

6 Elektriciteit

vwo

6.0 Inleiding

Aan het eind van de 17^e eeuw heeft Newton de wetten opgesteld waarmee de beweging van alle voorwerpen kan worden berekend. Op dat moment is daar niets meer aan toe te voegen, waardoor natuurkundigen zich gaan toeleggen op andere verschijnselen, zoals warmte, elektriciteit en magnetisme.

Een belangrijke stap wordt gezet door Pieter van Musschenbroek (1692–1761) uit Leiden die 1745 de "Leidse fles" uitvindt waardoor systematisch onderzoek aan elektriciteit mogelijk wordt. Een Leidse fles is de voorloper van de condensator waarin je elektriciteit kunt opslaan. In Amerika laat **Benjamin Franklin** (1706–1790) in 1750 tijdens onweer bliksem inslaan op vliegers en vergelijkt dit met de vonken die je met een Leidse fles kan opwekken. Franklin ziet elektriciteit als een soort vloeistof en ontdekt dat er positieve en negatieve elektriciteit bestaat en dat elektrische lading nooit ontstaat of verdwijnt.



Benjamin Franklin

De hoeveelheid elektrische lading die je in een Leidse fles kan opslaan is beperkt en vandaar dat wordt gezocht naar manieren om elektriciteit voor langere perioden te laten stromen. Dit lukt uiteindelijk dankzij de uitvinding van **Alessandro Volta** (1745 – 1827) die door middel van chemische reacties de eerste batterij maakt die bekend staat als de zuil van Volta. Om tot zijn uitvinding te komen maakt Volta gebruik van het werk van **Luigi Galvani** (1737–1798) die elektrische verschijnselen in dieren onderzoekt.



Alessandro Volta

Zo ontdekt Galvani in 1780 dat de spieren in kikkerpoten samen-trekken als ze elektrisch worden gestimuleerd. De biologische benadering van Galvani en de natuurkundige benadering van Volta leidt tot felle discussies maar is erg waardevol voor de verdere ontwikkeling. Want in 1775 ontleedt John Hunter het elektrische orgaan van sidderalen en toont hij aan dat dit bestaat uit een groot aantal zuilen van op elkaar gestapelde gebieden gescheiden door een vloeistof. Dit brengt Volta op het idee om het elektrische orgaan na te bootsen met op elkaar gestapelde plaatjes koper en zink, gescheiden door een zoutoplossing. In 1799 lukt dit en is de eerste batterij een feit.



Luigi Galvani

Hans Christian Oersted (1777–1851) ontdekt in 1820 bij toeval dat een kompasnaald van richting verandert als je stroom door een draad laat lopen. Hiermee toont hij aan dat elektriciteit en magnetisme met elkaar te maken hebben. Een magnetische kracht kan worden opgewekt met elektrische stroom. Een verklaring kan hij niet geven, maar zijn ontdekking trekt de aandacht van **André-Marie Ampère** (1775–1836) die het verschijnsel nauwkeurig gaat onderzoeken.



Hans Christian Oersted

Ampère ziet dat twee stroomvoerende draden elkaar aantrekken of afstoten en dat deze kracht recht evenredig is met de lengte van de draad en de grootte van de stroomsterkten en omgekeerd evenredig met de afstand. Dit lijkt op de elektrische kracht, zoals gemeten door **Charles-Augustin de Coulomb** (1736–1806) met de door hem uitgevonden torsiebalans. Twee bollen met tegengestelde lading trekken elkaar aan en deze kracht is recht evenredig met de lading en omgekeerd evenredig met het kwadraat van de afstand.



Charles-Augustin de Coulomb



André-Marie Ampère

In die tijd is het onduidelijk op welke manier spanning en stroom met elkaar te maken hebben, maar dat verandert in 1826 door het werk van **Georg Ohm** (1789–1854). Hij laat stroom lopen door een draad en ontdekt dat de stroomsterke kleiner wordt als de lengte toeneemt. Ook ziet hij dat een dikke draad een grotere stroomsterkte geeft en dat het soort metaal een rol speelt. Hij toont aan dat er een recht evenredig verband is tussen de spanning en de stroomsterkte. De evenredigheidsconstante is de weerstand met als eenheid ohm (Ω). Hij stelt de wet op die zijn naam draagt, maar pas tien jaar later wordt zijn werk serieus genomen.



Georg Ohm

De ontdekking van de elektriciteit brengt ook technologische vooruitgang. **Michael Faraday** (1791–1867) ontdekt hoe je met elektriciteit iets kunt laten bewegen en bouwt in 1821 de eerste elektromotor. Ook ontdekt hij hoe uit beweging elektriciteit kun opwekken. In 1840 ontdekt **James Prescott Joule** (1818–1889) dat de spanning keer de stroomsterkte gelijk is aan de hoeveel warmte die een elektrische weerstand per seconde produceert. Als de temperatuur van een draad hoog genoeg is gaat het licht uitstralen. In 1879 brandt de eerste gloeilamp gemaakt door **Thomas Edison** (1847–1931). Edison heeft de gloeilamp niet uitgevonden, maar de serieproductie van gloeilampen stimuleert het aanleggen van een elektriciteitsnet.



Michael Faraday

Inhoud

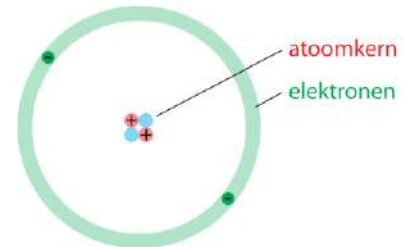
6.1	Lading	5
	– Elektrische lading	5
	– Elektrische krachten	5
6.2	Spanning en stroom	7
	– Elektrische spanning	7
	– Spanningsbron	7
	– Spanningsbronnen in serie	8
	– Condensator	8
	– Elektrische stroom	9
	– Geleiders, halfgeleiders en isolators	9
	– Atoomtheorie van elektrische geleiding in vaste stoffen	9
	– Geleiding in vloeistoffen (elektrolyten)	10
	– Geleiding in gassen	10
6.3	Stroomkring	11
	– Stroomkring en stroomrichting	11
	– Stroomsterkte	12
	– Het (stroomsterkte, tijd)-diagram	12
	– Het (lading, tijd)-diagram	12
	– Het meten van de spanning en van de stroomsterkte	13
6.4	Weerstand	15
	– De wet van Ohm	15
	– Het (stroomsterkte, spanning)-diagram	15
	– De weerstand van een draad	16
	– Invloed van de temperatuur op de soortelijke weerstand	17
6.5	Serieschakeling en parallelschakeling	18
	– Serieschakeling	18
	– Parallelschakeling	19
	– Gemengde schakeling	20
	– Wheatstonebrug	22
6.6	Energie, vermogen en rendement	23
	– Het vermogen	23
	– De wet van Joule	23
	– Gebruik van elektrische energie	24
	– Rendement	24
	– Opslag van elektrische energie	25
6.7	Variabele weerstand en spanningsdeler	28
	– Variabele weerstand	28
	– Spanningsdeler	28

6.8	Speciale componenten	30
	– Positieve Temperatuur Coëfficiënt weerstand (PTC)	30
	– Negatieve Temperatuur Coëfficiënt weerstand (NTC)	30
	– LDR lichtsensor	31
	– Diode	31
	– Licht Emitterende Diode (LED)	31
	– Elektrotechnische symbolen	32
6.9	Elektriciteit in huis	33
	– Opwekking en transport van elektriciteit	33
	– Draden waarmee de stroom het huis binnenkomt	34
	– Huisaansluitkast met de hoofdschakelaar en de hoofdzekering	35
	– kWh-meter	35
	– Groepenkast met groepen	35
	– Zekeringen (smeltveiligheid)	35
	– Aardlekschakelaar	36
	– Draden in huis	36
	– Schakelaars	37
	– Stopcontacten	37
	– Gevaarlijke situaties	37
6.10	Samenvatting	38
	– Grootheden en eenheden	38
	– Weten	38
	– Formules	39
	– Figuren	40

6.1 Lading

Elektrische lading

Atomen hebben een kern met protonen en neutronen en daaromheen elektronen. De elektronen en protonen blijven bij elkaar omdat ze beide elektrische lading hebben. Protonen hebben een positieve lading en elektronen een negatieve lading en dit zorgt ervoor dat ze elkaar aantrekken en een atoom vormen. Door elektronen uit te wisselen of te delen kunnen atomen chemische bindingen aangaan waardoor moleculen of kristallen ontstaan.



Figuur 1 De bouw van een atoom.

Elektrische lading heeft als symbool hoofdletter of kleine letter **Q of q** en de eenheid van elektrische lading is **Coulomb (C)**. Omdat protonen en elektronen niet kunnen ontstaan of verdwijnen is er **behoud van lading**. Een voorwerp is neutraal als het evenveel protonen als elektronen bevat. Bij een overschot aan elektronen heeft een voorwerp een negatieve lading en bij een tekort aan elektronen een positieve lading. Lading komt niet vrij in de natuur voor maar wordt altijd "gedragen" door een deeltje. Dragere van lading worden **ladingdragers** genoemd. Protonen en elektronen zijn de kleinste ladingdragers die stabiel zijn en in de natuur voorkomen.

**Elektrische lading heeft het symbool q of Q en heeft als eenheid coulomb (C).
Elektrische lading kan niet ontstaan en kan niet verdwijnen.**

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.

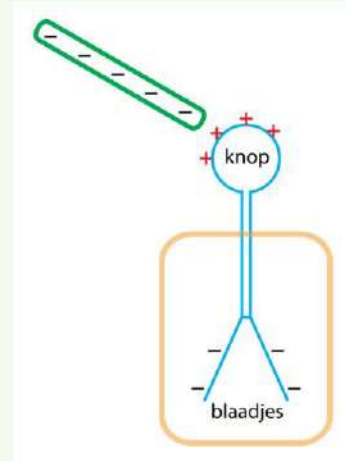
positieve lading stoot positieve lading af	+	$\leftarrow \rightarrow$	+
negatieve lading stoot negatieve lading af	-	$\leftarrow \rightarrow$	-
positieve lading trekt negatieve lading aan	+	$\rightarrow \leftarrow$	-
negatieve lading trekt positieve lading aan	-	$\rightarrow \leftarrow$	+

Voorwerpen kunnen een elektrische lading krijgen 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 de 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** is dit effect zichtbaar.

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 2.

Zodra de staaf weggaat verdwijnt de afstotende kracht en stromen de elektronen terug naar de knop. De blaadjes stoten elkaar dan niet meer af. Maar als je de knop aanraakt met de staaf springen er elektronen over van de staaf naar de knop, waardoor de knop geen positieve lading meer heeft. De elektronen in de blaadjes kunnen nu niet meer terug naar de knop, waardoor de blaadjes elkaar blijven afstoten.

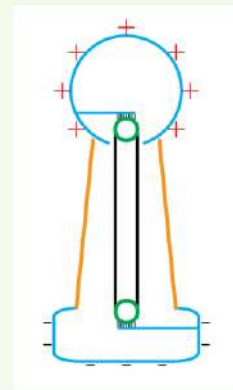


Figuur 2 Elektroscop.

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 lading en de andere kant een negatieve lading.

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



Figuur 3 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.

