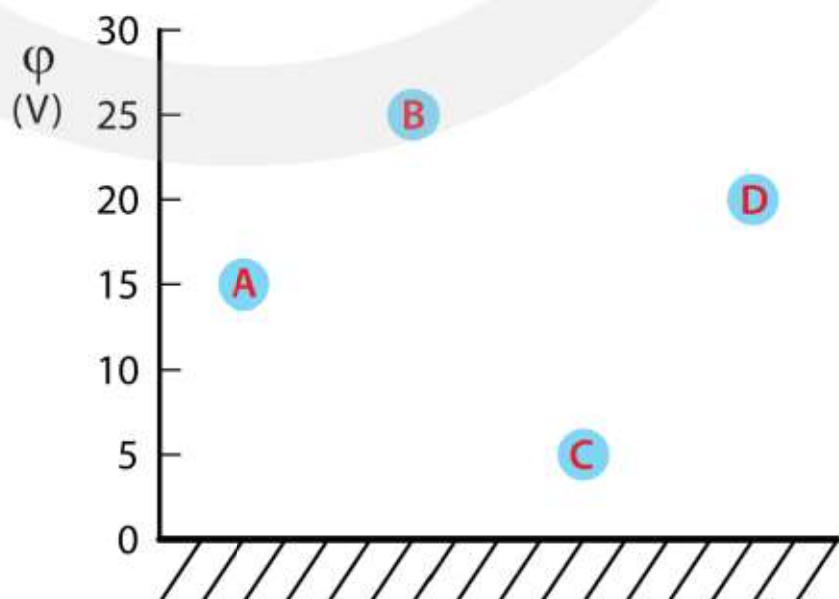
De arbeid die nodig is om 3,0 C lading te verplaatsen is 36 J.

Bereken de elektrische spanning.

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

Elektrische potentiaal

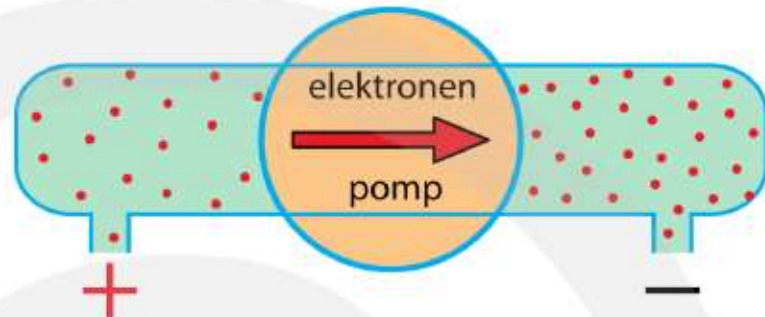
Als je lading van A naar B verplaatst maakt het niet uit welke route je neemt. Alleen begin en eind doen ertoe. Dit biedt de mogelijkheid om aan iedere plaats een **elektrische potentiaal** φ toe te kennen. De spanning tussen A en B is dan gelijk aan het verschil tussen de elektrische potentialen: $U_{AB} = \Delta\varphi = \varphi_B - \varphi_A$. We zijn vrij om het nulpunt van potentiaal te kiezen. Het is gebruikelijk om de potentiaal van de aarde op nul te stellen. In figuur 4 kun je de potentiaal van de plaatsen A t/m D aflezen. De spanning tussen A en B is $\varphi_B - \varphi_A = 25 - 15 = 10 \text{ V}$.



Figuur 4 Elektrische potentiaal. De potentiaal van de aarde wordt op 0 volt gesteld.

Spanningsbron

Om spanning te creëren is een spanningsbron nodig. Je kunt een spanningsbron zien als een elektronenpomp waardoor er een verschil in elektronenconcentratie ontstaat. In figuur 5 is de concentratie aan de linkerkant kleiner dan aan de rechterkant. Hierdoor ontstaat er een elektrische spanning tussen de linkerkant en de rechterkant.



Figuur 5 Een spanningsbron is een pomp waarmee elektronen worden samengeperst.

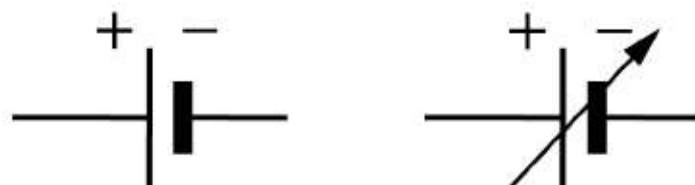
Een spanningsbron is een elektronenpomp. Elektronen worden op elkaar geperst waardoor elektrische spanning ontstaat.

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.

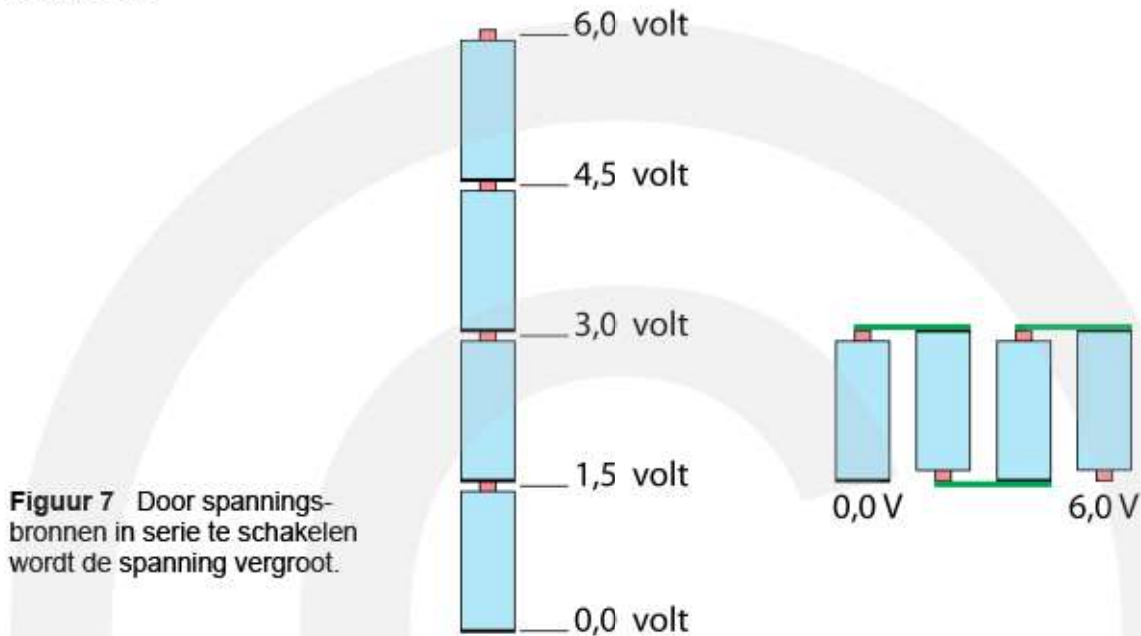
Een spanningsbron wordt met de volgende symbolen aangegeven.



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

Spanningsbronnen in serie

Door spanningsbronnen achter elkaar (in serie) te schakelen wordt de spanning vergroot. Zie figuur 7. Net zoals de druk van een gas groter wordt als je meerdere pompen achter elkaar schakelt is dit bij spanningsbronnen (elektronenpompen) ook het geval.



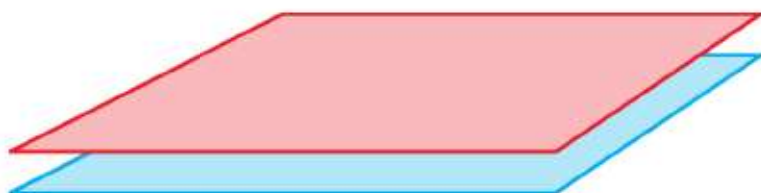
Figuur 7 Door spanningsbronnen in serie te schakelen wordt de spanning vergroot.

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 en wisselt 50 keer per seconde van plus naar min en 50 keer per seconde van min naar plus.

Condensator

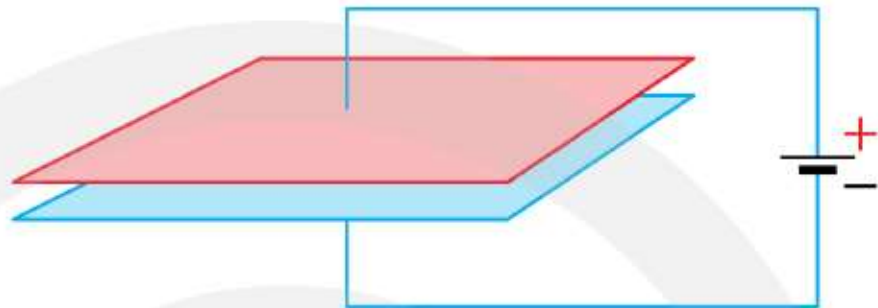
Elektrische energie kan worden opgeslagen in een **condensator**. Een condensator bestaat uit twee dunne metalen platen die vlak naast elkaar liggen. Tussen de metaalplaten zit een stof waar elektronen niet doorheen kunnen gaan. Zie figuur 8.



Figuur 8 Een condensator.

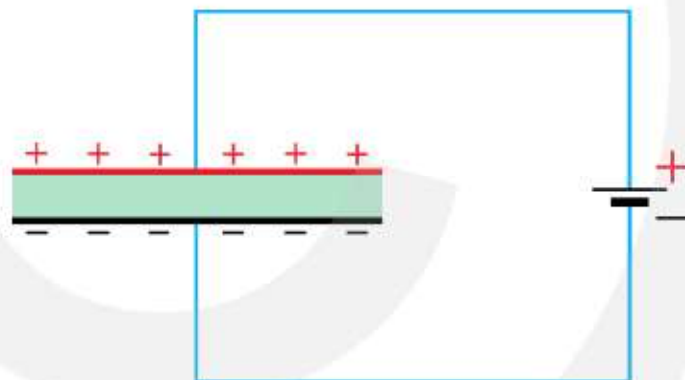
Een condensator wordt aangesloten op een spanningsbron. Zie figuur 9. De bovenste plaat is verbonden met de plus-pool en de onderste plaat met de min-pool. De spanningsbron pompt elektronen van de bovenste plaat naar de onderste plaat. De bovenste plaat krijgt hierdoor een positieve lading en de onderste plaat een negatieve lading.

Figuur 9 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. Zie figuur 10.

Figuur 10 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.

Benjamin Franklin (Amerika, 1706 – 1790) heeft 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 door Joseph John Thomson (Engeland, 1856 – 1940) ontdekt.

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, halfgeleiders en isolators

Een **geleider** is een stof waarin de concentratie van vrije elektronen groot is. Vrije elektronen zijn elektronen die gemakkelijk tussen de atomen door kunnen bewegen. Bij een **halfgeleider** is de concentratie van vrij elektronen veel kleiner dan in een geleider. Bij een **isolator** zijn er nagenoeg geen vrije elektronen.

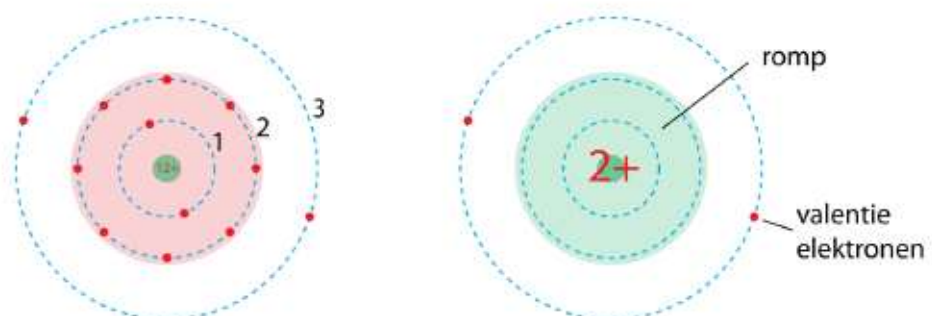
Geleiders: alle metalen – zoutoplossingen – sommige keramische materialen
Halfgeleiders: germanium – silicium – grafiet – sommige verbindingen
Isolators: glas – porselein – steen – rubber – plastic – hout – vast zout



Figuur 11 Koper is een 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.

Atoomtheorie van elektrische geleiding in vaste stoffen

Sommige stoffen geleiden heel goed en andere heel slecht. Dit heeft te maken met de atomen waaruit een stof is opgebouwd en met de manier waarop deze atomen zijn gestapeld. Alle metalen zijn elektrische geleiders. Om dit te begrijpen nemen we als voorbeeld het magnesium atoom. Zie figuur 12.

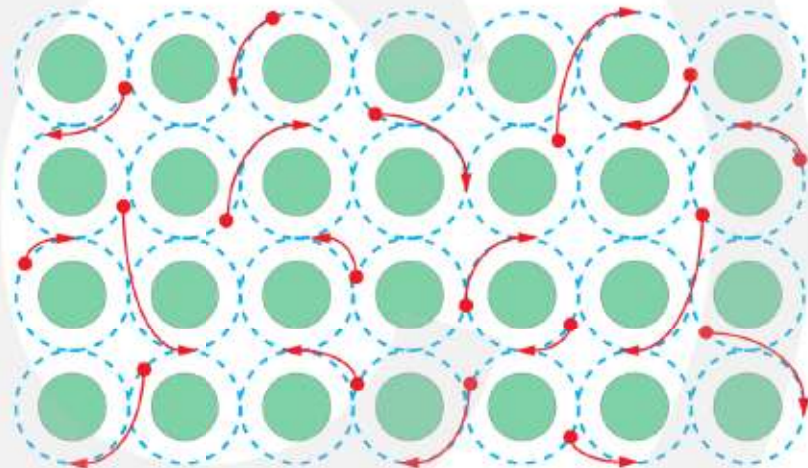


Figuur 12 Het magnesiumatoom

Bij het magnesiumatoom kost het veel energie om een elektron uit de eerste en tweede schil te verwijderen. Om een elektron uit de derde schil te verwijderen kost niet veel energie. De atoomkern plus de elektronen in de schillen 1 en 2 noemen we de **romp** van het atoom.

Om de romp bevinden zich twee elektronen in de derde schil. Deze elektronen noemen we de **valentie-elektronen**. Omdat de valentie-elektronen zwak zijn gebonden aan de kern kunnen ze gemakkelijk loskomen. Dit gebeurt in een metaal. In een metaal bevinden de metaalatomen zich zo dicht bij elkaar dat een valentie-elektron kan overspringen van het ene naar het andere atoom. De valentie-elektronen bewegen kriskras door het metaal en zorgen voor de elektrische geleiding. Zie figuur 13.

In een metaal gedragen de losgeraakte valentie-elektronen zich zoals gasmoleculen. We spreken daarom van een **elektronengas**. Een verschil tussen losgeraakte **vrije elektronen** en gasmoleculen is dat elektronen elkaar afstoten als ze bij elkaar in de buurt komen. Gasmoleculen stoten elkaar alleen af als ze tegen elkaar botsen.



Figuur 13 Magnesium metaal met elektronengas.

Geleiding in vloeistoffen (elektrolyten)

Zout in vaste toestand is een isolator, omdat de ionen waaruit het zout bestaat zich niet kunnen verplaatsen. Als zout wordt gesmolten of wordt opgelost in water kunnen de ionen zich wel gemakkelijk verplaatsen, waardoor het **gesmolten zout** en een **zout oplossing** goede elektrische geleiders zijn. De aarde bevat veel zout water en metalen, waardoor de aarde een redelijk goede geleider is. Planten en dieren (inclusief de mens) bestaan ook voor een groot deel uit zout water.

Geleiding in gassen

Een gas bestaat voor het overgrote deel uit neutrale atomen of moleculen, zodat onder normale omstandigheden er geen vrij bewegende ladingdragers zijn en gas dus een isolator is. Maar in een gas zijn niet alle atomen of moleculen neutraal. Doordat ze voortdurend tegen elkaar botsen zijn er altijd wel atomen of moleculen te vinden die een elektron zijn kwijtgeraakt en ion zijn geworden. Dit heet **thermische ionisatie**. De ionen en elektronen kunnen vrij bewegen en zorgen dus voor geleiding. Gassen zijn dus geen perfecte isolatoren.

Het aantal geïoniseerde atomen in een gas neemt toe door de aanwezigheid van **kosmische straling**. Dit zijn deeltjes die met hoge snelheid uit de ruimte komen. Botst zo'n deeltje met een gas atoom of molecuul dan wordt er een elektron losgemaakt. Er ontstaan positieve ionen en losse elektronen. Zolang het aantal ionen en elektronen klein is zal het gas een redelijk goede isolator zijn. De elektrische geleiding neemt toe als het aantal geïoniseerde gasatomen groter wordt.

De elektrische geleiding van een gas kan veranderen wanneer dit gas zich tussen twee elektrisch geladen metalen platen bevindt. Atomen die een elektron verloren hebben (positieve ionen) worden door de negatieve plaat aangetrokken, waardoor ze in de richting van deze plaat gaan bewegen. Op hun weg botsen ze tegen de atomen die ze tegenkomen en als deze botsingen hard genoeg zijn verliezen ook deze atomen een elektron. Dit effect heet **stootionisatie**. Vanwege stootionisatie worden er steeds meer ionen gemaakt, waardoor er een lawine ontstaat. Door dit lawine-effect neemt de concentratie van ionen en daarmee de geleiding sterk toe. Ontstaan er heel veel ionen en vrije elektronen in een gas dan wordt het gas een goede elektrische geleider en gaat het licht uitzenden. Het gas is nu een **plasma** geworden.

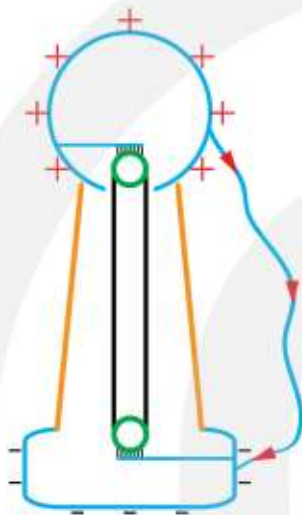
Bij de normale gasdruk van één bar is er een grote lading nodig om een vonk door de lucht te laten overspringen. In een **onweerswolk** kunnen grote ladingen ontstaan, waardoor lucht heel even een plasma wordt en er een vonk overspringt. Een vonk kan van de bovenkant naar de onderkant van de wolk springen, tussen twee verschillend geladen wolken, of naar de aarde. In het laatste geval slaat de bliksem in. Bij een trui die je snel uittrekt kan hetzelfde gebeuren in het klein.

Door de gasdruk te verlagen is het een stuk makkelijker om een plasma te krijgen. Hiervan wordt gebruik gemaakt in een **gasontladinglamp**. Vanwege de aanwezigheid van ionen en vrije elektronen geeft een plasma namelijk licht. De lichtopbrengst is hoog, zodat energiezuinige lampen kunnen worden gemaakt. Bekende voorbeelden hiervan zijn de TL-buis, de spaarlamp, de natriumlamp (voor wegverlichting) en neonlicht (voor reclame).

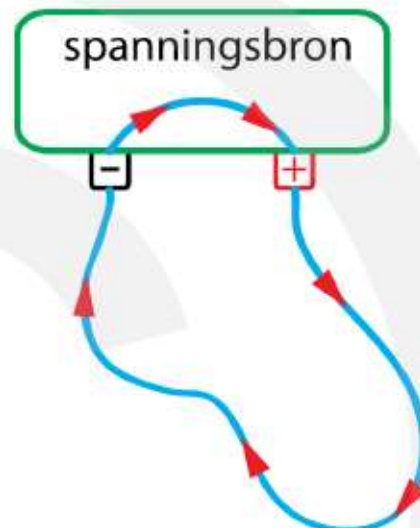
6.3 Stroomkring

Stroomkring en stroomrichting

Nadat positieve en negatieve lading van elkaar is gescheiden 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. Zie figuur 14.



Figuur 14 Ontladen van een Van de Graaff generator.



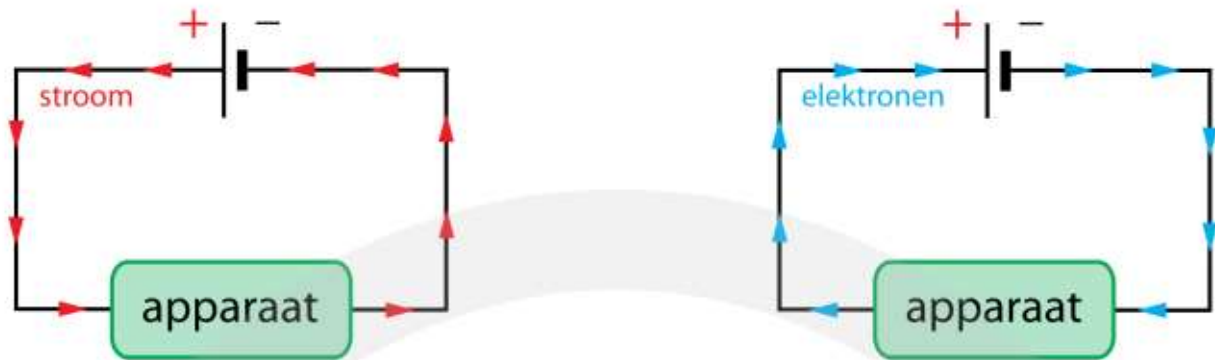
Figuur 15 Stroomkring.

Om elektrische energie continue te kunnen gebruiken moet een **stroomkring (elektrisch circuit)** worden gemaakt. Zie figuur 15. In een stroomkring 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.

Om een elektrisch apparaat te laten werken sluit je hem aan op een spanningsbron. Het apparaat vormt een hindernis in de stroomkring. Er moet arbeid op de elektronen worden uitgeoefend om ze met voldoende snelheid door het apparaat te laten gaan. Hoe groter de hindernis is, hoe meer arbeid het kost. Deze arbeid is de elektrische energie die het apparaat opneemt om te kunnen werken.

De grootte van de hindernis wordt de **weerstand** genoemd. Als de weerstand groot is moet er veel spanning worden aangelegd om in één seconde één coulomb lading te laten rondgaan. In figuur 15 is het rondgaan van elektrische stroom aangegeven.

De weerstand R geeft aan hoeveel spanning er nodig is om één coulomb lading in één seconde door een apparaat te laten gaan.

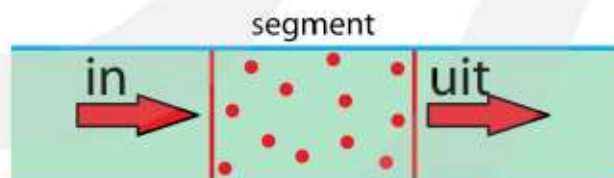


Figuur 16 In een stroomkring loopt de elektrische stroom van plus naar min (links). De elektronen lopen andersom, van min naar plus (rechts).

Bij een continue stroom lopen elektronen in een kring rond.
De spanningsbron vult na ieder rondje de energie van de elektronen aan.

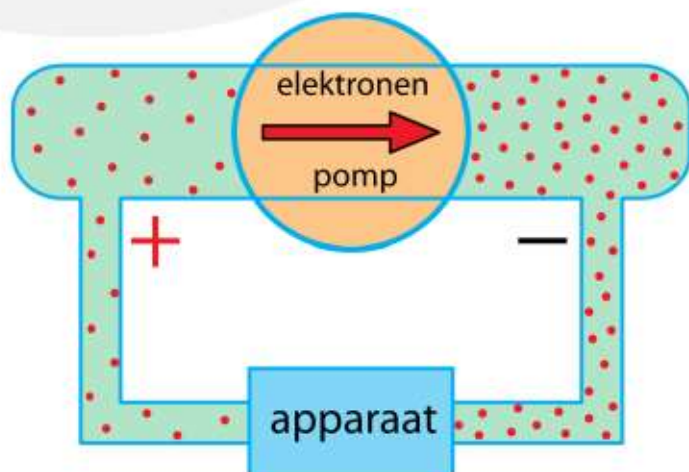
Elektrische stroom gaat buiten de spanningsbron van de pluspool naar de minpool.

Elektronen kunnen niet zomaar ontstaan of verdwijnen. Er is **behoud van elektrische lading**. Voor een continue stroom is het aantal elektronen dat per seconde een segment instroomt gelijk is aan het aantal elektronen dat per seconde het segment uitstroomt. Het aantal elektronen dat zich in het segment bevindt verandert niet. Zie figuur 17.



Figuur 17 Behoud van elektrische lading.

Een apparaat verbruikt geen elektronen. De snelheid van de elektronen past zich aan, zodat per seconde het aantal instromende elektronen altijd gelijk is aan het aantal uitstromende elektronen. Zie figuur 18.



Figuur 18 Een stroomkring. Het aantal instromende elektronen is gelijk aan het aantal uitstromende elektronen.

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).

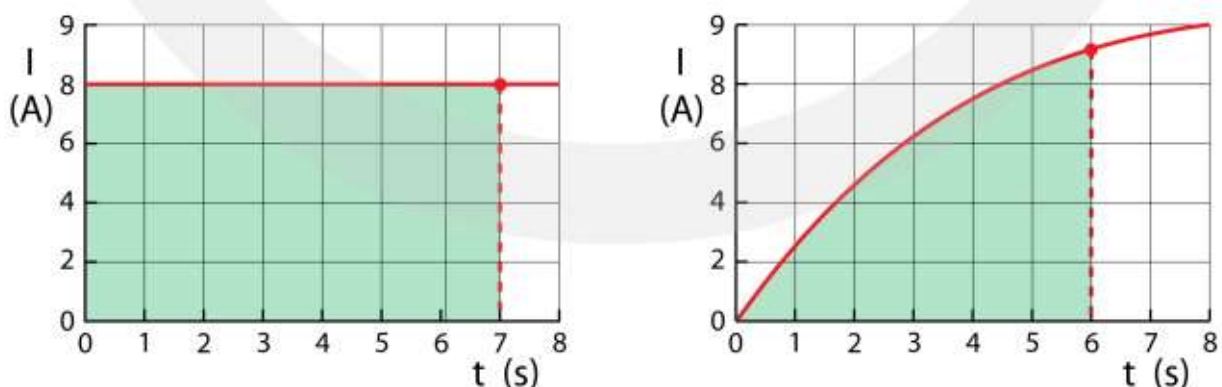
Eén ampère (A) = één coulomb per seconde (C/s).

Het (stroomsterkte, tijd)-diagram

In een (stroomsterkte, tijd)-diagram kun je de stroomsterkte aflezen op een bepaald tijdstip. In een (I , t)-diagram staat op de verticale as de stroomsterkte en op de horizontale as de tijd. Zie figuur 19.

Omdat $Q = I \cdot t$ kan de hoeveelheid gepasseerde lading worden berekend door de oppervlakte onder de (I , t)-grafiek te bepalen. Als de (I , t)-grafiek niet recht is zijn er twee manieren om dit te doen:

- schat de gemiddelde stroomsterkte en vermenigvuldig dit met de tijd
- tel het aantal hokjes onder de grafiek en vermenigvuldig dit met de lading die correspondeert met één hokje.



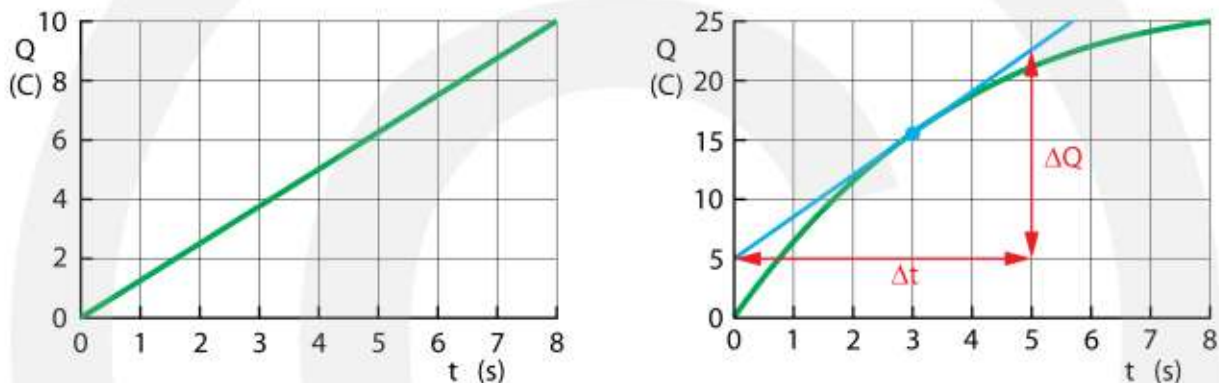
Figuur 19 In een (I , t)-diagram is de stroomsterkte uitgezet tegen de tijd. De oppervlakte onder de grafiek is de lading.

De oppervlakte onder de (I , t)-grafiek tussen t_1 en t_2 is gelijk aan de hoeveelheid verplaatste lading tussen t_1 en t_2 .

Het (lading, tijd)-diagram

De lading die door een apparaat is gegaan kan worden weergegeven in een (lading, tijd)-diagram. In een **(Q, t)-diagram** staat op de verticale as de gepasseerde lading en op de horizontale as de tijd. Als de stroomsterkte constant is neemt de gepasseerde lading per seconde met een vaste hoeveelheid toe. Het (Q, t)-diagram is dan een rechte lijn. De richtingscoëfficiënt van deze lijn is gelijk aan de stroomsterkte. Zie figuur 20.

Is de stroomsterkte niet constant dan is de grafiek een kromme lijn. Wil je uit zo'n grafiek de stroomsterkte op een bepaald tijdstip bepalen dan moet je een raaklijn tekenen aan de (Q,t)-grafiek en daarvan de richtingscoëfficiënt berekenen.