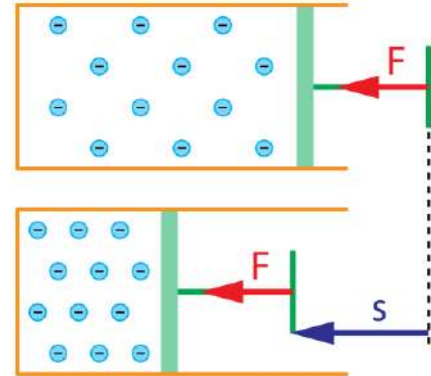
De kleinste mogelijke lading die voorkomt is de lading van een proton en van een elektron. Dit is de **elementaire ladingsquantum e** , en heeft een grootte van $1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. De letter e wordt gebruikt om de elementaire lading aan te geven. De lading van het proton is $+e$ en de lading van het elektron is $-e$.

$$\text{elementair ladingsquantum } e = 1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

6.2 Spanning en stroom

Elektrische spanning

Deeltjes met dezelfde soort lading stoten elkaar af. Als je ze naar elkaar toe wil brengen moet je arbeid verrichten. Deze arbeid verdwijnt niet, maar blijft aanwezig als elektrische energie. In figuur 4 oefent je een kracht uit om elektronen naar elkaar toe te duwen. De arbeid die je verricht wordt omgezet in elektrische energie. Deze elektrische energie komt vrij als de afstand tussen de elektronen toeneemt.



Figuur 4 Elektrische energie.

Stel dat je arbeid verricht om geladen deeltjes bij elkaar te brengen. Je creëert hiermee een **spanning** die je kunt vergelijken met de druk van een gas. Deze spanning heeft symbool U en heeft als eenheid volt (V). De arbeid die je hebt verricht is gelijk aan de verandering van de elektrische energie ΔE . Om de spanning te berekenen deel ΔE door de lading Q .

Spanning heeft het symbool U . De eenheid van spanning is de volt (V).

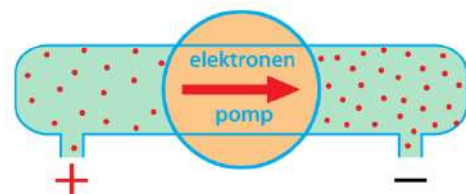
Voor elektrische energie geldt:

$$U = \frac{\Delta E_{\text{el}}}{q} \quad \leftrightarrow \quad \Delta E_{\text{el}} = q \cdot U$$

- U is de spanning in volt (V)
- ΔE_{el} is de verandering van elektrische energie in joule (J)
- q is de lading in coulomb (C)

Spanningsbron

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

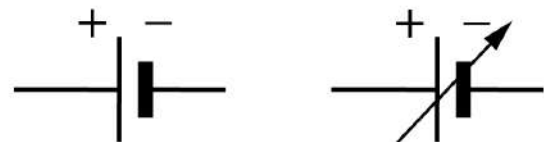


Figuur 5 Een spanningsbron voorgesteld als elektronenpomp.

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 elektronen van de bol via de transportband naar beneden verplaatst, zie figuur 3. Met een **batterij** kan ook een spanning worden aangelegd. Een batterij bestaat uit chemische cellen. Alkaline batterijen hebben een spanning van 1,5 V volt. Als de chemische reacties zijn uitgewerkt kan de batterij geen spanning of stroom meer leveren. Een (elektrische) **adapter** wordt aangesloten op het lichtnet. In een adapter zit een transformator die de netspanning van 230 V omzet naar een lagere spanning van bijvoorbeeld 5,0 V. Bij een **variabele spanningsbron** kan de spanning worden ingesteld, bijvoorbeeld tussen 0 en 30 V. Een spanningsbron geef je met de volgende symbolen aan.

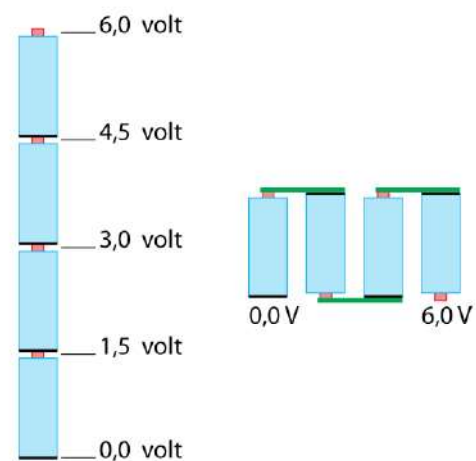
Figuur 6 Symbolen voor een spanningsbron. Links vaste spanning, rechts variabele spanning.



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 zo.

In Europa heeft het elektriciteitsnet een spanning van **230 V**. De netspanning is een wisselspanning. Honderd keer per seconde keren de pluspool en de minpool om. Omdat de cyclus van plus naar min 50 keer per seconde wordt doorlopen heeft de wisselspanning een frequentie van **50 Hz**.



Figuur 7 Spanningsbronnen in serie.

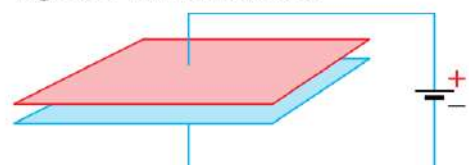
De spanning van het lichtnet is 230 volt en wisselt 50 keer per seconde van plus naar min en 50 keer per seconde van min naar plus.

Condensator

Elektrische energie kan worden opgeslagen in een **condensator**. Een condensator bestaat uit twee metalen platen die vlak naast elkaar liggen. Tussen de metaalplaten zit een stof waar elektronen niet doorheen kunnen. Als je een condensator aansluit op een spanningsbron, met de bovenste plaat aan pluspool en de onderste plaat aan de minpool, stromen elektronen van de bovenste plaat naar de onderste plaat. De bovenste plaat krijgt hierdoor een positieve lading en de onderste plaat een negatieve lading.

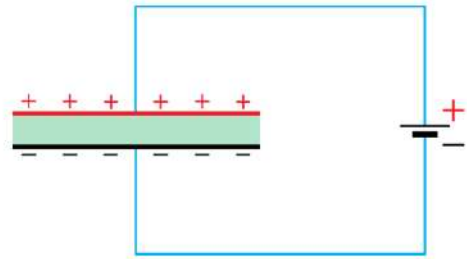


Figuur 8 Een condensator.



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. Op een bepaald moment houdt het pompen van elektronen op en is de condensator helemaal opgeladen. Zie figuur 10.



Figuur 10 Een opgeladen condensator.

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. 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 stroom is tegengesteld aan de bewegingsrichting van de elektronen.

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 vrije 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

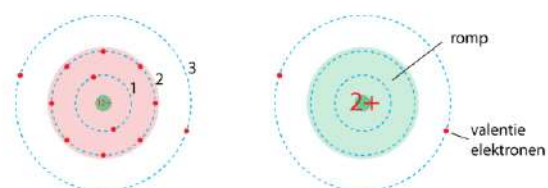


Figuur 11 Koper is een goede geleider en wordt daarom gebruikt in elektriciteitsdraden.

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 gemaakt en met de manier waarop deze atomen zijn gestapeld.

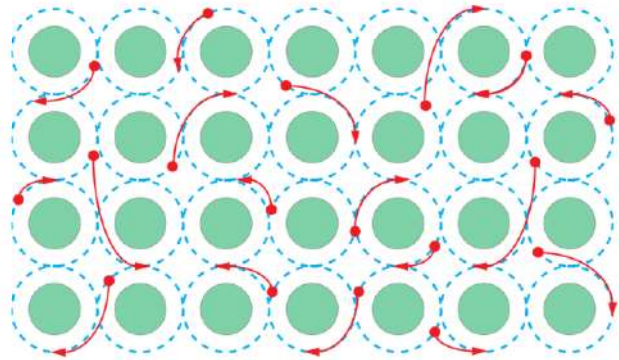
Alle metalen zijn elektrische geleiders. Om dit te begrijpen nemen we als voorbeeld het magnesium atoom. Zie figuur 12. Bij het magnesium atoom kost het veel energie om een elektron uit de eerste en tweede schil te verwijderen. Om een elektron uit de derde schil te verwijderen



Figuur 12 Het magnesiumatoom

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 zitten de atomen 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 losgekomen valentie elektronen zich zoals gasmoleculen. We spreken daarom van een **elektronengas**. Een verschil tussen losgekomen **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

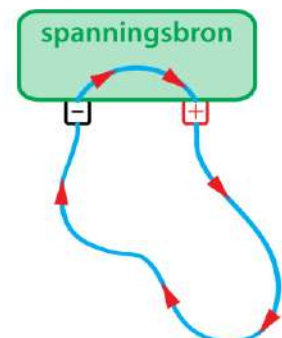
Een gas bestaat voor het overgrote deel uit neutrale atomen of moleculen, zodat er onder normale omstandigheden geen vrij bewegende ladingdragers zijn en gas dus een isolator is. Maar in een gas zijn niet alle atomen of moleculen neutraal. Doordat ze voortdurend tegen elkaar botsen zijn er altijd wel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

De elektrische geleiding van een gas kan veranderen wanneer dit gas zich tussen twee elektrisch geladen 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.

6.3 Stroomkring

Stroomkring en stroomrichting

Om elektrische energie continue te kunnen gebruiken moet je een **stroomkring (elektrisch circuit)** maken waarin de elektronen rondgaan. In de stroomkring moet je een spanningsbron opnemen die de elektronen bij ieder rondje van energie voorziet. De stroom gaat buiten de spanningsbron van de pluspool naar de minpool en de elektronen gaan van – naar +. Binnen in de spanningsbron worden de elektronen naar de minpool gepompt, waarna ze een nieuw rondje kunnen maken.

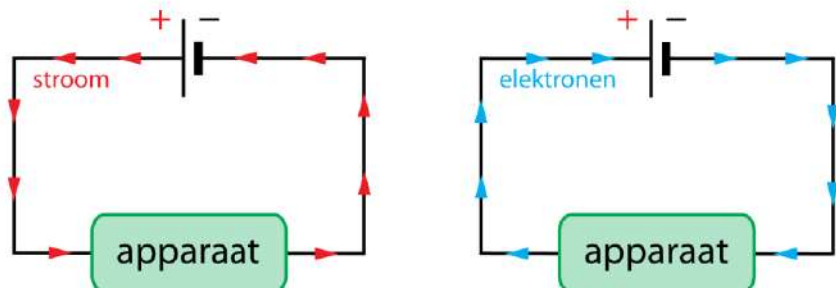


Figuur 14 Stroomkring.

Om een elektrisch apparaat te laten werken sluit je het aan op een spanningsbron. Het apparaat vormt een **weerstand** in de stroomkring. Er wordt arbeid op de elektronen verricht om ze door het apparaat te laten gaan. Deze arbeid is de elektrische energie die het apparaat opneemt om te kunnen werken. Als de weerstand groot is moet er veel spanning worden aangelegd om in één seconde één coulomb lading door de weerstand te laten stromen. Zie figuur 15.

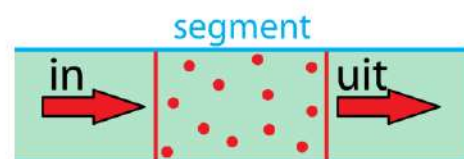
Bij veel weerstand is er veel spanning nodig is om één coulomb lading per seconde door een apparaat te laten gaan.

Figuur 15 In een stroomkring loopt de elektrische stroom van plus naar min (links). De elektronen lopen andersom, van min naar plus (rechts).

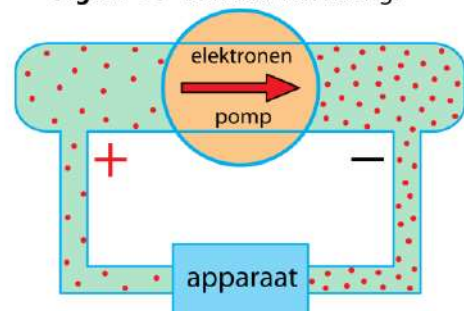


Protonen en elektronen kunnen niet ontstaan of verdwijnen. Er is **behoud van elektrische lading**. Dit betekent dat als we het circuit opdelen in segmenten, voor ieder segment het aantal elektronen dat per seconde instroomt gelijk is aan het aantal dat per seconde uitstroomt. Het aantal elektronen in het segment verandert niet. Zie figuur 16.