Figuur 20 De stroomsterkte op tijdstip t kan uit een (Q, t)-diagram worden bepaald door de raaklijn te tekenen en daarvan de richtingscoëfficiënt te berekenen.

De richtingscoëfficiënt van de raaklijn aan de (Q,t)-grafiek op tijdstip t is gelijk aan de stroomsterkte op tijdstip t .

Het meten van de spanning en van de stroomsterkte

Als je bij een apparaat weet hoeveel spanning erover staat en hoe groot de stroomsterkte is kun je uitrekenen hoeveel energie het apparaat per seconde opneemt. Hierover leer je later meer. Om de spanning en de stroomsterkte te kunnen meten heb je een **spanningsmeter** en een **stroommeter** nodig. Het is gebruikelijk om een apparaat aan te duiden als "een weerstand". Je spreekt van de spanning over een weerstand en de stroomsterkte door een weerstand.

Spanning meet je met een spanningsmeter, ook wel voltmeter genoemd. Een voltmeter meet hoeveel spanning er over een weerstand staat.

Stroom meet je met een stroommeter, ook wel ampèremeter genoemd. Een ampèremeter meet hoeveel coulomb er per seconde door een weerstand gaat.

– stroommeter (ampèremeter) –

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. Omdat een stroommeter geen invloed mag uitoefenen op het stromen van lading moet de weerstand van een stroommeter zo klein mogelijk zijn. Tenzij anders is aangegeven gaan we er altijd van uit dat de weerstand van een stroommeter nul is. Dit betekent dat het geen energie kost om lading door een stroommeter te laten gaan. De spanning over een stroommeter is daarom nul.

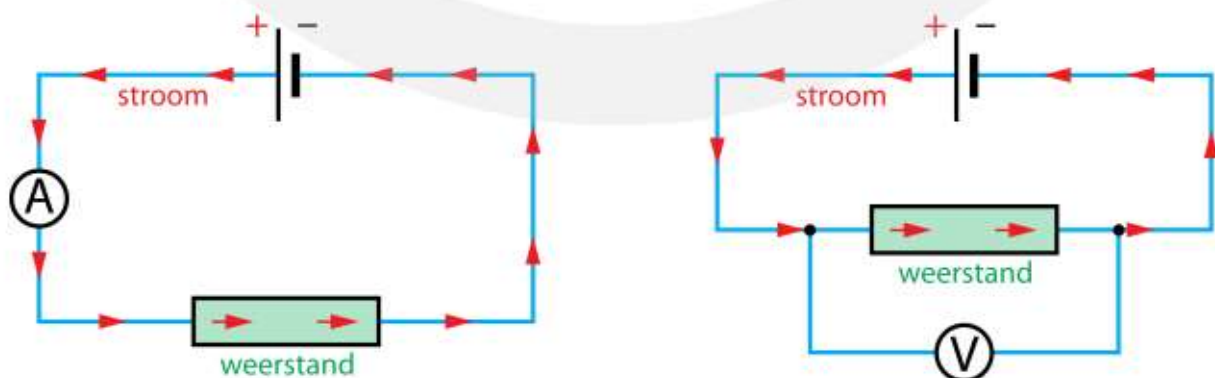
Stroommeter: $R = 0$ en $U = 0$

– spanningsmeter (voltmeter) –

Een spanningsmeter 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. Omdat een spanningsmeter geen invloed mag uitoefenen op het stromen van lading moet de weerstand van een spanningsmeter zo groot mogelijk zijn. Tenzij anders is aangegeven gaan we er altijd van uit dat de weerstand van een spanningsmeter oneindig groot is. Dit betekent dat het oneindig veel energie kost om lading door een spanningsmeter te laten gaan. De stroomsterkte door een spanningsmeter is daarom nul.

Spanningsmeter: $R = \infty$ en $I = 0$

Een stroommeter en een spanningsmeter moet je op een verschillende manier aansluiten. Een stroommeter moet in de kring worden opgenomen. Een spanningsbron moet over een weerstand worden aangesloten. Zie figuur 21.



Figuur 21 Stroommeter in de kring. Spanningsmeter over een weerstand.

Bij een ouderwetse stroom- en spanningsmeter moet je om nauwkeurig te kunnen meten handmatig het meetbereik kiezen. Zie figuur 22 en figuur 23. Bij moderne meters gebeurt dit automatisch. Bij **analoge meters** geeft een wijzer de stroomsterkte en de spanning aan. Bij **digitale meters** verschijnt er een getal. Het aantal cijfers geeft de nauwkeurigheid aan. De goedkope digitale multimeter van figuur 24 heeft maar drie cijfers. De professionele voltmeter van figuur 25 heeft acht cijfers.



Figuur 22
Stroommeter met drie meetbereiken:
Boven: maximaal 5 A
Midden: maximaal 0,5 A
Onder: maximaal 0,05 A



Figuur 23
Spanningsmeter met drie meetbereiken:
Boven: maximaal 30 V
Midden: maximaal 15 V
Onder: maximaal 3 V



Figuur 24
Digitale multimeter voor algemeen gebruik.



Figuur 25 Gevoelige voltmeter voor nauwkeurige metingen.

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 energie. Is de weerstand groot, dan botsen de elektronen vaak en hebben ze een lage snelheid. Georg Ohm (Duitsland, 1789 – 1854) 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 stroomsterkte 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)

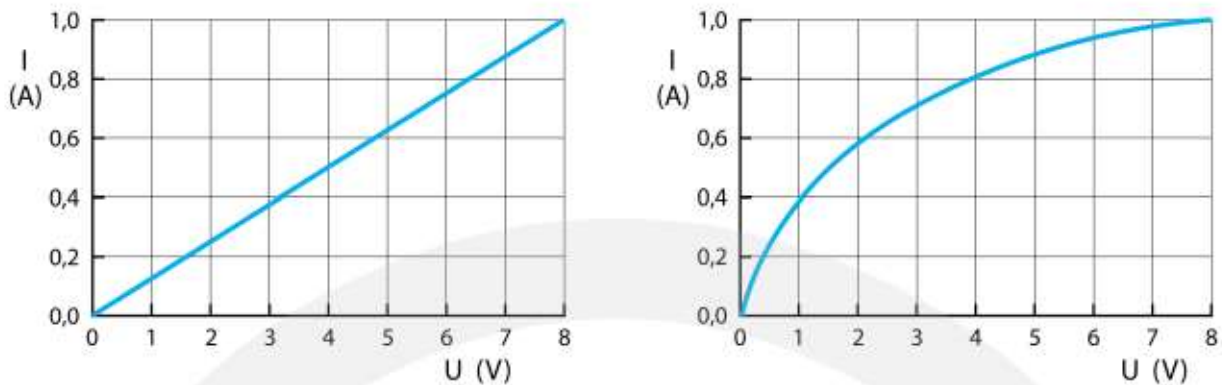
Een weerstand die niet afhankelijk is van de stroomsterkte heet een **ohmse weerstand**. Is de weerstand wel afhankelijk van de stroomsterkte dan spreek je van een **niet ohmse weerstand**. Een gloeilamp, een LED-lamp en een elektromotor zijn voorbeelden van niet-ohmse weerstanden.

Het (stroomsterkte, spanning)-diagram

In een (I , U)-diagram staat op de verticale as de stroomsterkte en op de horizontale as de spanning. Zie figuur 26. Bij een ohmse weerstand is de grafiek een rechte lijn door de oorsprong. De stroom is in dat geval **recht evenredig** met de spanning.

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

Bij een NIET-ohmse weerstand is de (I,U)-grafiek krom.



Figuur 26

Links: (I, U)-diagram van een ohmse weerstand. Bijvoorbeeld een metaaldraad bij kamertemperatuur.
 Rechts: (I, U)-diagram van een NIET ohmse weerstand. Bijvoorbeeld een gloeilamp.

De weerstand van een draad

De weerstand van een draad hangt af van:

- de lengte van de draad
- de oppervlakte van 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 ($\Omega \text{ m}$)
- 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 oppervlakte van de doorsnede A**:

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

- A is de oppervlakte van de doorsnede (m^2). Zie figuur 27.
- r is de straal in meter (m). De straal r is de helft van de diameter.



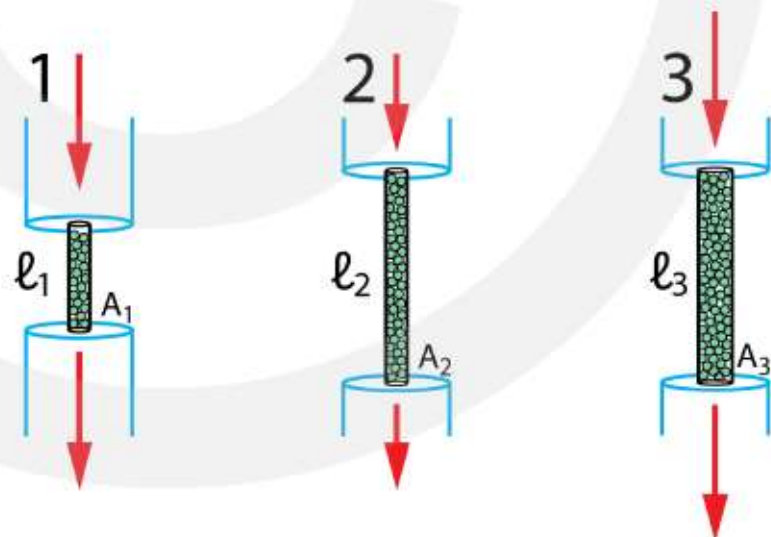
Figuur 27

Doorsnede A en lengte ℓ van een cilindervormige 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 is, nog niet eens meegerekend.

Om bovenstaande formule te begrijpen kunnen we het stromen van elektronen vergelijken met het stromen van gas. Laten we eens kijken hoe gas stroomt door een buis gevuld met zand. Zie figuur 28. De aanvoer en afvoerkanalen zijn breed, zodat het gas daar geen weerstand ondervindt. Bij de vernauwing moet het gas door een dun kanaal met zand. 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 oppervlakte. Daarom is de weerstand van kanaal 3 net zo groot als die van kanaal 1. De grootte en de stapeling van de zandkorrels bepaalt hoe moeilijk het is voor het gas om door de nauwe buis te stromen. Je ziet hieraan dat de weerstand wordt bepaald door de lengte van het kanaal, de oppervlakte van de doorsnede en door de eigenschappen van het zand.

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



Figuur 28 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

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

De weerstands-temperatuurcoëfficiënt

Een (I,U)-grafiek van een gloeilamp is geen rechte lijn. Als de spanning groter wordt neemt de stroomsterkte toe, maar minder dan recht evenredig. Dit komt omdat de weerstand van het gloeidraadje toeneemt als de stroomsterkte groter wordt. Het toenemen van de temperatuur van de gloeidraad is hiervan de oorzaak. Als de temperatuur toeneemt botsen de elektronen vaker en harder met de atomen en met elkaar, waardoor het bewegen wordt gehinderd. Als de lamp brandt stijgt de temperatuur tot meer dan 2000 °C en is de toename van de soortelijke weerstand van de gloeidraad goed te merken.

De verandering van de weerstand ten gevolge van een verandering van de temperatuur kan worden berekend met de weerstands-temperatuurcoëfficiënt α . Deze coëfficiënt geeft aan hoeveel de weerstand per graad temperatuurstijging verandert.

$$\frac{\Delta R}{R_0} = \alpha \cdot \Delta T$$

- ΔR is de verandering van de weerstand in ohm (Ω)
- R_0 is de weerstand in het begin (Ω)
- α is de weerstands-temperatuurcoëfficiënt ($^{\circ}\text{C}^{-1}$ of K^{-1})
- ΔT de temperatuurverandering ($^{\circ}\text{C}$ of K)

Vrijwel alle metalen hebben een weerstands-temperatuurcoëfficiënt tussen $3 \cdot 10^{-3}$ en $6 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Een legering van 56% koper, 1% mangaan en 43% nikkel wordt "**constantan**" genoemd. Deze legering heeft zijn naam te danken aan de uitzonderlijk lage weerstands-temperatuurcoëfficiënt van $\alpha = 5 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

– PTC-weerstanden –

De soortelijke weerstand van metaal neemt toe als de temperatuur toeneemt. De temperatuurcoëfficiënt van een metaal is positief. PTC staat voor **positieve temperatuurcoëfficiënt**. De toename van de soortelijke weerstand ontstaat doordat de elektronen bij hogere temperatuur vaker en krachtiger botsen met de atomen en de andere elektronen. Hierdoor worden ze sterker afgeremd, waardoor hun gemiddelde snelheid afneemt.

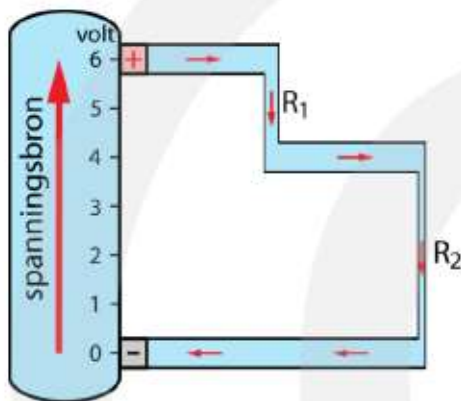
– NTC-weerstanden –

Halfgeleiders, zoals silicium, germanium maar ook grafiet krijgen een lagere weerstand bij hogere temperatuur. De temperatuurcoëfficiënt is negatief. NTC staat voor **negatieve temperatuurcoëfficiënt**. Ook bij NTC-materialen botsen de elektronen vaker en harder, maar er is nog een ander effect dat sterker is. Bij NTC-materialen wordt de concentratie van de elektronen die deelnemen aan de geleiding groter als de temperatuur stijgt. De toename van de elektronenconcentratie neemt exponentieel toe met de temperatuur en overschaduwde daarom de lagere gemiddelde snelheid.

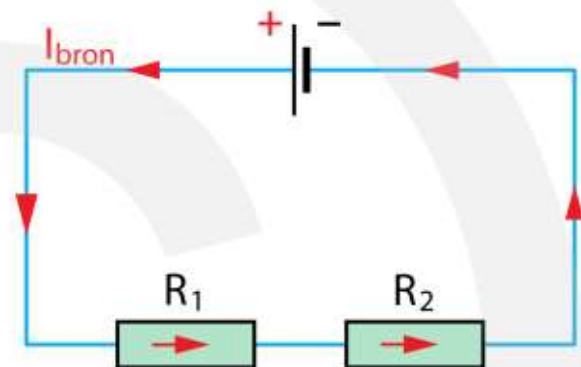
6.5 Serieschakeling en parallelschakeling

Serieschakeling

Als twee weerstanden R_1 en R_2 achter elkaar zijn geschakeld gaan alle elektronen door de weerstanden R_1 en R_2 . Dit noemen we een **serieschakeling**. In een serieschakeling is de stroomsterkte door beide weerstanden hetzelfde. Zie figuur 29 en 30. De 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.



Figuur 29 In een serieschakeling gaat de stroom door iedere weerstand $I_1 = I_2$. De spanning verdeelt zich: $U_{\text{bron}} = U_1 + U_2$.



Figuur 30 Stroom gaat rond in een kring. Door R_1 en R_2 gaat dezelfde stroomsterkte. R_2 is groter dan R_1 . Om elektronen door R_2 te persen is meer spanning nodig.

Serieschakeling: $U_{\text{bron}} = U_1 + U_2$ en $I_{\text{bron}} = I_1 = I_2$

Totale weerstand bij een serieschakeling

In serie geschakelde weerstanden veroorzaken samen de hinder die elektronen ondervinden in het circuit. De **totale weerstand** is de weerstand die de in serie geschakelde weerstanden kan vervangen en wordt daarom ook de **vervangingsweerstand** genoemd. Bij een serieschakeling geldt voor de totale weerstand:

Serieschakeling $R_{\text{tot}} = R_1 + R_2$

- R_{tot} is de totale weerstand (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 30. $R_1 = 30 \Omega$ en $R_2 = 20 \Omega$.

Bereken de spanning over R_1 en over R_2

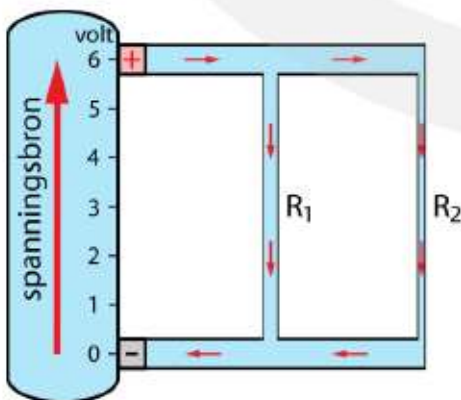
- $R_{\text{tot}} = R_1 + R_2$
- $R_{\text{tot}} = 30 + 20 = 50 \Omega$
- $U_{\text{bron}} = I_{\text{bron}} \cdot R_{\text{tot}}$
- $6 = I_{\text{bron}} \cdot 50 \rightarrow I_{\text{bron}} = \frac{6}{50} = 0,12 \text{ A}$
- $I_{\text{bron}} = I_1 = I_2$
- $U_1 = I_1 \cdot R_1 \rightarrow U_1 = 0,12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

Toon aan dat U_{bron} gelijk is aan $U_1 + U_2$

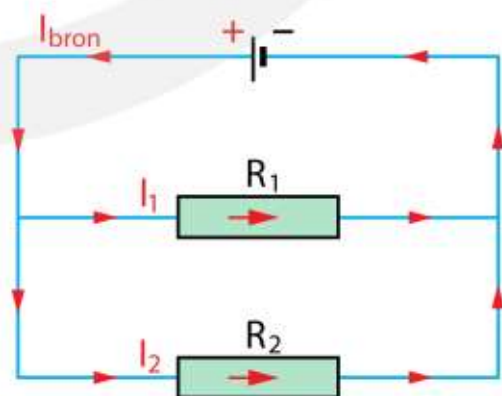
- $U_1 = 3,6 \text{ V} \quad | \quad U_2 = 2,4 \text{ V}$
- $U_1 + U_2 = 3,6 + 2,4 = 6,0 \text{ V}$

Parallelschakeling

Als twee weerstanden R_1 en R_2 naast elkaar zijn geschakeld verdelen de elektronen zich over de twee routes. Dit noemen we een **parallelschakeling**. In een parallelschakeling krijgen beide weerstanden dezelfde spanning, want iedere weerstand is direct verbonden met de spanningsbron. De stroom splitst zich in twee routes. Zie figuur 31 en 32. 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.



Figuur 31 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 32 Er zijn twee stroomkringen. Over R_1 en R_2 staat dezelfde spanning. De meeste stroom (maar niet alle stroom) gaat door de kleinste weerstand.

$$\text{Parallelschakeling: } U_{\text{bron}} = U_1 = U_2 \quad \text{en} \quad I_{\text{bron}} = I_1 + I_2$$

Totale weerstand bij een parallelschakeling

Bij twee parallel geschakelde weerstanden zijn er twee routes voor de elektronen beschikbaar. De **totale weerstand** is kleiner dan de weerstanden afzonderlijk. Hoe groter het aantal routes is hoe kleiner de totale weerstand wordt. Het lijkt onlogisch dat het toevoegen van weerstanden de totale weerstand kleiner maakt. Maar als je denkt in termen van aantal beschikbare routes is het goed te begrijpen. Hoe meer alternatieven er zijn, hoe makkelijker het is voor de elektronen om door het externe circuit te stromen.

$$\text{Parallelschakeling} \quad \frac{1}{R_{\text{tot}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

- R_{tot} is de totale weerstand (de vervangingsweerstand) in ohm (Ω)
- R_1 en R_2 zijn de parallel-geschakelde weerstanden 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 32. $R_1 = 30 \Omega$ en $R_2 = 20 \Omega$.

Bereken de stroom door R_1 en door R_2

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

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}

- $U_{\text{bron}} = 6,0 \text{ V} \quad | \quad I_{\text{bron}} = 0,50 \text{ A} \quad | \quad R_{\text{tot}} = \dots \Omega$
- $R_{\text{tot}} = \frac{U_{\text{bron}}}{I_{\text{bron}}} = \frac{6,0}{0,50} = 12 \Omega$

Bereken de vervangingsweerstand van R_1 en R_2

- $\frac{1}{R_{\text{tot}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad \rightarrow \quad \frac{1}{R_{\text{tot}}} = \frac{1}{30} + \frac{1}{20} = 0,08333 \quad \rightarrow \quad R_{\text{tot}} = \frac{1}{0,08333} = 12 \Omega$

Geleidbaarheid

De weerstand geeft aan hoe **moeilijk** het is om elektronen te laten stromen, de **geleidbaarheid** geeft aan hoe **gemakkelijk** het is. De geleidbaarheid is het omgekeerde van de weerstand. Soms is het handig om berekeningen uit te voeren met de geleidbaarheid in plaats van met de weerstand.

Geleidbaarheid heeft het symbool G en als eenheid siemens S.

$$G = \frac{1}{R} \quad \Leftrightarrow \quad R = \frac{1}{G}$$

- G is de geleidbaarheid in siemens (S) ($= \Omega^{-1}$)
- R is de weerstand in ohm (Ω)

Bij een parallelschakeling komt de geleidbaarheid van pas. Voor de totale weerstand van een parallelschakeling geldt: $\frac{1}{R_{\text{tot}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$. Hieruit volgt:

$$G_{\text{tot}} = G_1 + G_2$$

- G_{tot} is de totale geleidbaarheid in siemens (S)
- G_1 is de geleidbaarheid van het eerste element in siemens (S)
- G_2 is de geleidbaarheid van het tweede element in siemens (S)

VOORBEELD parallelschakeling met geleidbaarheid

Een spanningsbron levert een spanning van 6,0 V over een parallelschakeling van twee weerstanden R_1 en R_2 . Zie figuur 32. $R_1 = 30 \Omega$ en $R_2 = 20 \Omega$.

Bereken de geleidbaarheid van R_1 en R_2

- $G_1 = \frac{1}{30} = 0,033 \text{ S}$ en $G_2 = \frac{1}{20} = 0,050 \text{ S}$

Bereken de totale geleidbaarheid van R_1 en R_2

- $G_{\text{tot}} = G_1 + G_2$
- $G_{\text{tot}} = 0,033 + 0,050 = 0,083 \text{ S}$

Bereken de totale weerstand van R_1 en R_2

- $G = \frac{1}{R} \rightarrow R_{\text{tot}} = \frac{1}{G_{\text{tot}}} \rightarrow R_{\text{tot}} = \frac{1}{0,083} = 12 \Omega$

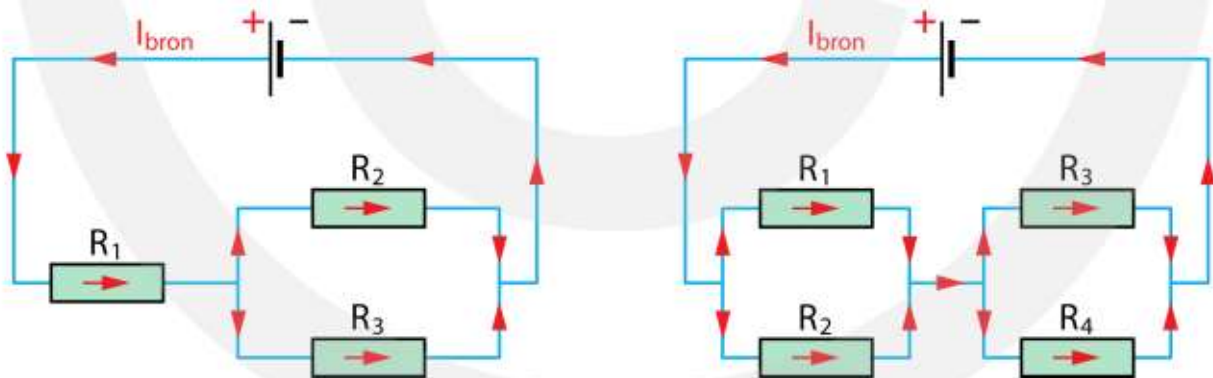
Overzicht serie en parallel

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	$R_{\text{tot}} = R_1 + R_2$	$\frac{1}{R_{\text{tot}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$
geleidbaarheid	$\frac{1}{G_{\text{tot}}} = \frac{1}{G_1} + \frac{1}{G_2}$	$G_{\text{tot}} = G_1 + G_2$

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 33.



Figuur 33 Gemengde schakelingen.

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 weerstand 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 totale weerstand van deze twee weerstanden.
- 3 Vervang in het schema de twee weerstanden door deze totale weerstand.
- 4 Ga terug naar stap 1 en herhaal de procedure.

VOORBEELD gemengde schakeling

Een gemengde schakeling zoals in figuur 33 (links) is aangesloten op een spanning van $U_{\text{bron}} = 5,0 \text{ V}$. $R_1 = 8,0 \Omega$, $R_2 = 20 \Omega$ en $R_3 = 30 \Omega$.

Bereken de bronstroom I_{bron}

- R_{23} is de vervangingsweerstand van R_2 en R_3
- $\frac{1}{R_{23}} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \rightarrow \frac{1}{R_{23}} = \frac{1}{20} + \frac{1}{30} = 0,08333 \rightarrow R_{23} = 12 \Omega$
- $R_{\text{tot}} = R_1 + R_{23} = 8 + 12 = 20 \Omega$
- $U_{\text{bron}} = I_{\text{bron}} \cdot R_{\text{tot}} \rightarrow 5 = I_{\text{bron}} \cdot 20 \rightarrow I_{\text{bron}} = \frac{5}{20} = 0,25 \text{ A}$

Bereken de spanning over de weerstand R_1

- $I_1 = I_{\text{bron}} = 0,25 \text{ A} \mid R_1 = 8,0 \Omega \mid U_1 = \dots \text{ V}$
- $U_1 = I_1 \cdot R_1 \rightarrow U_1 = 0,25 \cdot 8 \rightarrow U_1 = 2,0 \text{ V}$

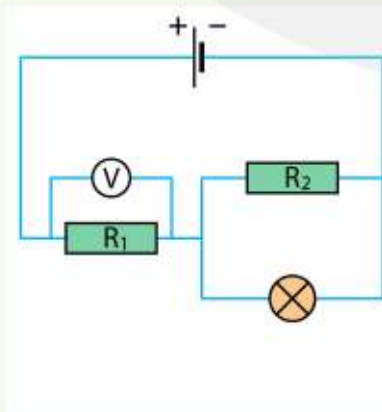
Bereken de spanning over de weerstanden R_2 en R_3

- $I_{23} = I_{\text{bron}} = 0,25 \text{ A} \mid R_{23} = 12 \Omega \mid U_{23} = \dots \text{ V}$
- $U_{23} = I_{23} \cdot R_{23} \rightarrow U_{23} = 0,25 \cdot 12 \rightarrow U_{23} = 3,0 \text{ V}$
- $U_{23} = U_2 = U_3 = 3,0 \text{ V}$

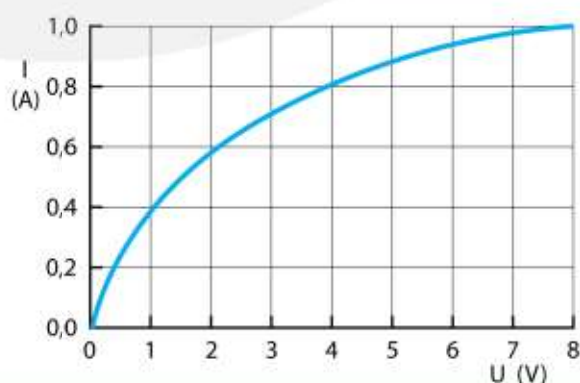
Bereken de stroomsterkte door weerstanden R_2 en R_3

- $U_2 = I_2 \cdot R_2 \rightarrow 3 = I_2 \cdot 20 \rightarrow I_2 = \frac{3}{20} = 0,15 \text{ A}$
- $U_3 = I_3 \cdot R_3 \rightarrow 3 = I_3 \cdot 30 \rightarrow I_3 = \frac{3}{30} = 0,10 \text{ A}$

VOORBEELD gemengde schakeling met lampje



Figuur 34 Gemengde schakeling



Figuur 35 (I, U)-diagram

Een lampje is opgenomen in een gemengde schakeling. Zie figuur 34. Het (I, U)-diagram van het lampje is gegeven in figuur 35. De voltmeter geeft 6,0 V aan. $U_{\text{bron}} = 10 \text{ V}$ en $R_2 = 10 \Omega$.

Bereken stroomsterkte die de spanningsbron levert 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 35: $I_{\text{lamp}} = 0,80 \text{ A}$
- $U_2 = U_{\text{lamp}} = 4 \text{ V}$
- $U_2 = I_2 \cdot R_2 \rightarrow 4 = I_2 \cdot 10 \rightarrow I_2 = \frac{4}{10} = 0,40 \text{ A}$
- $I_{\text{bron}} = I_2 + I_{\text{lamp}} \rightarrow I_{\text{bron}} = 0,4 + 0,8 = 1,2 \text{ A}$

Bereken weerstand R_1 .

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

6.6 Energie, vermogen en rendement

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 vermogen

Het vermogen geeft aan hoeveel energie er in één seconde wordt omgezet. De eenheid van het elektrische vermogen is genoemd naar James Watt (Schotland, 1736 – 1819) die in 1764 uitvindt hoe een stoommachine twintig keer efficiënter kan werken. 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.