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 17.



Figuur 16 Behoud van lading.



Figuur 17 Een stroomkring.

Stroomsterkte

De stroomsterkte is de hoeveelheid lading die per seconde stroomt.

De eenheid van stroomsterkte is ampère (A). Eén ampère (A) = één coulomb per seconde (C/s).

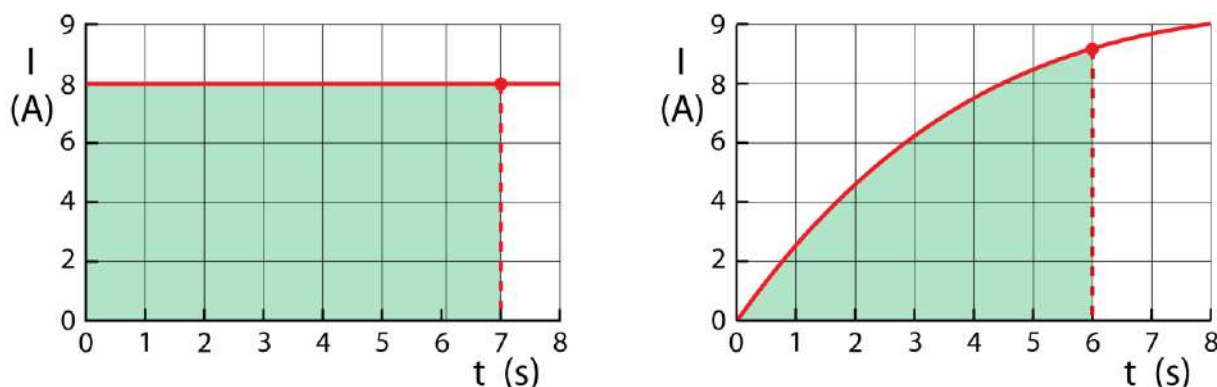
$$I = \frac{Q}{t}$$

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

Het (stroomsterkte, tijd)-diagram

In een (stroomsterkte, tijd)-diagram, (**I, t**)-**diagram**, kun je de stroomsterkte aflezen op een bepaald tijdstip. Op de verticale as staat de stroomsterkte en op de horizontale as de tijd. Zie figuur 18. Omdat $Q = I \cdot t$ is de hoeveelheid gepasseerde lading gelijk aan de oppervlakte onder de (I, t)-grafiek. Als de (I, t)-grafiek niet recht is zijn er twee manieren om dit te doen:

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



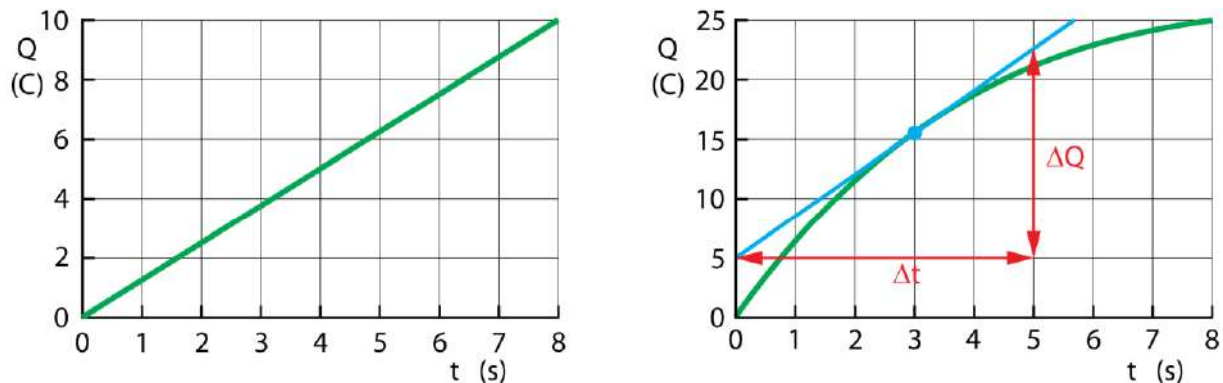
Figuur 18 In een (I, t)-diagram is de stroomsterkte uitgezet tegen de tijd. De oppervlakte onder de grafiek is de lading.

De oppervlakte onder de (I, t)-grafiek tussen t_1 en t_2 is gelijk aan de gepasseerde 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 19.

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 19 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 dat moment.

Het meten van de spanning en van de stroomsterkte

Om de spanning en de stroomsterkte te meten heb je een **spanningsmeter** en een **stroommeter** nodig. Het is gebruikelijk om een apparaat aan te duiden als **een weerstand**. Je spreekt dan 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.

Stroomsterkte 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 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 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 ook nul.

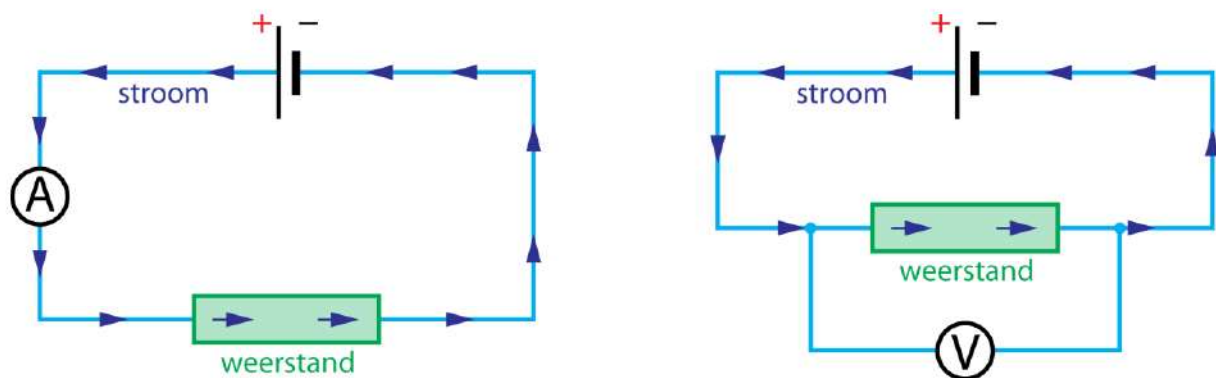
De weerstand van een stroommeter is nul zodat er geen spanning over een stroommeter staat.

– 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 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.

De weerstand van een spanningsmeter is oneindig groot zodat er geen stroom door een spanningsmeter gaat.

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 20.



Figuur 20 Stroommeter in de kring. Spanningsmeter over een weerstand.

Bij goedkope stroom- en spanningsmeter moet je om nauwkeurig te kunnen meten handmatig het meetbereik kiezen. Bij duurdere meters gebeurt dit automatisch. Een multimeter kan spanning, stroom en weerstand meten. Bij **analoge meters** geeft een wijzer de stroomsterkte en de spanning aan. Bij **digitale meters** verschijnt een getal. Het aantal cijfers geeft de nauwkeurigheid aan. De goedkope digitale multimeter van figuur 21 heeft maar drie cijfers.



Figuur 21
Links, stroommeter met drie meetbereiken.
Midden, spanningsmeter met drie meetbereiken.
Rechts, multimeter met een groot aantal mogelijkheden.

6.4 Weerstand

De wet van Ohm

Elektronen die door een stof bewegen ondervinden weerstand omdat ze voortdurend tegen atoomkernen en 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. Voor de spanning, de stroomsterkte en de weerstand geldt de wet van Ohm:

$$\text{De wet van Ohm.} \quad U = I \cdot R$$

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

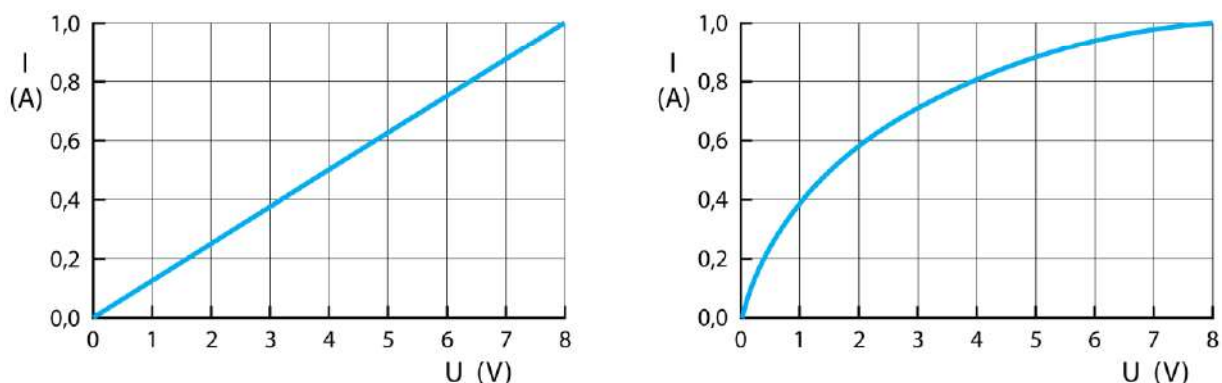
Weerstand heeft het symbool R (Engels: resistance).
De eenheid van weerstand is ohm Ω (Griekse letter omega).

Als de weerstand groot is moet je veel spanning aanleggen om een grote stroomsterkte te krijgen. Bij een lage weerstand krijg je met weinig spanning een grote stroomsterkte. 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 22. 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 stroomsterkte recht evenredig is met de spanning. De (I, U)-grafiek is dan een rechte lijn door de oorsprong.



Figuur 22 Links: (I, U)-diagram van een ohmse weerstand en rechts van een NIET ohmse weerstand.

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 en het **soort metaal**. Deze invloeden geven de volgende formule:

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

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

Voor een cilindervormige draad geldt voor **de oppervlakte van de doorsnede A**:

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

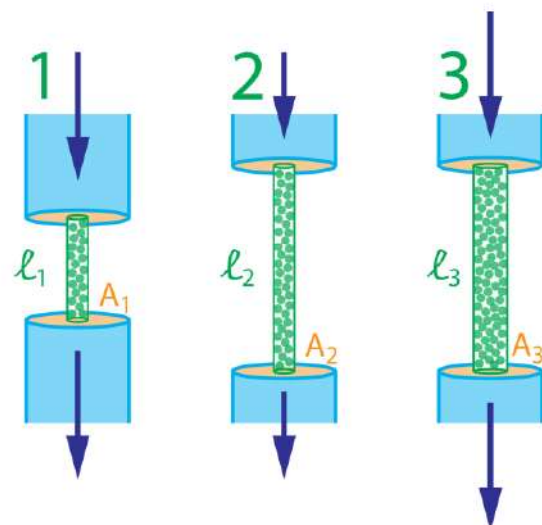
- A is de oppervlakte van de doorsnede (m^2). Zie figuur 23.
- r is de straal in meter (m).



Figuur 23 Doorsnede A en lengte ℓ van een cilindervormige draad.

De soortelijke weerstand ρ is een stoffeigenschap. Koper heeft een lage waarde van $17 \cdot 10^{-9} \Omega \text{ m}$. Kunststoffen zoals perspex en teflon hebben een grote waarde $\rho \approx 10^{20} \Omega \text{ m}$. De verhouding tussen de soortelijke weerstand van het beste en slechtste geleidende materiaal is 10^{28} , waarmee de variatie in ρ tot de grootste hoort die er in de natuurkunde te vinden zijn. Ter vergelijking, de diameters van de kleinste bacterie 10^{-7} m en de Melkweg 10^{21} m hebben dezelfde verhouding.

Om de formule van de weerstand van een draad 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 24. 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.



Figuur 24 Elektronen stromen door een metaal draad als gas door een buis.

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 de stof. 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 deze zijn gestapeld.

VOORBEELD koperdraad

Een koperdraad met een lengte van 300 m heeft een weerstand van 6,0 Ω .

Bereken de diameter van de koperdraad

- $R = 6,0 \Omega$ | $\ell = 300 \text{ m}$ | $A = \dots \text{m}^2$
- $\rho = \frac{R \cdot A}{\ell}$ met $\rho = 17 \cdot 10^{-9} \Omega \cdot \text{m}$
- $17 \cdot 10^{-9} = \frac{6 \cdot A}{300} \rightarrow A = 17 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{300}{6} = 8,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$
- $A = \pi \cdot r^2 \rightarrow 8,5 \cdot 10^{-7} = \pi \cdot r^2 \rightarrow r = 5,20157 \cdot 10^{-4} \text{ m}$
- $d = 2 \cdot r \rightarrow d = 2 \cdot 5,20157 \cdot 10^{-4} = 1,04031 \cdot 10^{-3} = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

Invloed van de temperatuur op de soortelijke weerstand

De soortelijke weerstand is afhankelijk van de temperatuur. Dit heeft twee oorzaken. Als de temperatuur toeneemt wordt de gemiddelde kinetische energie van de elektronen groter. Ze botsen dan vaker en harder tegen de atoomkernen en tegen elkaar, waardoor hun gemiddelde snelheid afneemt. De soortelijke weerstand neemt hierdoor toe. Dit is de reden waarom bij alle metalen de soortelijke weerstand toeneemt als de temperatuur hoger wordt.

Maar er is nog een tweede effect. Bij een hogere temperatuur wordt het aantal elektronen dat meedoet aan de geleiding groter. Dit veroorzaakt een afname van de soortelijke weerstand als de temperatuur hoger wordt. Bij metalen is dit tweede effect niet merkbaar, maar bij halfgeleiders juist wel. Halfgeleiders hebben dus de bijzondere eigenschap dat de weerstand afneemt als de temperatuur hoger wordt.

PTC en NTC weerstanden

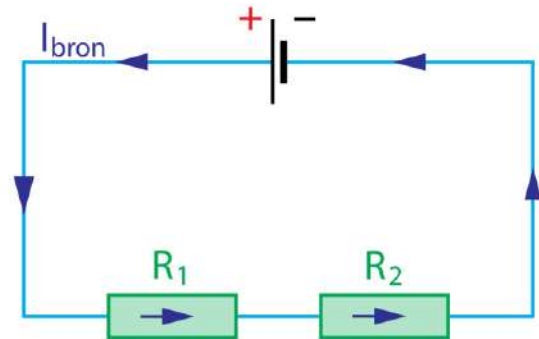
De soortelijke weerstand van metaal neemt toe als de temperatuur toeneemt. Ze hebben een **positieve temperatuurcoëfficiënt (PTC)** en worden daarom PTC-weerstanden genoemd.

Halfgeleiders, zoals silicium, germanium en grafiet krijgen een lagere weerstand bij hogere temperatuur. Ze hebben een **negatieve temperatuurcoëfficiënt (NTC)** en worden NTC-weerstanden genoemd. De toename van de elektronenconcentratie neemt exponentieel toe met de temperatuur en overschaduwet bij halfgeleiders 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 beide weerstanden R_1 en R_2 . Dit noemen we een **serieschakeling**. In een serieschakeling is de stroomsterkte door de weerstanden hetzelfde. Zie figuur 25. De spanning verdeelt zich over de twee weerstanden. De grootste weerstand krijgt de meeste spanning.



Figuur 25 Serieschakeling.

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

In serie geschakelde weerstanden veroorzaken samen de hinder die elektronen onder vinden 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:

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

- 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)

BEWIJS voor twee weerstanden in serie

- $U_1 = I_1 \cdot R_1$ en $U_2 = I_2 \cdot R_2$
- $U_{\text{tot}} = U_1 + U_2 \rightarrow U_{\text{tot}} = I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2$
- $I_{\text{tot}} = I_1 = I_2 \rightarrow U_{\text{tot}} = I_{\text{tot}} \cdot (R_1 + R_2) \rightarrow R_{\text{tot}} = R_1 + R_2$

VOORBEELD serieschakeling

Een spanningsbron levert een spanning van 6,0 V over een serieschakeling van twee weerstanden R_1 en R_2 . Zie figuur 25. $R_1 = 30 \Omega$ en $R_2 = 20 \Omega$.

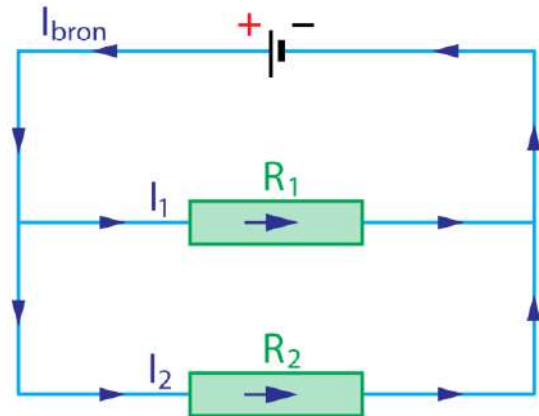
Bereken de spanningen over R_1 en over R_2 .

- $R_{\text{tot}} = R_1 + R_2 \rightarrow R_{\text{tot}} = 30 + 20 = 50 \Omega$
- $U_{\text{tot}} = I_{\text{tot}} \cdot R_{\text{tot}} \rightarrow 6 = I_{\text{tot}} \cdot 50 \rightarrow I_{\text{tot}} = \frac{6}{50} = 0,12 \text{ A}$

- $I_{\text{tot}} = I_1 = I_2 = 0,12 \text{ A}$
- $U_1 = I_1 \cdot R_1 \rightarrow U_1 = 0,12 \cdot 30 = 3,6 \text{ V}$
- $U_2 = I_2 \cdot R_2 \rightarrow U_2 = 0,12 \cdot 20 = 2,4 \text{ V}$
- controle $U_1 + U_2 = 3,6 + 2,4 = 6,0 \text{ V}$ klopt

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 26. Een deel van de stroom gaat door weerstand 1 en de rest door weerstand 2. Door de kleinste weerstand gaat de meeste stroom.



Figuur 26 Parallelschakeling.

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

Bij twee parallel geschakelde weerstanden zijn er twee routes voor de elektronen. De **totale weerstand** is hierdoor 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. Bij een parallelschakeling geldt voor de totale weerstand:

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

- R_{tot} is de totale weerstand (de vervangingsweerstand) in ohm (Ω)
- R_1 en R_2 zijn de parallel-geschakelde weerstanden in ohm (Ω)

BEWIJS voor twee weerstanden parallel

- $U_1 = I_1 \cdot R_1$ en $U_2 = I_2 \cdot R_2$
- $I_{\text{tot}} = I_1 + I_2 \rightarrow I_{\text{tot}} = \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2}$
- $U_{\text{tot}} = U_1 = U_2 \rightarrow I_{\text{tot}} = U_{\text{tot}} \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \rightarrow \frac{1}{R_{\text{tot}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$

VOORBEELD parallelschakeling

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

Bereken de stroomsterkten door R_1 en door R_2

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

Bereken de totale weerstand.

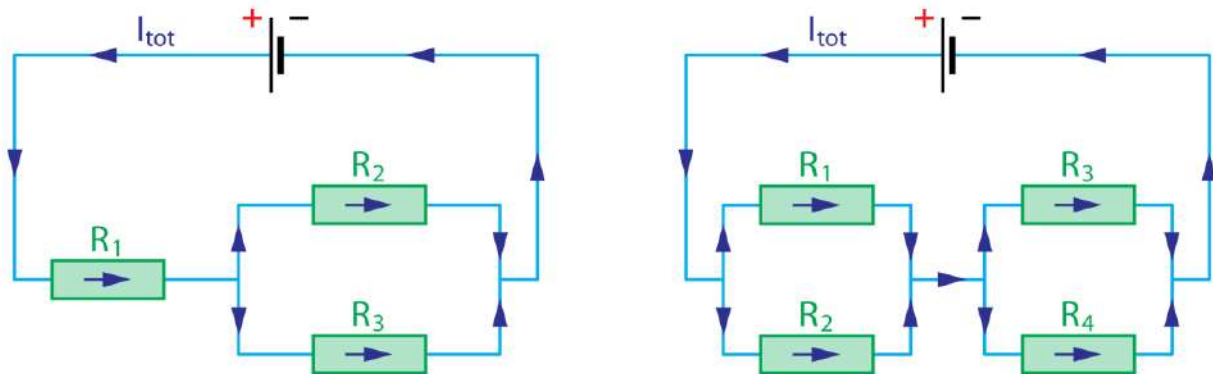
- $\frac{1}{R_{\text{tot}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \rightarrow \frac{1}{R_{\text{tot}}} = \frac{1}{30} + \frac{1}{20} = 0,08333 \rightarrow R_{\text{tot}} = \frac{1}{0,08333} = 12 \, \Omega$

OOK GOED

- $I_{\text{tot}} = I_1 + I_2 \rightarrow I_{\text{tot}} = 0,20 + 0,30 = 0,50 \, \text{A}$
- $R_{\text{tot}} = \frac{U_{\text{tot}}}{I_{\text{tot}}} = \frac{6,0}{0,50} = 12 \, \Omega$

Gemengde schakeling

Bij een schakeling van drie weerstanden kunnen deze parallel staan, in serie of een combinatie met twee weerstanden parallel en de derde in serie. In het laatste geval is het een **gemengde schakeling**. Zie figuur 27.



Figuur 27 Gemengde schakelingen.

Om de spanning en de stroomsterkte voor iedere weerstand te berekenen moet je de gemengde schakeling stapje voor stapje vereenvoudigen. De totale weerstand berekenen je door steeds de vervangingsweerstand van twee weerstanden te berekenen.

- 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 27 links is aangesloten op een spanning van $U_{\text{bron}} = 5,0 \text{ V}$. De weerstanden zijn $R_1 = 8,0 \Omega$, $R_2 = 20 \Omega$ en $R_3 = 30 \Omega$.

Bereken de totale stroom I_{bron} .

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

Bereken de spanningen over de weerstanden R_1 , R_2 en R_3 .