Hoeveel elektrische energie wordt er in 2,5 uur omgezet?

- $t = 2,5 \cdot 60 \cdot 60 = 9000 \text{ s}$
- $E = P \cdot t \rightarrow E = 60 \cdot 9000 = 540.000 = 5,4 \cdot 10^5 \text{ J}$

De wet van Joule

Combineren we: $E_{el} = U \cdot I \cdot t$ met $E_{el} = P_{el} \cdot t$, 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)
- U is de spanning in volt (V)
- I is de stroomsterkte in ampère (A)

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.

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

VOORBEELD MP3 speler

Twee in serie geschakelde batterijen van 1,5 V leveren tijdens het afspelen een stroomsterkte van 60 mA.

Bereken het vermogen van de MP3 speler.

- $U = 2 \cdot 1,5 = 3,0 \text{ V} \quad | \quad I = 0,060 \text{ A} \quad | \quad P = \dots \text{ W}$
- $P = U \cdot I \rightarrow P = 3,0 \cdot 0,060 = 0,18 \text{ W}$

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

- $P = 0,18 \text{ W} \quad | \quad t = 120 + 30 = 150 \text{ s} \quad | \quad E_{el} = \dots \text{ J}$
- $E = P \cdot t \rightarrow E = 0,18 \cdot 150 = 27 \text{ J}$

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. $1 \text{ kWh} = 1000 \cdot 3600 \text{ J} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$. 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 is 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 $4,8 \cdot 3,6 \cdot 10^6 = 1,728 \cdot 10^7 = 1,7 \cdot 10^7 \text{ J}$

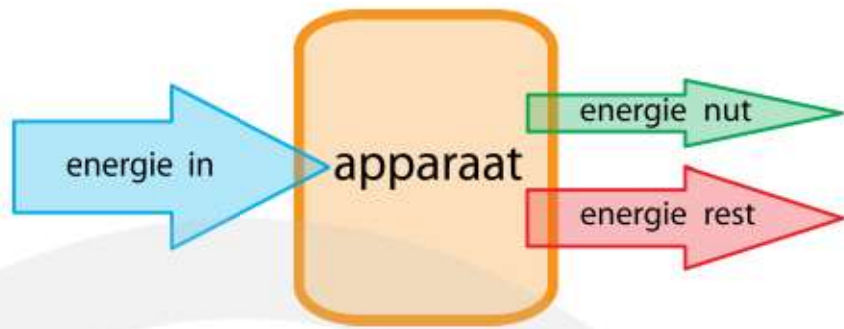
Bereken hoeveel je voor een wasbeurt moet betalen.

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

Rendement

In ieder elektrisch apparaat ontstaat warmte. Dit komt omdat de bewegende elektronen tegen atomen en andere elektronen botsen die hierdoor harder gaan trillen. Bij verwarmingselementen, zoals in een broodrooster, is het toenemen van de temperatuur gewenst. Bij andere apparaten, zoals in een elektromotor, 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 E_{in} wordt maar voor een deel nuttig gebruikt. Dit deel noem je E_{nut} . De rest 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. Zie figuur 36.

Figuur 36 De opgenomen energie E_{in} wordt 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} .

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

- 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 nuttige energie in joule (J)
- P_{in} is het opgenomen vermogen in watt (W)
- P_{nut} is het nuttige vermogen in watt (W)

VOORBEELD gloeilamp

Een LED-lamp heeft een vermogen van 12 W. In deze lamp wordt 40% van de elektrische energie omgezet in licht.

Bereken hoeveel warmte de LED-lamp in 5,0 uur produceert.

- $E_{in} = P_{in} \cdot t \rightarrow E_{in} = 12 \cdot 5,0 \cdot 3600 = 2,16 \cdot 10^5 \text{ J}$
- $\eta = 40\% \mid E_{in} = 2,16 \cdot 10^5 \text{ J} \mid E_{nut} = \dots \text{ J}$
- $\eta = \frac{E_{nut}}{E_{in}} \cdot 100\% \rightarrow 40 = \frac{E_{nut}}{2,16 \cdot 10^5} \cdot 100 \rightarrow E_{nut} = 8,64 \cdot 10^4 \text{ J}$
- $E_{rest} = E_{in} - E_{nut} = 2,16 \cdot 10^5 - 8,64 \cdot 10^4 = 1,296 \cdot 10^5 = 1,3 \cdot 10^5 \text{ J}$

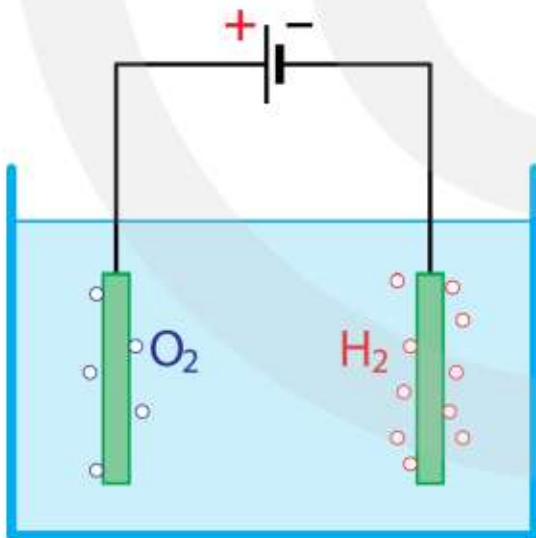
Opslag van elektrische energie

Een belangrijke technologische uitdaging is de opslag van elektrische energie. Tot nu toe wordt de meeste elektrische energie gemaakt in centrales die op ieder moment de energie produceren die nodig is. Elektriciteit wordt dus niet op grote schaal opgeslagen. Maar met de komst van allerlei mobiele elektrische apparaten, zoals de telefoon, de laptop, de elektrische fiets en de elektrische auto is het steeds belangrijker om elektrische energie op te kunnen slaan. Ook als windenergie en zonne-energie een grote bijdrage gaan leveren moeten er manieren worden gevonden om elektrische energie op te slaan. Het waait immers niet altijd en de zon schijnt ook niet altijd. Om elektrische energie op te slaan zijn er de volgende mogelijkheden:

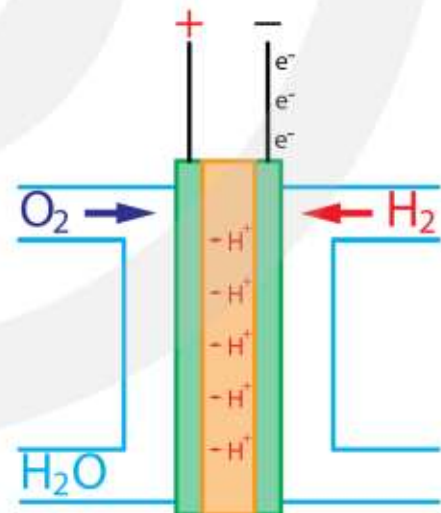
- waterstofgas uit water
- gebruik van condensators
- gebruik van accu's (oplaadbare batterijen)

– waterstofgas –

Waterstofgas kan eenvoudig uit water worden gemaakt met behulp van **elektrolyse**. Daarvoor wordt de opstelling van figuur 37 gebruikt. In een bak met water worden twee geleidende staven (elektrodes) aangebracht. Deze elektrodes sluit je aan op een spanningsbron. Bij een spanning van meer dan 1,2 volt wordt water gesplitst in H_2 gas en O_2 gas. Bij de positieve staaf ontstaat O_2 en bij de negatieve staaf H_2 in een verhouding van 1 : 2. Om uit H_2 -gas en O_2 -gas elektriciteit te maken gebruik je een brandstofcel. In een brandstofcel gebeurt de omgekeerde reactie, zie figuur 38.



Figuur 37 Elektrolyse van water.



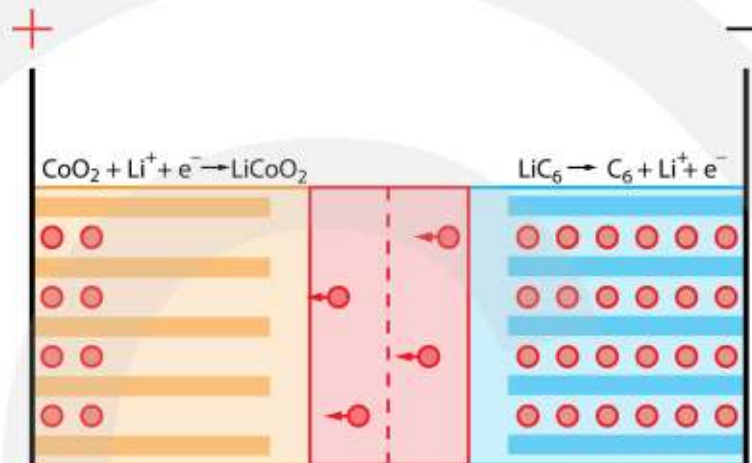
Figuur 38 Brandstofcel.

– condensator –

Zoals we eerder hebben gezien bestaat een condensator uit twee platen die van elkaar zijn gescheiden door een isolator. Bij het opladen van een condensator krijgt de ene plaat een positieve lading en de andere plaat een negatieve lading. De hoeveelheid elektrische energie die je in een condensator kunt opslaan is beperkt, maar een condensator kan wel heel snel energie opnemen en afstaan.

– accu –

Accu's (oplaadbare batterijen) worden het meest gebruikt om elektrische energie op te slaan. Vooral accu's gebaseerd op lithium-ionen worden veel toegepast. In een Li-ion accu bevinden zich twee elektrodes, waarin Li⁺-ionen zijn opgenomen. De positieve elektrode is gemaakt van bijvoorbeeld kobaltoxide, LiCoO₂, en de negatieve elektrode van koolstof, LiC₆. Bij het opladen verplaatsen Li⁺-ionen zich door een elektrolyt van het LiCoO₂ naar het LiC₆. De LiCoO₂ elektrode krijgt hierdoor een positieve spanning van ongeveer 3,8 V. Bij het ontladen gaan de Li⁺-ionen terug van LiC₆ naar LiCoO₂.



Figuur 39
Li-ion accu.

De belangrijkste eigenschappen van een accu zijn:

- de spanning
- de elektrische lading die kan worden opgeslagen (**capaciteit**)
- de opgeslagen elektrische energie
- de elektrische energie per kubieke meter (**energiedichtheid**)
- de elektrische energie per kilogram (**energiedichtheid**)

De **spanning** van een Li-ion accu varieert tussen 3,6 en 3,9 volt.

De **capaciteit** van een accu geeft aan hoeveel lading hij kan afgeven. De eenheid voor capaciteit is Ah of mAh. Eén Ah lading is 3600 C.

De opgeslagen **energie** wordt uitgedrukt in Wh of in kWh.

De **energiedichtheid** heeft als eenheid Wh/m³ of Wh/kg. Een Li-ion accu heeft een energiedichtheid van 300 – 700 kWh/m³ en van 100 – 300 Wh/kg.

Tabel 1 Spanning, capaciteit en opgeslagen energie van Li-ion accu's.

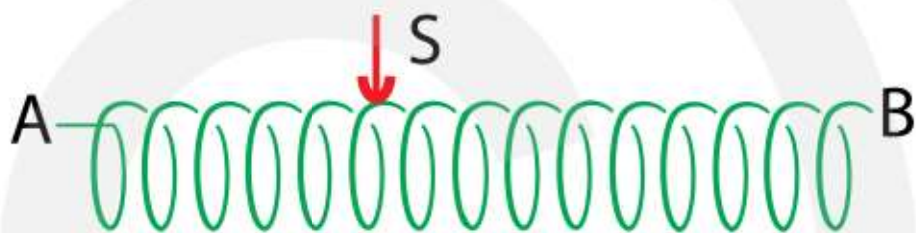
Toepassing	Spanning (V)	Capaciteit (Ah)	Energie (Wh)
knoopcel	3,6	0,12	0,43
mobiele telefoon	3,6	3 – 4	12
tablet (10 inch)	3,7	6 – 8	30
laptop	10	4 – 6	50
elektrische fiets	36	14	500
elektrische auto	350	200	50 – 75 (kWh)

6.7 Variabele weerstand en spanningsdeler

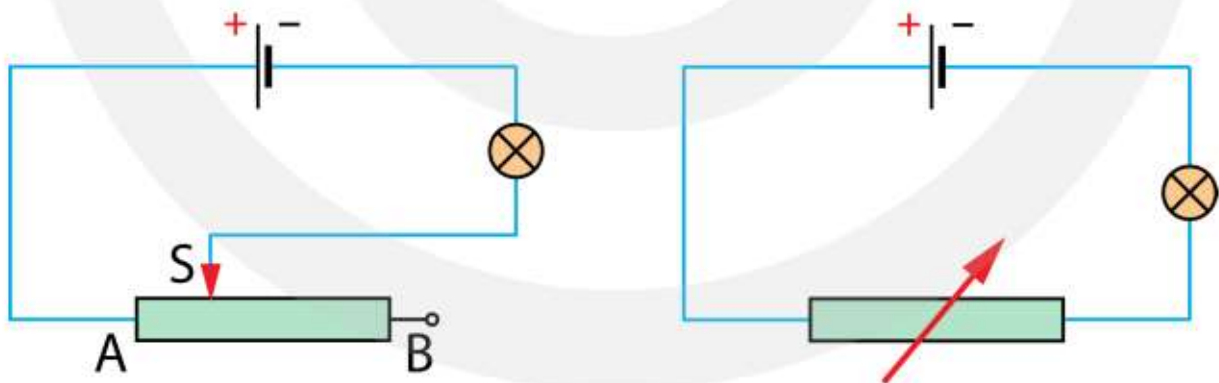
Variabele weerstand

Een variabele weerstand is een weerstand die groter of kleiner gemaakt kan worden. Dit gebeurt door een schuifcontact te verplaatsen. In figuur 40 zie je een draad die als spoel is gewikkeld met schuifcontact S. Deze draad met schuifcontact wordt opgenomen in stroomkring. Zie figuur 41. De stroom gaat bij contactpunt A de draad in en bij contactpunt S de draad uit. Door S te verschuiven kan de lengte van de draad waar de stroom doorheen gaat groter of kleiner worden gemaakt. Hierdoor verandert de weerstand. Verschuiving naar rechts geeft een grotere weerstand en verschuiving naar links een kleinere.

Figuur 40 Variabele weerstand.