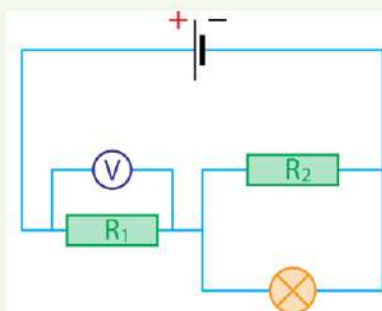
- $U_1 = I_1 \cdot R_1 \rightarrow U_1 = 0,25 \cdot 8 \rightarrow U_1 = 2,0 \text{ V}$
- $U_{23} = I_{23} \cdot R_{23} \rightarrow U_{23} = 0,25 \cdot 12 \rightarrow U_{23} = 3,0 \text{ V}$
- $U_{23} = U_2 = U_3 = 3,0 \text{ V}$

Bereken de stroomsterkten door weerstanden R_1 , R_2 en R_3

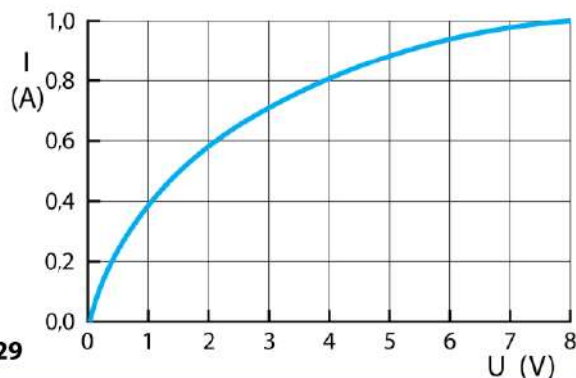
- $I_{\text{tot}} = I_1 = \frac{5}{20} = 0,25 \text{ A}$
- $U_2 = I_2 \cdot R_2 \rightarrow 3 = I_2 \cdot 20 \rightarrow I_2 = \frac{3}{20} = 0,15 \text{ A}$
- $U_3 = I_3 \cdot R_3 \rightarrow 3 = I_3 \cdot 30 \rightarrow I_3 = \frac{3}{30} = 0,10 \text{ A}$
- controle $I_2 + I_3 = 0,15 + 0,1 = 0,25 \text{ A} = I_1 = I_{\text{tot}}$ klopt

VOORBEELD gemengde schakeling met lampje

Een lampje is opgenomen in een gemengde schakeling. Zie figuur 28. Het (I, U)-diagram van het lampje is gegeven in figuur 29. De voltmeter geeft 6,0 V aan. $U_{\text{bron}} = 10 \text{ V}$ en $R_2 = 10 \Omega$.



Figuur 28



Figuur 29

Bereken stroomsterkte die de spanningsbron levert.

- $U_{\text{tot}} = U_1 + U_{\text{lamp}} \rightarrow 10 = 6 + U_{\text{lamp}} \rightarrow U_{\text{lamp}} = U_2 = 10 - 6 = 4 \text{ V}$
- aflezen in figuur 29 $I_{\text{lamp}} = 0,80 \text{ A}$
- $U_2 = I_2 \cdot R_2 \rightarrow 4 = I_2 \cdot 10 \rightarrow I_2 = \frac{4}{10} = 0,40 \text{ A}$
- $I_{\text{tot}} = I_2 + I_{\text{lamp}} \rightarrow I_{\text{tot}} = 0,4 + 0,8 = 1,2 \text{ A}$

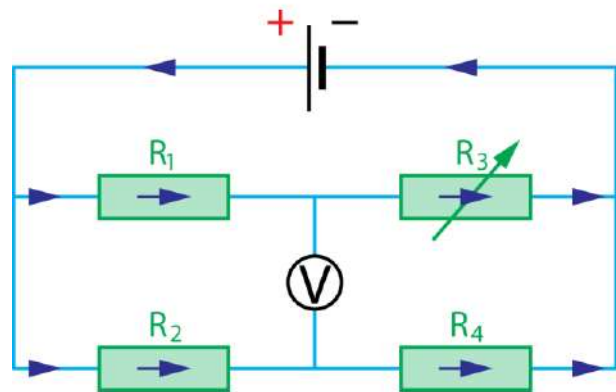
Bereken weerstand R_1 .

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

Wheatstonebrug

Charles Wheatstone (1802–1875) heeft in 1843 een methode ontwikkeld om nauwkeurig weerstand te meten. De schakeling die hij heeft bedacht heet de Wheatstonebrug. Zie figuur 30.

Figuur 30 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_1 toch te bepalen nemen we hem op in een stroomkring. 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 we de voltmeter op zijn gevoeligste stand kunnen zetten. 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: $R_1 = 10 \cdot 16 / 1000 = 0,16 \Omega$.

6.6 Energie, vermogen en rendement

Het vermogen

Het vermogen P (Eng. power) geeft aan hoeveel energie in één seconde wordt omgezet. De eenheid van vermogen is watt (W).

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

$$P = \frac{E}{t} \quad \leftrightarrow \quad E = P \cdot t$$

- 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)

De wet van Joule

Voor de spanning geldt $E_{el} = Q \cdot U$ en voor de stroomsterkte geldt $I = Q / t \rightarrow Q = I \cdot t$. Combineer je deze formules dan vind je een formule waarmee je kunt uitrekenen hoeveel elektrische energie een apparaat verbruikt $E_{el} = U \cdot I \cdot t$. Hieruit volgt het vermogen van het apparaat: $P = E_{el} / t \rightarrow P = U \cdot I$.

De wet van Joule

$$P = U \cdot I$$

- P 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 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 fietslamp

Een fietslamp werkt op twee in serie geschakelde batterijen van 1,5 V. Als het licht brandt leveren de batterijen een stroomsterkte van 250 mA.

Bereken het vermogen van de fietslamp.

- $P = U \cdot I \rightarrow P = 2 \cdot 1,5 \cdot 0,25 = 0,75 \text{ W}$

Bereken hoeveel energie de batterijen leveren als de lamp een uur brandt.

- $E = P \cdot t \rightarrow E = 0,75 \cdot 60 \cdot 60 = 2,7 \cdot 10^3 \text{ J}$

Gebruik van elektrische energie

Hoewel 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.

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

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 € 0,25.

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 $4,8 \cdot 3,6 \cdot 10^6 = 1,728 \cdot 10^7 = 1,7 \cdot 10^7 \text{ J}$

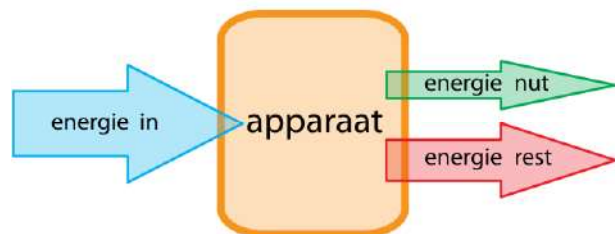
Bereken hoeveel je voor een wasbeurt moet betalen.

- $4,8 \cdot 0,25 = 1,2 \rightarrow$ één wasbeurt kost € 1,20

Rendement

In ieder elektrisch apparaat ontstaat warmte. Dit komt omdat de bewegende elektronen tegen atoomkernen 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 en dit deel wil je zo klein mogelijk maken. Bij elektrische apparaten is E_{in} altijd de opgenomen elektrische energie van het apparaat. E_{nut} is de nuttige energie die het apparaat levert. Zie figuur 31.

Figuur 31 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} . Soms 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} .

$$\eta = \frac{E_{\text{nut}}}{E_{\text{in}}} = \frac{P_{\text{nut}}}{P_{\text{in}}}$$

- η (èta) is het rendement en heeft geen eenheid
- 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 LED-lamp

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.

- $E_{\text{in}} = P_{\text{in}} \cdot t \rightarrow E_{\text{in}} = 12 \cdot 5 \cdot 60 \cdot 60 = 2,16 \cdot 10^5 \text{ J}$
- $\eta = \frac{E_{\text{nut}}}{E_{\text{in}}} \rightarrow 0,40 = \frac{E_{\text{nut}}}{2,16 \cdot 10^5} \rightarrow E_{\text{nut}} = 8,64 \cdot 10^4 \text{ J}$
- $E_{\text{rest}} = E_{\text{in}} - E_{\text{nut}} = 2,16 \cdot 10^5 - 8,64 \cdot 10^4 = 1,296 \cdot 10^5 = 1,3 \cdot 10^5 \text{ J}$

Opslag van elektrische energie

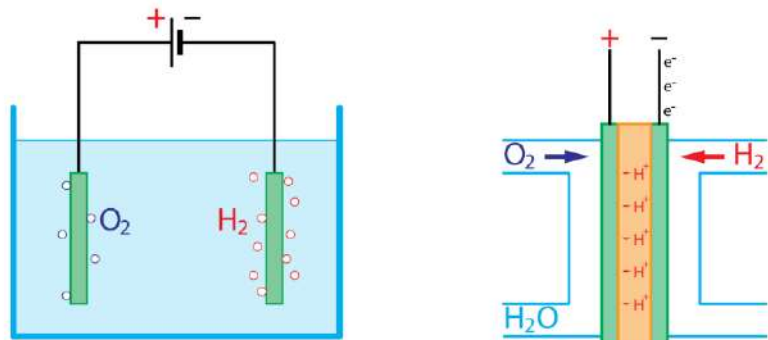
Een belangrijke technologische uitdaging is de opslag van elektrische energie. Tot nu toe wordt de meeste elektrische energie gemaakt in centrales die op ieder moment de energie produceren die nodig is. Elektriciteit wordt dus niet op grote schaal opgeslagen. Maar met de komst van allerlei mobiele elektrische 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 maken 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 32 links gebruikt. In een vat 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 32 rechts.

Figuur 32 Elektrolyse van water (links) en brandstofcel (rechts).



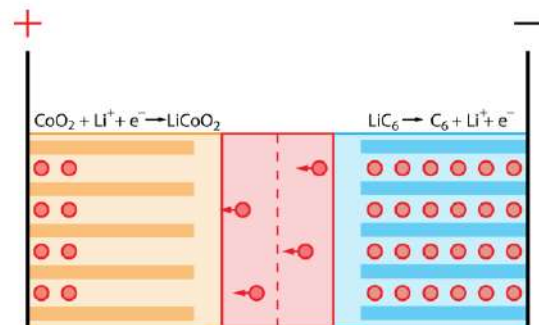
– condensator –

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.

Een Li-ion accu heeft twee elektrodes, waarin Li⁺-ionen zijn opgenomen. De positieve elektrode is gemaakt van bijvoorbeeld kobalt-oxide, 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 3,7 V. Bij het ontladen gaan de Li⁺-ionen terug van LiC₆ naar LiCoO₂.



Figuur 33 Li-ion accu.

De belangrijkste eigenschappen van een accu zijn:

- de spanning
- de elektrische lading die kan worden opgeslagen (**de capaciteit**)
- de opgeslagen elektrische energie *wordt soms ook de capaciteit genoemd*
- de elektrische energie per kubieke meter (**de energiedichtheid**)
- de elektrische energie per kilogram (**de 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 opslaan. De eenheid voor capaciteit is Ah of mAh. Eén Ah lading is 3600 C. *één ampère stroomt één uur*

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.

Om de energie van een accu uit te rekenen gebruik je de formules $P = U \cdot I$ en $E = P \cdot t$. Als deze samenvoegt vind je $E_{el} = U \cdot I \cdot t$. Als je de tijd in uur invult vind je dat de elektrische energie in wattuur (Wh) gelijk is aan de spanning (U) keer de capaciteit in ampère-uur (Ah).

Elektrische energie (Wh) is de spanning (U) keer de capaciteit (Ah).

Tabel 1 is een overzicht van veel gebruikte Li-ion accu's.

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)

VOORBEELD accu

De accu van een elektrische fiets heeft een capaciteit van 14 Ah. Dit betekent dat bij een stroomsterkte van 14 A de accu na één uur leeg is. Is de stroomsterkte 7,0 A dan is de accu na twee uur leeg, etc. De spanning van de accu is 36 V. De accu weegt 2,6 kg.

Bereken de opgeslagen elektrische energie in Wh.

- $U = 36 \text{ V} \mid I = 14 \text{ A} \mid t = 1,0 \text{ h} \mid E_{el} = \dots \text{ Wh}$
- $P = U \cdot I$ en $E = P \cdot t \rightarrow E_{el} = U \cdot I \cdot t$
- $E_{el} = 36 \cdot 14 \cdot 1 = 504 \text{ Wh}$

Bereken de energiedichtheid in Wh/kg.