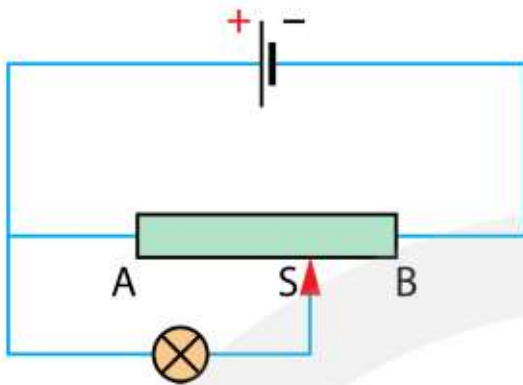
In figuur 41 staat een lampje in serie met een variabele weerstand. Rechts is het elektrotechnisch symbool voor een variabele weerstand gebruikt. Bij een serie-schakeling staat over de grootste weerstand de meeste spanning. Door de variabele weerstand te variëren verandert de verdeling van de spanning: $U_{\text{bron}} = U_{\text{var}} + U_{\text{lamp}}$.



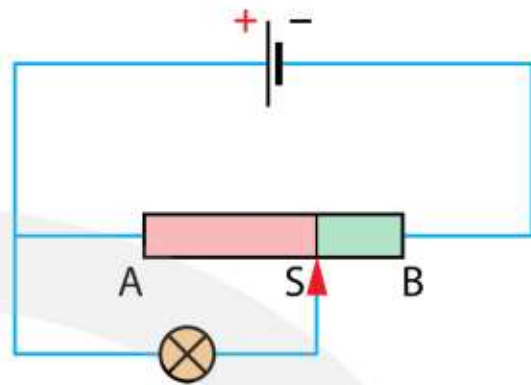
Figuur 41 Een lampje in serie met een variabele weerstand. Rechts zie je dezelfde schakeling.

Spanningsdeler

Een spanningsdeler ziet er hetzelfde uit als een variabele weerstand. Het verschil is dat bij een spanningsdeler contactpunt B wél is aangesloten. In figuur 42 en 43 is een lampje aangesloten op een spanningsdeler. Het lampje is parallel geschakeld met het deel AS. Het deel SB staat hiermee in serie. Een spanningsdeler mag je opvatten als een gemengde schakeling.

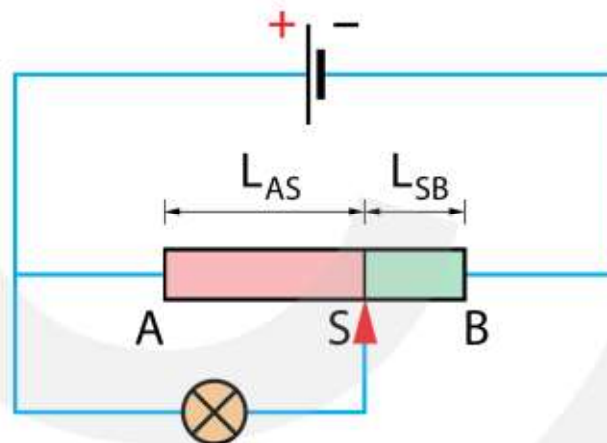


Figuur 42 Een lampje is aangesloten op een spanningsdeler.



Figuur 43 Het lampje staat parallel aan R_{AS} (rood) en staan samen in serie met R_{SB} (groen).

Als de draad gelijkmatig is gewikkeld zal de verhouding tussen de weerstanden R_{AS} en R_{SB} gelijk zijn aan de verhoudingen tussen de lengtes L_{AS} en L_{SB} . Hiermee kun je de plaats van het schuifcontactpunt B uitrekenen. Zie figuur 44. Je kunt ook met de verhouding L_{AS} en L_{AB} werken, zoals in onderstaand voorbeeld wordt gedaan.



Figuur 44 Een spanningsdeler waarin de weerstanddraad gelijkmatig is gewikkeld.

VOORBEELD lampje aangesloten op een spanningsdeler

In figuur 44 is een lampje aangesloten op een spanningsdeler. De spanningsbron geeft 6,0 V. De weerstand van het lampje is 80 Ω . De variabele weerstand kan worden ingesteld tussen 0 en 28 Ω en is 42 cm lang. R_{AS} wordt ingesteld op 20 Ω .

Bereken de totale stroom door het circuit.

- $\frac{1}{R_{AS, lamp}} = \frac{1}{R_{AS}} + \frac{1}{R_{lamp}} = \frac{1}{20} + \frac{1}{80} = 0,0625 \rightarrow R_{AS, lamp} = 16 \Omega$
- $R_{SB} = 28 - 20 = 8,0 \Omega$
- $R_{tot} = R_{AS, lamp} + R_{SB} = 16 + 8 = 24 \Omega$
- $U_{bron} = I_{bron} \cdot R_{tot} \rightarrow 6 = I_{bron} \cdot 24 \rightarrow I_{bron} = 0,25 \text{ A}$

Bereken de spanning over iedere weerstand.

- $U_{AS} = I_{bron} \cdot R_{AS, lamp} \rightarrow U_{AS} = 0,25 \cdot 16 = 4,0 \text{ V}$
- $U_{SB} = I_{bron} \cdot R_{SB} \rightarrow U_{SB} = 0,25 \cdot 8 = 2,0 \text{ V}$

Bereken de stroomsterkte door iedere weerstand.

- $U_{AS} = I_{AS} \cdot R_{AS} \rightarrow 4 = I_{AS} \cdot 20 \leftrightarrow I_{AS} = 0,20 \text{ A}$
- $U_{lamp} = I_{lamp} \cdot R_{lamp} \rightarrow 4 = I_{lamp} \cdot 80 \rightarrow I_{lamp} = 0,050 \text{ A}$
- $I_{SB} = I_{bron} = 0,25 \text{ A}$

Bereken de plaats van het schuifcontact.

- $R_{AS} = 20 \Omega \mid R_{AB} = 28 \Omega \mid L_{AB} = 42 \text{ cm} \mid L_{AS} = \dots \text{ cm}$
- verhouding $\frac{R_{AS}}{R_{AB}} = \frac{L_{AS}}{L_{AB}}$
- $\frac{20}{28} = \frac{L_{AS}}{42} \rightarrow L_{AS} = 30 \text{ cm}$

6.8 De regels van Kirchhoff

In 1845 heeft Gustaf Robert Kirchhoff (Duitsland, 1824 – 1887) twee regels geïntroduceerd waarmee complexe elektrische schakelingen (netwerken) kunnen worden doorgerekend. De **stroomregel** is gebaseerd op de wet op behoud van lading. De **spanningsregel** is gebaseerd op de wet op behoud van energie.

Stroomregel

In elk knooppunt is de inkomende stroomsterkte gelijk aan de uitgaande stroomsterkte.

$$\sum I = I_{\text{in}} - I_{\text{uit}} = 0$$

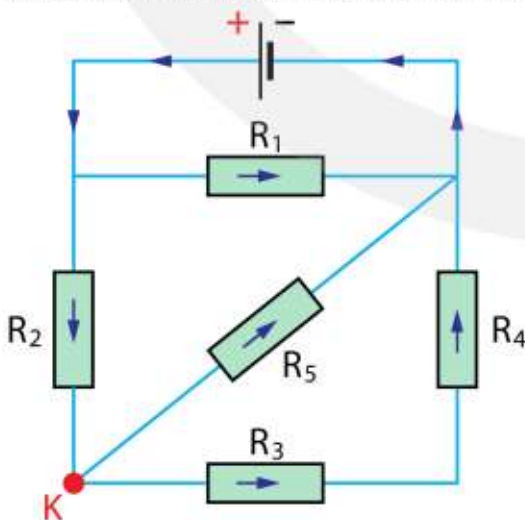
Spanningsregel

In elke lus is de afname van de spanning gelijk aan de toename van de spanning.

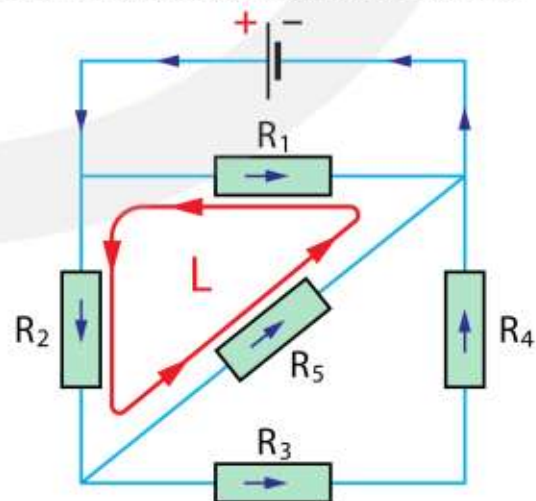
$$\sum U = U_{\text{stijgen}} - U_{\text{dalen}} = 0$$

U stijgt als de spanning toeneemt en U daalt als de spanning afneemt.

In figuur 45 zie je een netwerk met knooppunt K. De inkomende stroom is I_2 (de stroom door R_2), de uitgaande stromen zijn I_3 en I_5 . Voor dit knooppunt geeft de stroomregel: $I_2 = I_3 + I_5$. In figuur 46 zie je een netwerk met een lus. De spanning daalt bij U_2 en U_5 en stijgt bij U_1 . Voor deze lus geeft de spanningsregel: $U_1 = U_2 + U_5$.



Figuur 45 Netwerk met knooppunt K.
Voor dit knooppunt geldt: $I_2 = I_3 + I_5$



Figuur 46 Netwerk met lus L.
Voor deze lus geldt: $U_2 + U_5 = U_1$

Het stijgen en dalen van de spanning in een stroomkring kun je vergelijken met het stromen van water. We stellen ons een pomp voor die water vanuit een meertje naar de top van een berg pompt. Het water stroomt via beekjes terug naar het meertje. De pomp is vergelijkbaar met de spanningsbron en een beekje is vergelijkbaar met een aantal weerstanden in serie. Zijn er meerdere beekjes waar het water zich over verdeelt, dan is dit vergelijkbaar met een parallelschakeling.

We gaan nu een bergwandeling maken langs de beekjes, waarbij we na een tijdje terugkomen bij het beginpunt. Lopen we tegen de waterstroom in, dan zijn we aan het stijgen. Lopen we met de waterstroom mee, dan zijn we aan het dalen. Maar bij de pomp (de spanningsbron) is het net andersom. Ga je met de waterstroom mee, dan ben je aan het stijgen. Voor het stijgen en dalen van de spanning geldt dus het volgende:

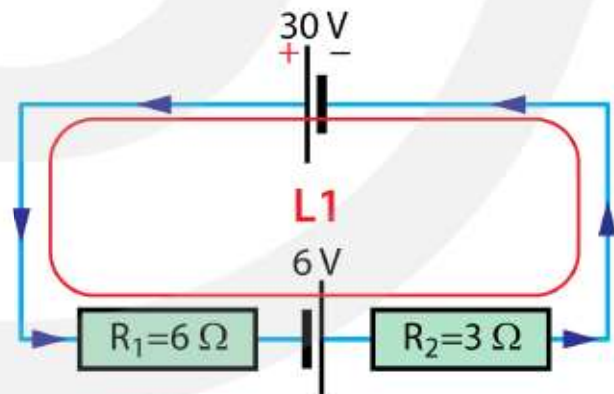
Weerstand: U stijgt tegen de stroom in en U daalt met de stroom mee.

Spanningsbron: U stijgt met de stroom mee en U daalt tegen de stroom in.

Om zien hoe de regels van Kichhoff in de praktijk werken gaan we eerst eenvoudige gevallen uitwerken. In beide gevallen zijn er twee spanningsbronnen en twee weerstanden. Eerst bekijken we een serieschakeling en daarna een parallelschakeling. Omdat er twee spanningsbronnen zijn kunnen we niet op de gebruikelijke manier te werk gaan. Maar de regels van Kirchhoff gelden altijd.

– serieschakeling –

In figuur 47 zie je een serieschakeling met twee spanningsbronnen. $U_{bron1} = 30\text{ V}$ en $U_{bron2} = 6\text{ V}$. Er is geen vertakking van de stroom en dus geen knooppunt. Op iedere plaats in de kring is de stroomsterkte gelijk. Verder is er één lus $L1$.



Figuur 47 Serieschakeling met twee bronnen.

Stroomregel

$$I_{bron1} = I_1 = I_{bron2} = I_2$$

Spanningsregel

$$L1 \rightarrow U_{bron1} - U_1 + U_{bron2} - U_2 = 0$$

Bereken de stroomsterkte in bron 1.

- $L1 \rightarrow U_{bron1} + U_{bron2} = U_1 + U_2 \rightarrow U_{bron1} + U_{bron2} = I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2$
- **stroomregel** $\rightarrow I_{bron1} = I_1 = I_{bron2} = I_2$
- $U_{bron1} + U_{bron2} = I_{bron1} \cdot R_1 + I_{bron1} \cdot R_2 \rightarrow U_{bron1} + U_{bron2} = I_{bron1} \cdot (R_1 + R_2)$
- $30 + 6 = I_{bron1} \cdot (6 + 3) \rightarrow I_{bron1} = 4\text{ A}$ (de stroomsterkte is overal 4 A)

Bereken de spanning over R_1 en over R_2 .

- $U_1 = I_1 \cdot R_1 \rightarrow U_1 = 4 \cdot 6 = 24 \text{ V}$
- $U_2 = I_2 \cdot R_2 \rightarrow U_2 = 4 \cdot 3 = 12 \text{ V}$

– **parallelschakeling** –

In figuur 48 zie je een parallelschakeling met twee bronnen.

$U_{\text{bron 1}} = 30 \text{ V}$ en $U_{\text{bron 2}} = 6 \text{ V}$.

Stroomregels

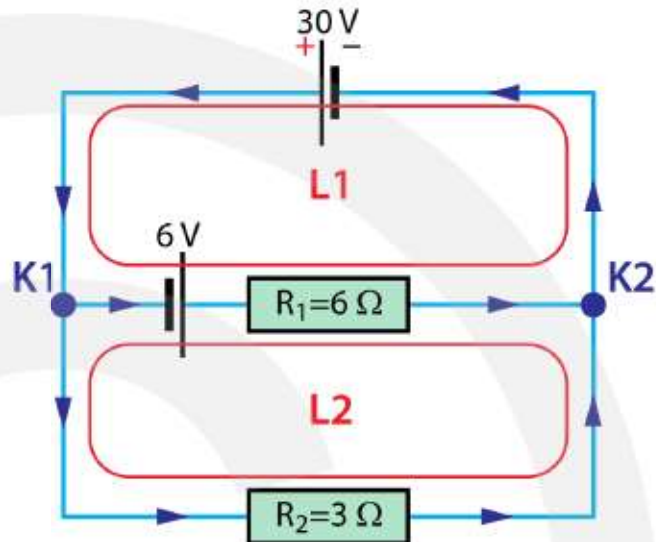
$$K1 \rightarrow I_{\text{bron 1}} - I_{\text{bron 2}} - I_2 = 0$$

$$K2 \rightarrow I_2 + I_1 - I_{\text{bron 1}} = 0$$

Spanningsregels

$$L1 \rightarrow U_{\text{bron 1}} + U_{\text{bron 2}} - U_1 = 0$$

$$L2 \rightarrow U_1 - U_{\text{bron 2}} - U_2 = 0$$



Figuur 48 Parallelschakeling met twee bronnen.

Bereken de spanning over R_1 en over R_2 .

- **L1** $\rightarrow U_1 = U_{\text{bron 1}} + U_{\text{bron 2}} \rightarrow U_1 = 30 + 6 = 36 \text{ V}$
- **L2** $\rightarrow U_2 = U_1 - U_{\text{bron 2}} \rightarrow U_2 = 36 - 6 = 30 \text{ V}$

Bereken de stroomsterkte in R_1 en in R_2 .

- $U_1 = I_1 \cdot R_1 \rightarrow 36 = I_1 \cdot 6 \rightarrow I_1 = 6 \text{ A}$
- $U_2 = I_2 \cdot R_2 \rightarrow 30 = I_2 \cdot 3 \rightarrow I_2 = 10 \text{ A}$

Bereken de stroomsterkte in bron 1 en in bron 2.

- **K2** $\rightarrow I_{\text{bron 1}} = I_1 + I_2 \rightarrow I_{\text{bron 1}} = 6 + 10 = 16 \text{ A}$
- **K1** $\rightarrow I_{\text{bron 2}} = I_{\text{bron 1}} - I_2 \rightarrow I_{\text{bron 2}} = 16 - 10 = 6 \text{ A}$

Met de regels van Kirchhoff kunnen we voor iedere elektrische schakeling uitrekenen hoe de spanning zich verdeelt over de weerstanden, en hoe groot de stroomsterkte in iedere weerstand is. Als er drie of meer weerstanden zijn wordt het al snel een flinke rekenpartij, maar het is in principe te doen. Wiskundig komt het erop neer dat je lineaire vergelijkingen opstelt. Bijvoorbeeld:

$$y_1 = a \cdot x_1 + b \cdot x_2 + c \cdot x_3$$

$$y_2 = a \cdot x_1 + b \cdot x_2 + c \cdot x_3$$

y_1 y_2 zijn de spanningen van de spanningsbronnen 1 en 2

x_1 x_2 x_3 zijn de groottes van weerstanden 1, 2 en 3

a b c zijn de stroomsterktes in de weerstanden 1, 2 en 3

Als voorbeeld gaan we een gemengde schakeling met twee spanningsbronnen doorrekenen. Je zult zien dat dit te ingewikkeld is om zelf te bedenken. Dat wordt daarom ook niet van je verwacht. Maar je kunt de berekening wel volgen. Het is een goede oefening in het toepassen van wiskunde in de natuurkunde.

– gemengde schakeling –

In figuur 49 zie je een gemengde schakeling met twee bronnen.
 $U_{\text{bron 1}} = 30 \text{ V}$ en $U_{\text{bron 2}} = 6 \text{ V}$.

Stroomregels

$$K1 \rightarrow I_1 - I_{\text{bron 2}} - I_3 = 0$$

$$K2 \rightarrow I_2 + I_3 - I_{\text{bron 1}} = 0$$

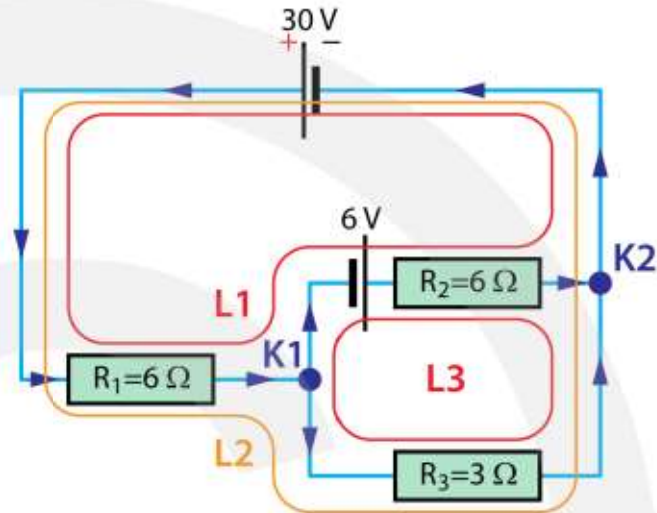
ook geldt $I_{\text{bron 1}} = I_1$

Spanningsregels

$$L1 \rightarrow U_{\text{bron 1}} - U_1 + U_{\text{bron 2}} - U_2 = 0$$

$$L2 \rightarrow U_{\text{bron 1}} - U_1 - U_3 = 0$$

$$L3 \rightarrow U_2 - U_{\text{bron 2}} - U_3 = 0$$



Figuur 49 Gemengde schakeling met twee bronnen.

Bereken de stroomsterkte door bron 1.

- **L3** $\rightarrow U_3 = U_2 - U_{\text{bron 2}}$
- **K2** $\rightarrow I_{\text{bron 1}} = I_2 + I_3 \rightarrow I_{\text{bron 1}} = \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3}$
- $I_{\text{bron 1}} = \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_2 - U_{\text{bron 2}}}{R_3} \rightarrow I_{\text{bron 1}} = U_2 \cdot \left(\frac{1}{6} + \frac{1}{3} \right) - \frac{6}{3} \rightarrow I_{\text{bron 1}} = \frac{1}{2} \cdot U_2 - 2$
- **L1** $\rightarrow U_2 = U_{\text{bron 1}} + U_{\text{bron 2}} - U_1 \rightarrow U_2 = 30 + 6 - I_1 \cdot 6 = 36 - I_{\text{bron 1}} \cdot 6 \quad (I_1 = I_{\text{bron 1}})$
- $I_{\text{bron 1}} = \frac{1}{2} \cdot (36 - I_{\text{bron 1}} \cdot 6) - 2 \rightarrow I_{\text{bron 1}} + 3 \cdot I_{\text{bron 1}} = \frac{36}{2} - 2 = 16$
- $4 \cdot I_{\text{bron 1}} = 16 \rightarrow I_{\text{bron 1}} = 4 \text{ A}$

Bereken de spanning over R_1 over R_2 en over R_3 .

- $U_1 = I_1 \cdot R_1 \rightarrow U_1 = 4 \cdot 6 = 24 \text{ V}$
- $U_2 = U_{\text{bron 1}} + U_{\text{bron 2}} - U_1 \rightarrow U_2 = 30 + 6 - 24 = 12 \text{ V}$
- $U_3 = U_2 - U_{\text{bron 2}} \rightarrow U_3 = 12 - 6 = 6 \text{ V}$

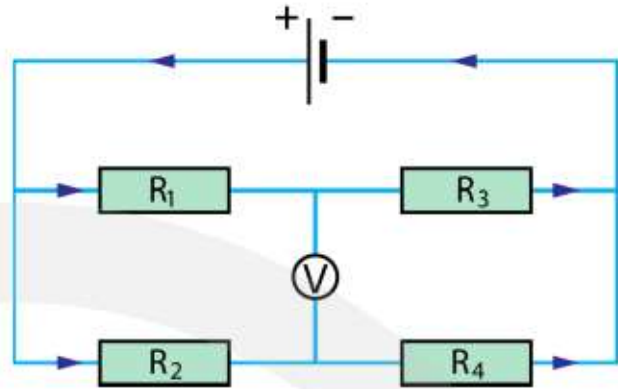
Bereken de stroomsterkte door R_1 door R_2 en door R_3 .

- $I_1 = U_1 / R_1 \rightarrow I_1 = 24 / 6 \rightarrow I_1 = 4 \text{ A}$
- $I_2 = U_2 / R_2 \rightarrow I_2 = 12 / 6 \rightarrow I_2 = 2 \text{ A}$
- $I_3 = U_3 / R_3 \rightarrow I_3 = 6 / 3 \rightarrow I_3 = 2 \text{ A}$

Wheatstonebrug

Charles Wheatstone (Engeland, 1802–1875) heeft in 1843 een methode ontwikkeld om nauwkeurig weerstand te meten. De schakeling die hij heeft bedacht heet de Wheatstonebrug. Zie figuur 50.

Figuur 50 Wheatstonebrug.



Stel we willen weerstand R_1 meten. Als deze weerstand erg klein is, bijvoorbeeld $0,10 \Omega$ kan dit niet rechtstreeks, omdat de weerstand van de aansluitdraden niet verwaarloosd mag worden. Om R_3 toch te bepalen wordt hij opgenomen in een stroomkring. Zie figuur 50. R_2 en R_4 zijn vaste weerstanden met een bekende waarde en R_3 is een variabele weerstand. In de schakeling is ook een voltmeter opgenomen.

De variabele weerstand wordt ingesteld, zodat de voltmeter nul aangeeft. Dit kan heel precies, omdat de voltmeter op zijn gevoeligste stand kan worden gezet. Dan geldt:

$$U_{\text{meet}} = 0 \rightarrow \frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4} \rightarrow R_1 = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_4}$$

Stel dat $R_2 = 10 \Omega$ en $R_4 = 1000 \Omega$. Bij $R_3 = 16 \Omega$ geeft de voltmeter nul aan. Dan volgt: $R_1 = 10 \cdot 16 / 1000 = 0,16 \Omega$.

Om deze formule te bewijzen gaan we de regels van Kirchhoff gebruiken. In figuur 51 zie je de schakeling met vier knooppunten $K1 - K4$ en vier lussen $L1 - L4$.

Stroomregels

$$K1 \rightarrow I_{\text{bron}} - I_1 - I_2 = 0$$

$$K2 \rightarrow I_3 + I_4 - I_{\text{bron}} = 0$$

$$K3 \rightarrow I_1 - I_3 = 0$$

$$K4 \rightarrow I_2 - I_4 = 0$$

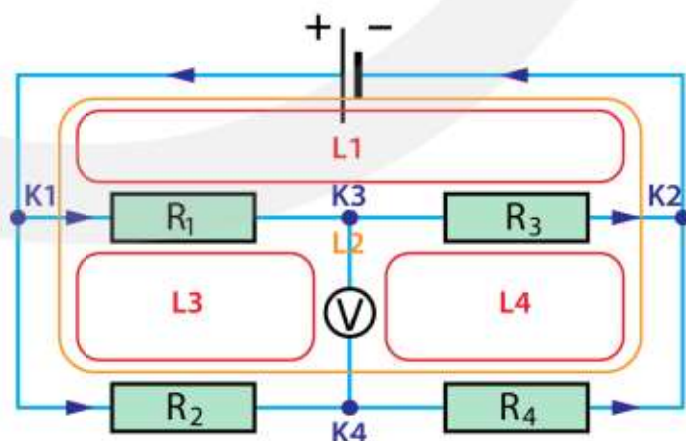
Spanningsregels

$$L1 \rightarrow U_{\text{bron}} - U_1 - U_3 = 0$$

$$L2 \rightarrow U_{\text{bron}} - U_2 - U_4 = 0$$

$$L3 \rightarrow U_1 - U_2 - U_{\text{meet}} = 0$$

$$L4 \rightarrow U_3 + U_{\text{meet}} - U_4 = 0$$



Figuur 51 Een wheatstonebrug heeft vier knopen $K1 - K4$ en vier lussen $L1 - L4$.

BEWIJS voor de liefhebber

- **L3** $\rightarrow U_1 = U_2$
- **L4** $\rightarrow U_3 = U_4$
- $\frac{U_1}{U_3} = \frac{U_2}{U_4}$
- $\frac{I_1 \cdot R_1}{I_3 \cdot R_3} = \frac{I_2 \cdot R_2}{I_4 \cdot R_4}$
- **K3** $\rightarrow I_1 = I_3$ en **K4** $\rightarrow I_2 = I_4$
- $\frac{I_1 \cdot R_1}{I_3 \cdot R_3} = \frac{I_2 \cdot R_2}{I_4 \cdot R_4} \rightarrow \frac{R_1}{R_3} = \frac{R_2}{R_4} \rightarrow R_1 = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_4}$

Met de regels van Kirchhoff kunnen we ook een algemene formule opstellen waarmee de spanning die de voltmeter aangeeft kan worden berekend. Er geldt:

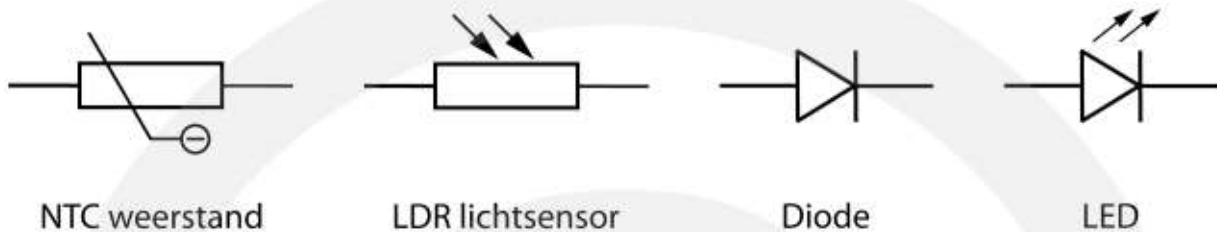
$$U_{\text{meet}} = U_{\text{bron}} \cdot \left(\frac{R_1}{R_1 + R_3} - \frac{R_2}{R_2 + R_4} \right)$$

BEWIJS voor de liefhebber

- **L1** $\rightarrow U_{\text{bron}} = U_1 + U_3 \rightarrow U_{\text{bron}} = I_1 \cdot R_1 + I_3 \cdot R_3$
- **K3** $\rightarrow I_1 = I_3$ geeft $U_{\text{bron}} = I_1 \cdot (R_1 + R_3) \rightarrow I_1 = \frac{U_{\text{bron}}}{R_1 + R_3}$
- $U_1 = I_1 \cdot R_1 = U_{\text{bron}} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_3}$
- **L2** $\rightarrow U_{\text{bron}} = U_2 + U_4 \rightarrow U_{\text{bron}} = I_2 \cdot R_2 + I_4 \cdot R_4$
- **K4** $\rightarrow I_2 = I_4$ geeft $U_{\text{bron}} = I_2 \cdot (R_2 + R_4) \rightarrow I_2 = \frac{U_{\text{bron}}}{R_2 + R_4}$
- $U_2 = I_2 \cdot R_2 = U_{\text{bron}} \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_4}$
- **L3** $\rightarrow U_{\text{meet}} = U_1 - U_2 \rightarrow U_{\text{meet}} = U_{\text{bron}} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_3} - U_{\text{bron}} \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_4}$
- $U_{\text{meet}} = U_{\text{bron}} \cdot \left(\frac{R_1}{R_1 + R_3} - \frac{R_2}{R_2 + R_4} \right)$

6.9 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. Zie figuur 52.