- $\text{energiedichtheid} = \frac{E_{el} \text{ (Wh)}}{m \text{ (kg)}} = \frac{504}{2,6} = 1,938 \cdot 10^2 = 1,9 \cdot 10^2 \text{ Wh/kg}$

De elektromotor heeft een nominaal vermogen van 250 W en een rendement van 0,85.

Hoelang kun je fietsen als de motor het nominale vermogen levert?

- $E = 504 \text{ Wh} \mid P = 250 \text{ W} \mid \eta = 0,85 \mid t = \dots \text{ h}$
- $\eta = \frac{E_{nut}}{E_{in}} \rightarrow 0,85 = \frac{E_{nut}}{504} \rightarrow E_{nut} = 428,4 \text{ Wh}$
- $E = P \cdot t \rightarrow 428,4 = 250 \cdot t \rightarrow t = 1,7136 = 1,7 \text{ h} \quad (1 \text{ h en } 43 \text{ min})$

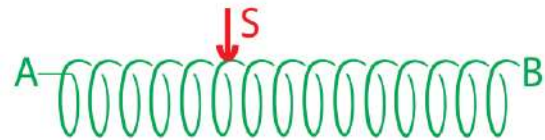
Hoeveel lading bevat een volledig opgeladen accu?

- de capaciteit van de accu is 14 Ah
- $I = \frac{Q}{t} \rightarrow Q = I \cdot t \rightarrow Q = 14 \cdot 60 \cdot 60 = 5,04 \cdot 10^4 \text{ C}$

6.7 Variabele weerstand en spanningsdeler

Variabele weerstand

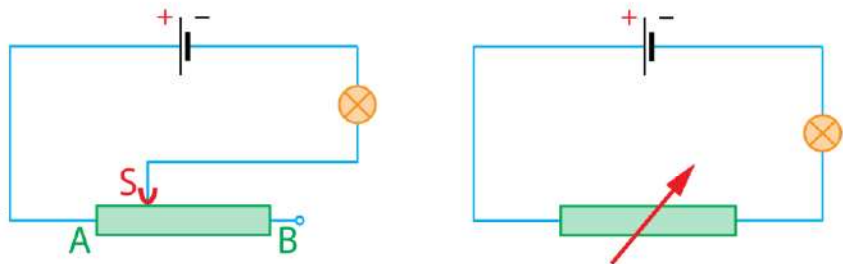
Een variabele weerstand is een weerstand die je groter of kleiner kunt maken. Dit doe je door een schuifcontact te verplaatsen. In figuur 34 zie je een draad die als spoel is gewikkeld met schuifcontact S.



Figuur 34 Variabele weerstand.

Deze draad met schuifcontact wordt opgenomen in stroomkring. Zie figuur 35. Bij A gaat de stroom de draad in en bij S de draad uit. Door S te verschuiven kan je de lengte van de draad groter of kleiner maken, waardoor de weerstand verandert. Verschuiving naar rechts geeft een grotere weerstand en verschuiving naar links een kleinere. In figuur 35 staat een lampje in serie met een variabele weerstand. Rechts is het elektrotechnisch symbool voor een variabele weerstand gebruikt. Bij een serieschakeling staat over de grootste weerstand de meeste spanning. Door de variabele weerstand te variëren verandert de verdeling van de spanning: $U_{\text{bron}} = U_{\text{var}} + U_{\text{lamp}}$.

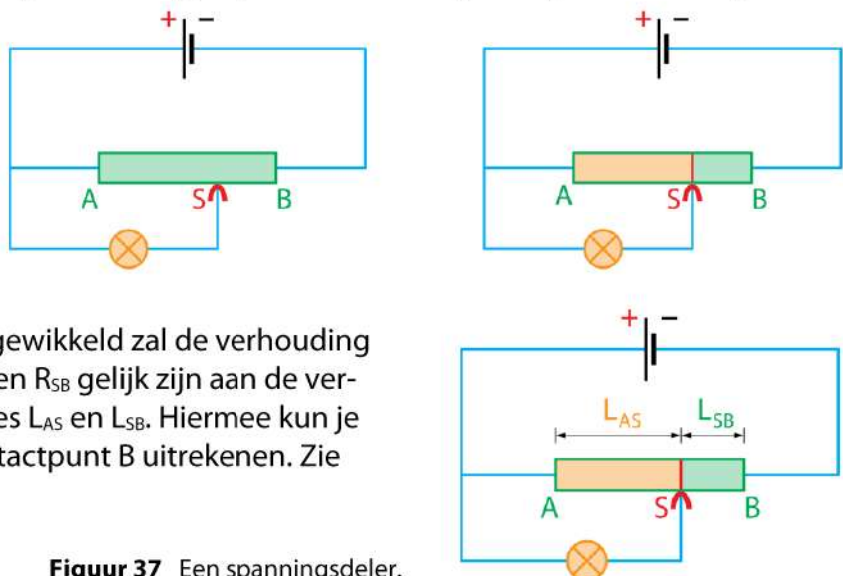
Figuur 35 Een lamp in serie met een variabele weerstand. Rechts zie je dezelfde schakeling.



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 36 is een lamp aangesloten op een spanningsdeler. De lamp is parallel geschakeld met het deel AS. Het deel SB staat hiermee in serie. Een spanningsdeler mag je opvatten als een gemengde schakeling.

Figuur 36 Een lamp is aangesloten op een spanningsdeler en staat parallel aan R_{AS} (oranje) en 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 37.

Figuur 37 Een spanningsdeler.

VOORBEELD lampje aangesloten op een spanningsdeler

In figuur 36 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 Speciale componenten

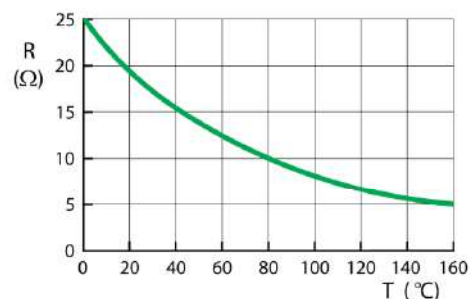
Positieve Temperatuur Coëfficiënt weerstand (PTC)

Eerder hebben we gezien dat de soortelijke weerstand afhankelijk is van de temperatuur. Bij een PTC neemt de soortelijke weerstand toe als de temperatuur stijgt. Dit komt omdat bij een hogere temperatuur de elektronen vaker tegen de atomen botsen, waardoor ze worden afgeremd. Alle **metalen** hebben een positieve temperatuur coëfficiënt en metaal-draad is daarom een PTC-weerstand.

Negatieve Temperatuur Coëfficiënt weerstand (NTC)

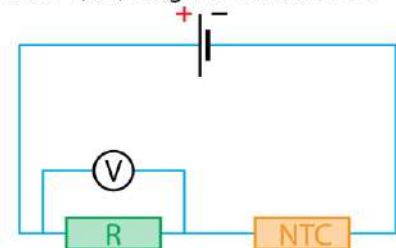
Bij **halfgeleiders** neemt de weerstand af bij toenemende temperatuur. De temperatuur-coëfficiënt is dan negatief. De invloed van de temperatuur is bij halfgeleiders veel groter dan bij metalen. Vandaar dat bij gewone weerstanden, gemaakt van metaal, de invloed van de temperatuur meestal wordt verwaarloosd.

Een NTC-weerstand heeft een negatieve temperatuurcoëfficiënt en is gemaakt van een halfgeleidende stof. In figuur 38 zie je een (R, T)-diagram, met op de horizontale as de temperatuur en op de verticale as de weerstand. De grafiek laat zien dat de weerstand kleiner wordt als de temperatuur toeneemt en hoort dus bij een NTC-weerstand.



Figuur 38 (R,T)-diagram van een NTC.

Een NTC kun je gebruiken als thermometer. Zie figuur 39. Hiervoor schakel je een NTC-weerstand in serie met een vaste weerstand R waarvan de weerstand 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.



Figuur 39 NTC in een schakeling

VOORBEELD NTC temperatuursensor

Een NTC-weerstand is opgenomen in een serieschakeling. Zie figuur 39. Van de NTC-weerstand is de (R, T)-grafiek gegeven in figuur 38. De spanningsbron geeft een spanning van 5,0 V. De weerstand R waarover de voltmeter staat is 15 Ω.

Bereken de spanning over R bij T = 80 °C.

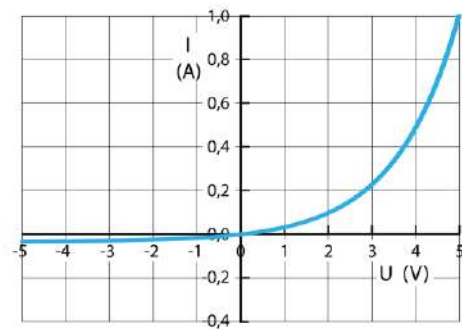
- aflezen in figuur 38 bij 80 °C: $R_{NTC} = 10 \Omega$
- serieschakeling: $R_{tot} = R + R_{NTC} \rightarrow R_{tot} = 15 + 10 = 25 \Omega$
- $U_{tot} = I_{tot} \cdot R_{tot} \rightarrow 5 = I_{tot} \cdot 25 \rightarrow I_{tot} = 0,20 \text{ A}$
- $U_R = I_{tot} \cdot R \rightarrow U_R = 0,2 \cdot 15 = 3,0 \text{ V}$

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 verwarmen van een NTC-weerstand. Hoe meer licht hoe kleiner de weerstand. Om een lichtsensor te krijgen schakel je een LDR-weerstand serie met een vaste weerstand.

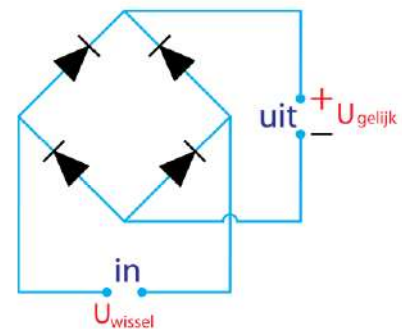
Diode

Een diode laat elektrische stroom 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 40. In het symbool van een diode is de doorlaatrichting aangegeven met een pijl ► en de sperrichting met een verticale 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.



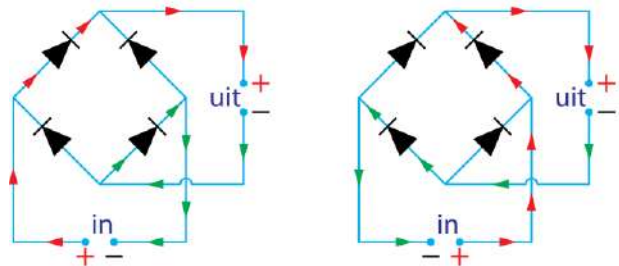
Figuur 40 (I, U)-grafiek van een diode.

Een diode wordt toegepast in een **gelijkrichter**. De spanning van het lichtnet is een wisselspanning van 230 V. Dit betekent dat het teken van de spanning voortdurend omkeert: + - + - + - + ... De meeste apparaten in huis werken op deze wisselspanning maar bijvoorbeeld een USB-adapter geeft 5,0 V gelijkspanning. Om van wisselspanning gelijkspanning te maken gebruik je de schakeling van figuur 41. Hierin zijn vier diodes opgenomen



Figuur 41 Diodes in een gelijkrichter.

In figuur 42 zie je dat verandering van het teken bij de ingang geen invloed heeft op het teken bij de uitgang.



Figuur 42 Een gelijkrichter.

Licht Emitterende Diode (LED)

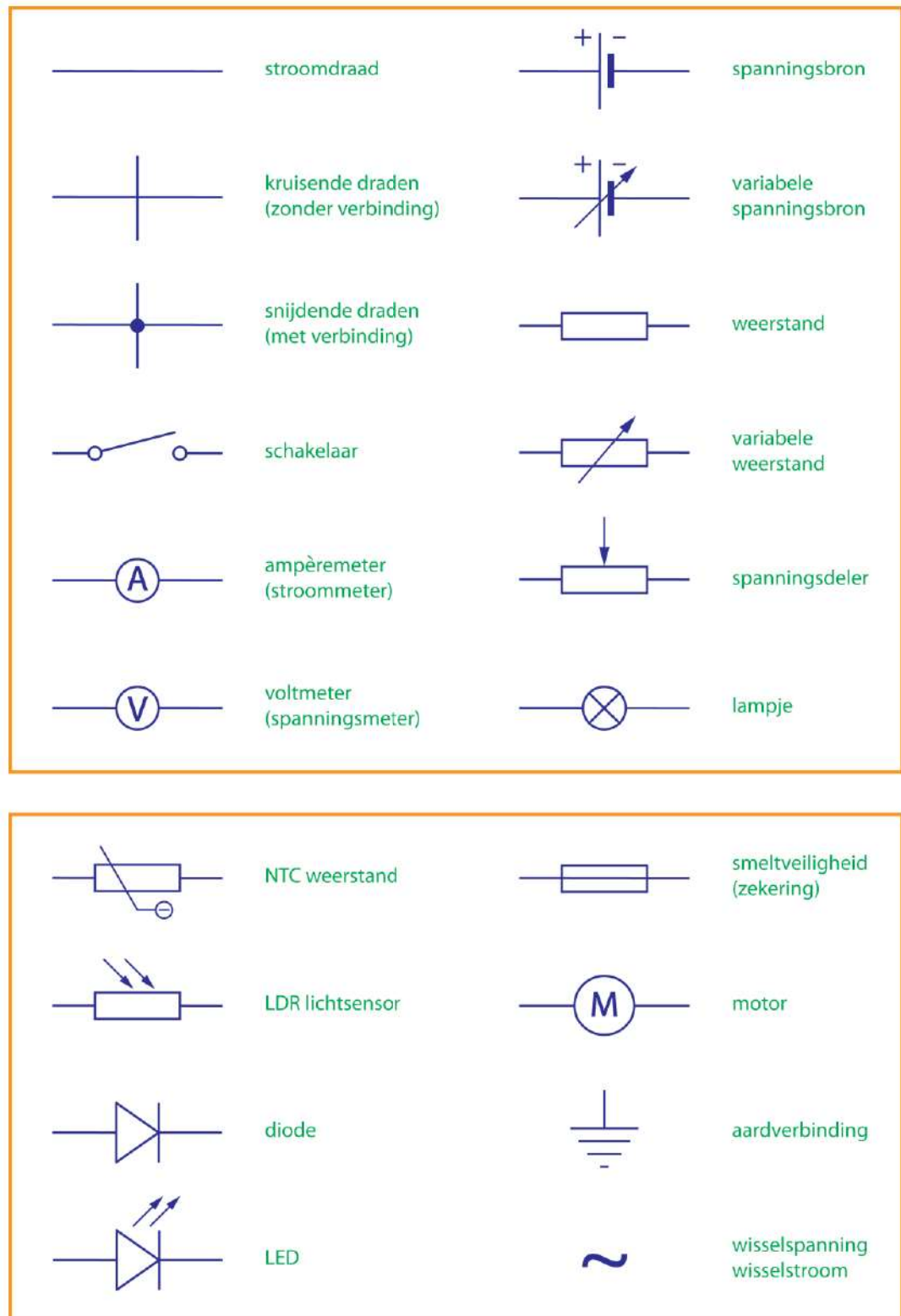
Met speciale halfgeleidende materialen kunnen diodes worden gemaakt die licht geven als er stroom in de doorlaatrichting gaat. Dit zijn de zogenaamde LED's. Vroeger werden LED's alleen als controlelampje gebruikt, maar tegenwoordig kom je ze overal tegen als lichtbron. Een LED-lamp kan een rendement hebben van 50% en kan 20.000 uur licht geven voordat hij kapotgaat. Een nieuwe ontwikkeling is het gebruik van organische LED's (OLED) voor beeldschermen. OLED beeldschermen gebruiken weinig energie, hebben felle kleuren en zijn buigzaam.



Figuur 43 OLED's

Elektrotechnische symbolen

Om de componenten in een schakeling aan te geven zijn symbolen bedacht, zodat voor iedereen duidelijk is wat er wordt bedoeld. Je vindt ze in Binas tabel 17B. Een aantal van deze symbolen ben je al tegengekomen. In figuur 44 zie je de symbolen van gewone componenten (boven) en de symbolen van speciale componenten (onder).



Figuur 44

6.9 Elektriciteit in huis

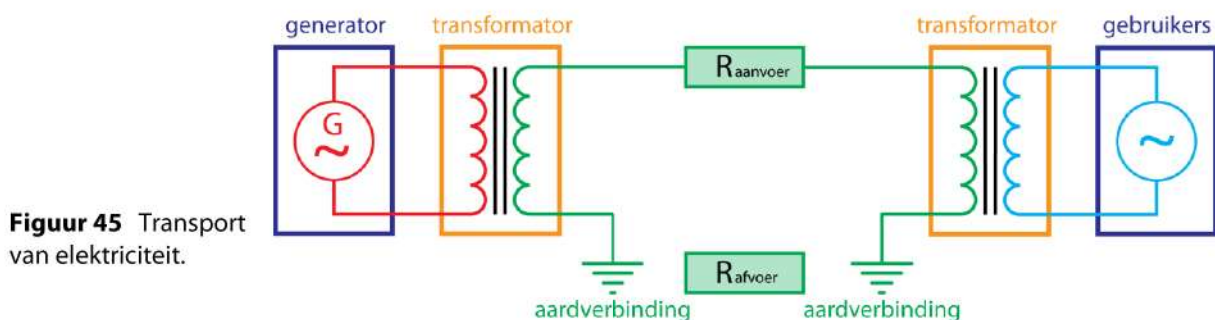
Opwekking en transport van elektriciteit

Elektriciteit wordt opgewekt in een centrale, waarin warmte wordt omgezet in elektrische energie. De warmte is afkomstig van het verbranden van fossiele brandstof, zoals kolen, olie of gas of van 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. Eerste wordt **warmte** omgezet in **kinetische energie** van de draaiende spoel en daarna wordt kinetische energie omgezet in **elektrische energie**.

Om elektrische energie naar de gebruikers te brengen wordt de spanning verhoogd naar bijvoorbeeld 150 kV of 380 kV. Hoe hoger de spanning is hoe minder verlies van elektrische energie. Om de spanning te verhogen (en later te verlagen) wordt een **transformator** gebruikt. Ook thuis gebruik je een transformator om de spanning van het net (230 V) te verlagen naar bijvoorbeeld 5,0 V in een USB-adapter.

De spanning van de generator wordt eerst omhoog getransformeerd. In Nederland is er een 150 kV en een 380 kV net. De aanvoer van stroom 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 45.

Omdat de aarde een goede geleider is wordt de aarde gebruikt om de stroom af te voeren terug naar de generator. De verbinding met de aarde geef je aan door korter wordende horizontale streepjes. Zie figuur 45.



Voor het rendement van elektriciteitstransport geldt: $\eta = (P_{gebruikers} / P_{centrale})$. 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 een vermogen van 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.

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

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

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.

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

- $\eta = \frac{P_{\text{stad}}}{P_{\text{centrale}}} \rightarrow \eta = \frac{9,95 \cdot 10^7}{1,0 \cdot 10^8} \rightarrow \eta = 0,995$

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 geelgroene 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 binnenkomt gaat eerst naar een huisaansluitkast, waarin zich de hoofdschakelaar en de hoofdzekering bevinden. Met de hoofdschakelaar kan je de huisinstallatie van het net afschakelen. Er is ook een hoofdzekering die de elektrische installatie uitzet als er teveel stroom loopt.



Figuur 46 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 en één voor de overige tijd.



Figuur 47 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 verbindingsdraden 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 48 Groepenkast.

Zekeringen (smeltveiligheid)

Om ervoor 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 40 A. De (groeps-) zekeringen kunnen smeltzekeringen zijn of automatische zekeringen.

Het symbool voor een zekering (smeltveiligheid) zie je in figuur 49.



Figuur 49

– smeltzekering en automatische zekering –

In een smeltzekering bevindt zich een dun stroomdraadje dat bij een te hoge stroomsterkte doorsmelt, waardoor de verbinding wordt verbroken. 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 je een nieuwe smeltzekering plaatsen of kan je een automatische zekering weer inschakelen.

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 50 Smeltzekering



Figuur 51 Automatische zekering



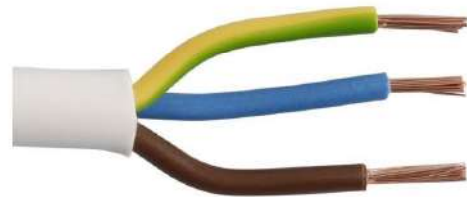
Figuur 52 Aardlekschakelaar

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 geelgroene 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 geelgroene draad is de **aarddraad** die ook in verbinding staat met de aarde.



Figuur 53 Installatiedraad: fasedraad (bruin), nuldraad (blauw), aarddraad (geelgroen) 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 54 Schakelaar

Stopcontacten

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

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



Figuur 55 Stopcontact

Gevaarlijke situaties

– overbelasting –

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

– 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 schakelt de groepszekering de stroom uit.

– lekstromen –

Lekstroom is elektrische stroom die wordt aangevoerd door de fasedraad maar die niet door de nuldraad wordt afgevoerd. Er lekt dan stroom via een andere route naar de aarde. In deze situatie schakelt de aardlekschakelaar de stroom uit.

6.10 Samenvatting

Grootheden en eenheden

- Q is de elektrische lading in coulomb (C) ook kleine letter q wordt gebruikt
- U is de spanning in volt (V)
- I is de stroomsterkte in ampère (A) en is gelijk aan één coulomb per seconde (C/s)
- t is de tijd in seconde (s)
- E_{el} is de elektrische energie in joule (J) (of kWh) $1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$
- R is de weerstand in ohm (Ω)
- ρ is de soortelijke weerstand in ohm keer meter ($\Omega \text{ m}$)
- A is de oppervlakte van de doorsnede in vierkante meter (m^2)
- P is het vermogen in watt (W) gelijk aan joule per seconde (J/s)
- η is het rendement zonder eenheid, soms in procent (%)

Weten

- Elektrische lading kan niet ontstaan en kan niet verdwijnen.
- Gelijksortige ladingen $++$ en $--$ stoten elkaar, tegengestelde ladingen $+-$ en $-+$ trekken elkaar aan.
- Door wrijving kunnen er elektronen overspringen.
 - elektroscop wordt geladen $\rightarrow$ blaadjes slaan uit
 - van de Graaff generator $\rightarrow$ haren gaan overeind staan
- Lading proton is $+e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ elementair ladingsquantum
Lading elektron is $-e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- Een spanningsbron is een elektronenpomp. Elektronen worden op elkaar geperst waardoor elektrische spanning ontstaat.
- De spanning van het lichtnet in Europa is 230 volt.
- 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.
- Een geleider is een stof waarin elektronen gemakkelijk kunnen bewegen.
Een isolator is een stof waarin elektronen niet kunnen bewegen.
- In een stroomkring (elektrisch circuit) gaan elektronen in een kring rond.
De spanningsbron zorgt ervoor dat de energie na ieder rondje wordt aangevuld.
- De stroomsterkte is de hoeveelheid lading die per seconde stroomt.