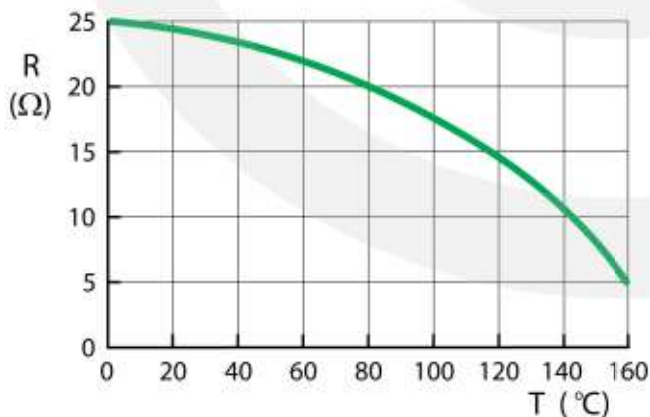


Figuur 52 Elektrotechnische symbolen voor bijzondere weerstanden.

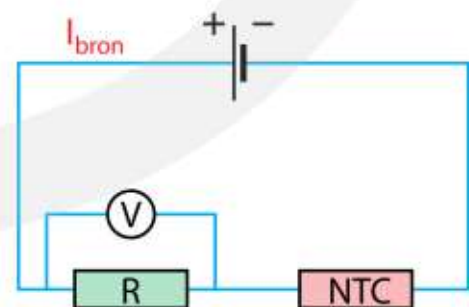
Negatieve Temperatuur Coëfficiënt weerstand (NTC)

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

In halfgeleiders geldt het omgekeerde, de weerstand neemt juist af bij hogere temperatuur. Zie figuur 53. De temperatuurcoëfficiënt is dan negatief, vandaar NTC. Ook voor NTC-materialen geldt dat de elektronen vaker en harder botsen, maar er is een ander effect dat sterker is. Bij NTC-materialen neemt het aantal elektronen dat deelneemt aan de geleiding sterk toe als de temperatuur stijgt, waardoor de weerstand afneemt.



Figuur 53 (R,T)-diagram van een NTC.



Figuur 54 NTC in een schakeling

Een NTC kan gebruikt worden als thermometer. Zie figuur 54. Hiervoor wordt een NTC-weerstand in serie geschakeld met een vaste weerstand R. We gaan ervan uit dat R niet (of heel weinig) afhankelijk is van de temperatuur. Als de temperatuur stijgt neemt R_{NTC} af. De stroom door het circuit wordt hierdoor groter, zodat de spanning over R ook groter wordt.

VOORBEELD NTC temperatuursensor

Een NTC-weerstand is opgenomen in een serieschakeling. Zie figuur 54. Van de NTC weerstand is het (R,T)-diagram gegeven in figuur 53. De spanningsbron geeft een spanning van 5,0 V. De weerstand R waarover de voltmeter staat is 30 Ω .

Bereken de spanning over R bij T = 80 °C

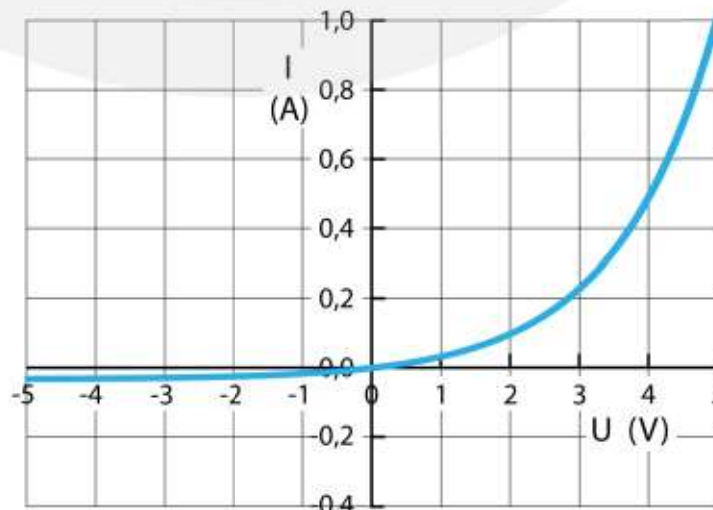
- aflezen in figuur 52 bij 80 °C: $R_{\text{NTC}} = 20 \Omega$
- serieschakeling: $R_{\text{tot}} = R + R_{\text{NTC}}$
- $R_{\text{tot}} = 30 + 20 = 50 \Omega$
- $U_{\text{bron}} = I_{\text{bron}} \cdot R_{\text{tot}} \rightarrow 5 = I_{\text{bron}} \cdot 50 \rightarrow I_{\text{bron}} = 0,10 \text{ A}$
- $U_R = I_{\text{bron}} \cdot R \rightarrow U_R = 0,10 \cdot 30 = 3,0 \text{ V}$

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, waardoor de weerstand afneemt. Hoe meer licht hoe kleiner de weerstand. Om een lichtsensor te krijgen wordt een LDR-weerstand in serie met een vaste weerstand geschakeld.

Diode

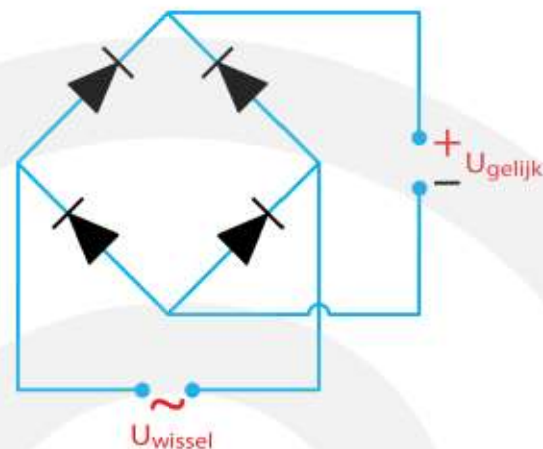
Een diode laat elektrische stroom maar in één richting door. Alleen in de **doorlaatrichting** kan er stroom door de diode gaan. In de tegenovergestelde richting, de **sperrichting**, wordt de stroom geblokkeerd. Zie figuur 55. In het symbool van een diode wordt de doorlaatrichting aangegeven met een pijl en de sperrichting met een streep. Een minimale **drempelspanning** van ongeveer één volt is nodig om de diode te openen. Zoals je ziet geldt voor een diode de wet van Ohm niet.



Figuur 55 Een diode blokkeert de stroom in één richting (de sperrichting) en laat de stroom in de andere richting door (de doorlaatrichting).

– diode als gelijkrichter –

Een diode wordt toegepast in een gelijkrichter. De spanning van het lichtnet is een wisselspanning van 230 V, maar een USB-adapter is 5,0 V gelijkspanning. Om van wisselspanning gelijkspanning te maken gebruik je de schakeling van figuur 56.



Figuur 56 Diodes worden gebruikt om van wisselspanning gelijkspanning te maken.

– Licht Emitterende Diode (LED) –

Met speciale halfgeleidende materialen kunnen diodes 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-lamp kan een rendement hebben van 50% en kan 20.000 uur licht geven voordat hij kapotgaat. 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. Zie figuur 57.



Figuur 57 LED's worden steeds vaker gebruikt voor verlichting en voor beeldschermen.

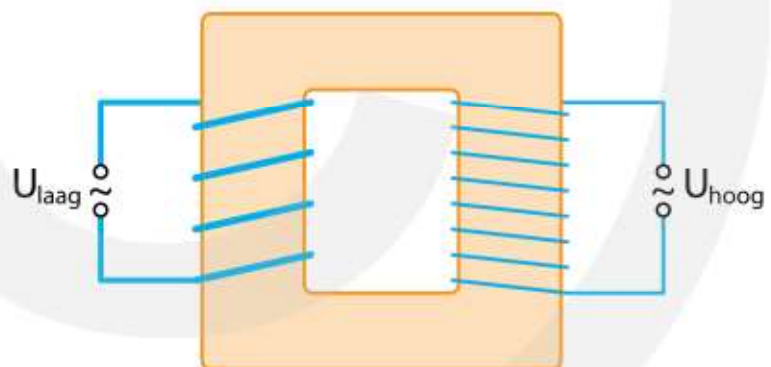
6.10 Elektriciteit in huis

Opwekking en transport van elektriciteit

Elektriciteit wordt opgewekt in een centrale, waarin warmte wordt omgezet in elektrische energie. De benodigde warmte is afkomstig uit het verbranden van fossiele brandstof, zoals kolen, olie of gas of uit een kernreactie. De warmte wordt gebruikt om water te verhitten tot stoom, waarmee een stoomturbine wordt aangedreven. De stoomturbine laat een spoel ronddraaien tussen de polen van een magneet. Hierdoor ontstaat wisselspanning.

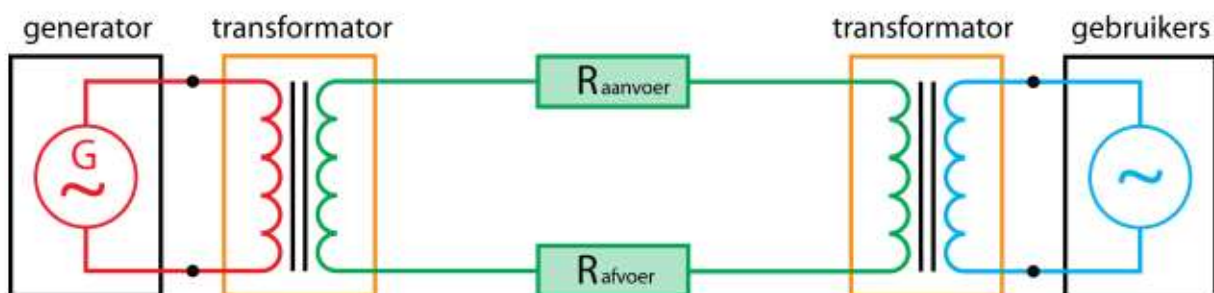
Om elektrische energie naar de gebruikers te brengen wordt de spanning vergroot naar bijvoorbeeld 150 kV of 380 kV. Hoe hoger de spanning is hoe minder verlies van elektrische energie. Om de spanning te vergroten (en later te verlagen) wordt een **transformator** gebruikt.

Een transformator bestaat uit twee spoelen om een ijzeren kern. Zie figuur 58. Het aantal wikkelingen is verschillend. In figuur 58 is het aantal wikkelingen aan de rechterkant twee keer zo groot als aan de linkerkant. Dit maakt dat de spanning aan de rechterkant U_{hoog} twee keer zo groot is als de spanning aan de linkerkant U_{laag} .



Figuur 58 Een transformator.

De spanning van de generator wordt eerst omhoog getransformeerd. In Nederland is er een 150 kV en een 380 kV net. Het transport gebeurt bovengronds met kabels aan elektriciteitsmasten. Bij een stad wordt de spanning omlaag gebracht naar 10 kV die met ondergrondse kabels naar transformatorhuisjes gaat. Daar wordt de spanning opnieuw verlaagd naar 230 V voor de huisinstallatie. Zie figuur 59.



Figuur 59 Transport van elektriciteit.

Voor het rendement van elektriciteitstransport geldt: $\eta = \frac{P_{\text{gebruikers}}}{P_{\text{centrale}}} \cdot 100\%$. Het

rendement neemt toe als de spanning bij het transport hoog is. In onderstaand voorbeeld zie je waarom het verlies in de kabels minder is bij het gebruik van hoogspanning.

VOORBEELD Elektriciteitstransport

Een centrale produceert 100 MW bij een spanning van 20 kV. Deze spanning wordt niet omhoog getransformeerd. De aanvoer- en afvoerkabels hebben een totale weerstand van $2,0 \Omega$.

Bereken de stroomsterkte door de kabels.

- $P_{\text{centrale}} = U_{\text{centrale}} \cdot I_{\text{centrale}} \rightarrow 1,0 \cdot 10^8 = 2,0 \cdot 10^4 \cdot I_{\text{centrale}} \rightarrow I_{\text{centrale}} = 5000 \text{ A}$

Bereken de spanning over de kabels.

- $U_{\text{kabels}} = I_{\text{kabels}} \cdot R_{\text{kabels}} \rightarrow U_{\text{kabels}} = 5000 \cdot 2,0 = 1,0 \cdot 10^4 \text{ V}$

Bereken het verliesvermogen in de kabels.

- $P_{\text{kabels}} = U_{\text{kabels}} \cdot I_{\text{kabels}} \rightarrow P_{\text{kabels}} = 1,0 \cdot 10^4 \cdot 5,0 \cdot 10^3 \rightarrow P_{\text{kabels}} = 5,0 \cdot 10^7 \text{ W}$

Bereken het rendement van het energietransport.

- $P_{\text{stad}} = P_{\text{centrale}} - P_{\text{kabels}} \rightarrow P_{\text{stad}} = 1,0 \cdot 10^8 - 5,0 \cdot 10^7 = 5,0 \cdot 10^7 \text{ W}$

- $\eta = \frac{P_{\text{stad}}}{P_{\text{centrale}}} \cdot 100\% \rightarrow \eta = \frac{5,0 \cdot 10^7}{1,0 \cdot 10^8} \cdot 100\% \rightarrow \eta = 50\%$

Om een hoger rendement te halen wordt de spanning omhoog gebracht naar 200 kV.

Bereken de stroomsterkte door de kabels.

- $P_{\text{centrale}} = U_{\text{centrale}} \cdot I_{\text{centrale}} \rightarrow 1,0 \cdot 10^8 = 2,0 \cdot 10^5 \cdot I_{\text{centrale}} \rightarrow I_{\text{centrale}} = 500 \text{ A}$

Bereken de spanning over de kabels.

- $U_{\text{kabels}} = I_{\text{kabels}} \cdot R_{\text{kabels}} = 500 \cdot 2,0 = 1,0 \cdot 10^3 \text{ V}$

Bereken het verliesvermogen in de kabels.

- $P_{\text{kabels}} = U_{\text{kabels}} \cdot I_{\text{kabels}} \rightarrow P_{\text{kabels}} = 1,0 \cdot 10^3 \cdot 5,0 \cdot 10^2 \rightarrow P_{\text{kabels}} = 5,0 \cdot 10^5 \text{ W}$

Bereken het rendement van het energietransport.

- $P_{\text{stad}} = P_{\text{centrale}} - P_{\text{kabels}} \rightarrow P_{\text{stad}} = 1,0 \cdot 10^8 - 5,0 \cdot 10^5 = 9,95 \cdot 10^7 \text{ W}$

- $\eta = \frac{P_{\text{stad}}}{P_{\text{centrale}}} \cdot 100\% \rightarrow \eta = \frac{9,95 \cdot 10^7}{1,0 \cdot 10^8} \cdot 100\% \rightarrow \eta = 99,5\%$

Draden waarmee de stroom het huis binnenkomt

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**. 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 fasedraden 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 worden afgeschakeld. Er is ook een hoofdzekering die de elektrische installatie uitzet als er teveel stroom loopt.



Figuur 60 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 61 kWh-meter

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 62 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 63 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 64 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 65 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 66 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 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 67 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 rand-aarde aangebracht, die in verbinding staat met de aardleiding
- bij niet-geaarde stopcontacten is deze voorziening niet aangebracht
- stopcontacten zijn parallel geschakeld



Figuur 68 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.