- Stroom meet je met een stroommeter, ook wel ampèremeter genoemd
 - een stroommeter meet hoeveel coulomb er per seconde passeert
 - een stroommeter moet in de stroomkring worden opgenomen
 - een stroommeter geef je aan met een cirkel om hoofdletter A
 - de weerstand van een ideale stroommeter is oneindig klein
 - over een ideale stroommeter staat geen spanning
 - Spanning meet je met een spanningsmeter, ook wel voltmeter genoemd.
 - een spanningsmeter meet hoeveel spanning er staat over een apparaat
 - een spanningsmeter staat over het apparaat, NIET in de stroomkring
 - een spanningsmeter geef je aan met een cirkel om hoofdletter V
 - de weerstand van een ideale spanningsmeter is oneindig groot
 - door een ideale spanningsmeter loopt geen stroom
 - Serieschakeling:

$I_{\text{tot}} = I_1 = I_2 = \dots$	de stroomsterkte is voor alle weerstanden gelijk
$U_{\text{tot}} = U_1 + U_2 + \dots$	de spanning verdeelt zich → grote R krijgt veel spanning
$R_{\text{tot}} = R_1 + R_2 + \dots$	de totale weerstand is de som van de weerstanden
 - Parallelschakeling:

$I_{\text{tot}} = I_1 + I_2 + \dots$	de stroomsterkte verdeelt zich → grote R krijgt weinig stroom
$U_{\text{tot}} = U_1 = U_2 = \dots$	de spanning is voor alle weerstanden gelijk
$\frac{1}{R_{\text{tot}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots$	de totale weerstand neemt af als je een weerstand toevoegt
 - PTC weerstand → T hoger → R wordt groter metalen
 - NTC weerstand → T hoger → R wordt kleiner halfgeleiders
 - LDR weerstand → Licht aanwezig → R wordt kleiner halfgeleiders
- NTC → temperatuur brengt elektronen naar een hoger energieniveau, waardoor het aantal vrije elektronen toeneemt en de weerstand kleiner wordt
- LDR → licht brengt elektronen naar een hoger energieniveau, waardoor het aantal vrije elektronen toeneemt en de weerstand kleiner wordt
- Diode → Laat maar in één richting stroom door doorlaatrichting
 - LED → bijzondere diode die licht uitstraalt in de doorlaatrichting.

Formules

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

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

$$U = I \cdot R$$

de wet van Ohm

$$\rho = \frac{R \cdot A}{\ell} \quad \text{met} \quad A = \pi \cdot r^2 \quad \text{de oppervlakte van de doorsnede}$$

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

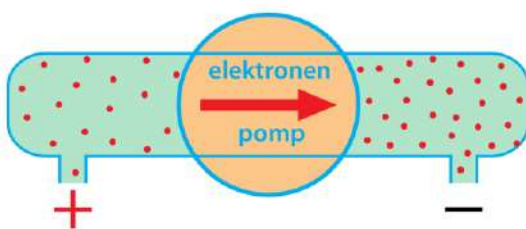
$$P = \frac{E}{t} \quad \rightarrow \quad E = P \cdot t$$

$$P = U \cdot I \quad \text{de wet van Joule}$$

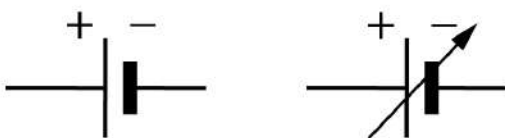
$$1 \text{ kWh} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J}$$

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

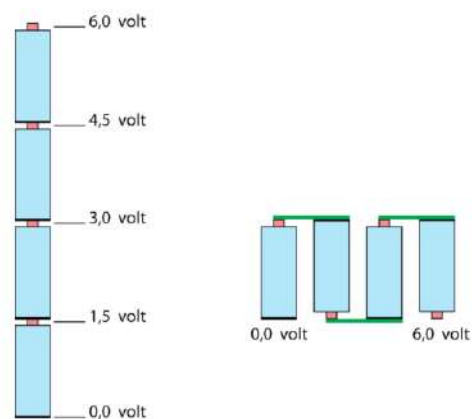
Figuren



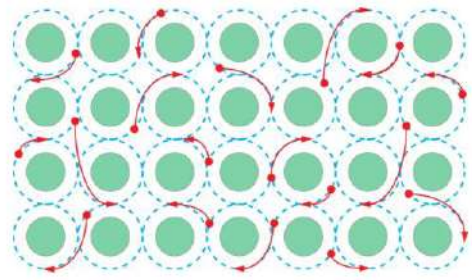
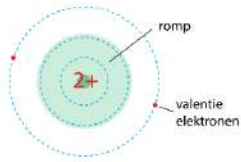
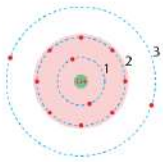
Een spanningsbron is een elektronenpomp.



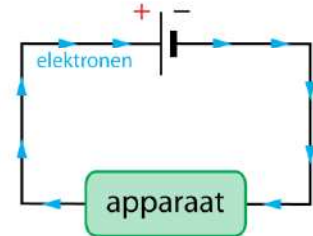
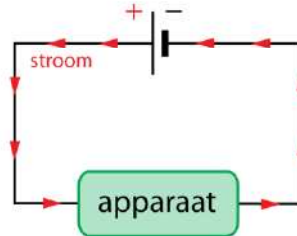
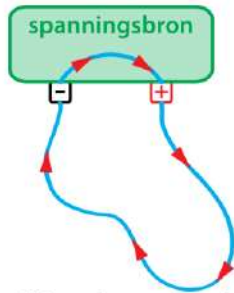
Symbool voor een spanningsbron.



Spanningsbronnen in serie $\rightarrow$ U optellen.

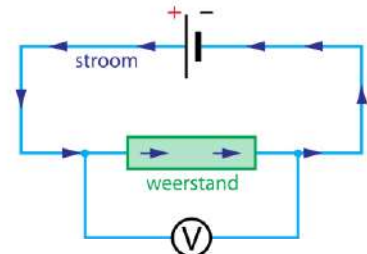
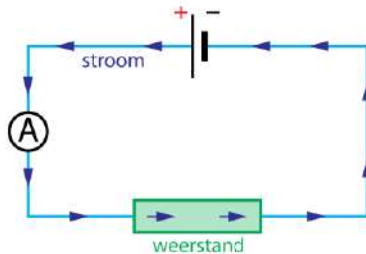


In een metaal delen de atomen (valentie-) elektronen met elkaar. Deze vrije elektronen bewegen kris-kras tussen de atomen door het metaal.

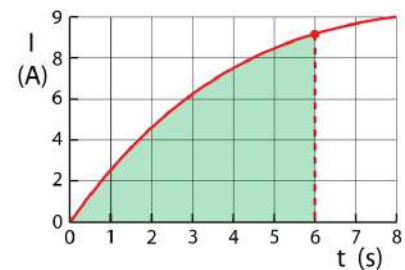
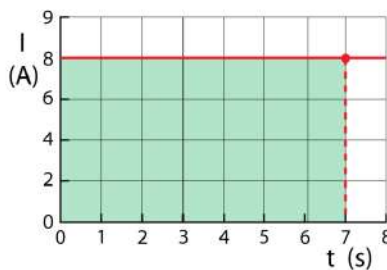


Elektrische stroom loopt in een kring van plus naar min. De elektronen gaan de andere kant uit.

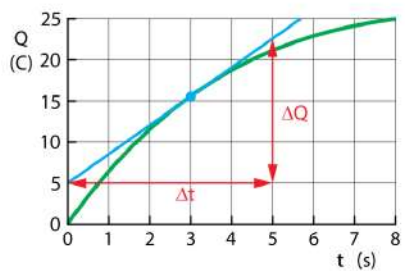
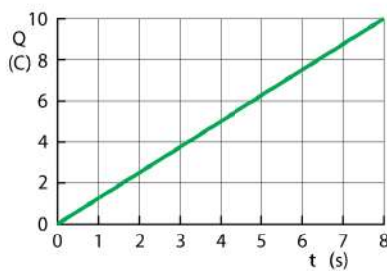
Een stroommeter is opgenomen in de stroomkring. Een spanningsmeter staat over een weerstand.



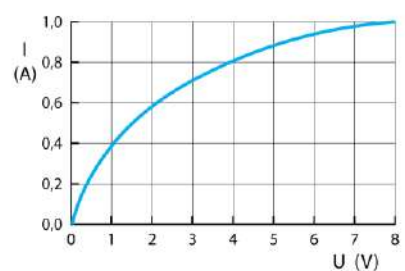
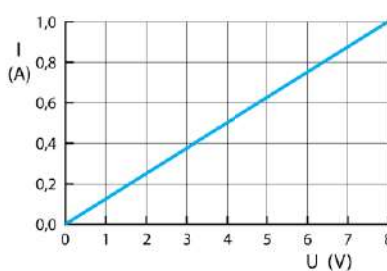
De hoeveelheid gepasseerde lading is gelijk aan de oppervlakte onder de (I, t) -grafiek.

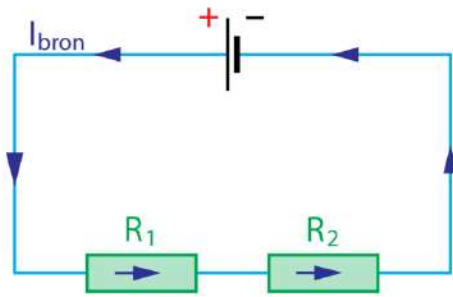


De stroomsterkte is gelijk aan de richtingscoëfficiënt van de raaklijn van een (Q, t) -grafiek.

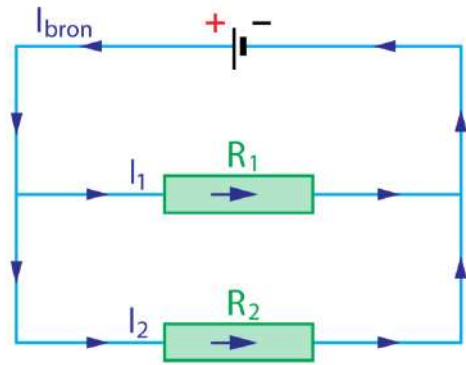


Links: (I, U) diagram van een ohmse weerstand.
Rechts: (I, U) diagram van een NIET ohmse weerstand.



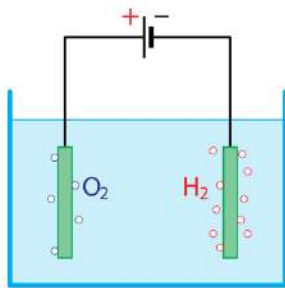
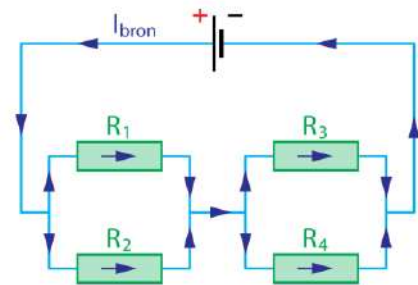
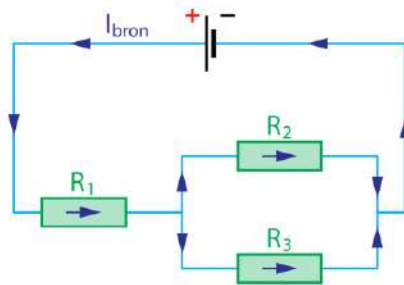


Serieschakeling

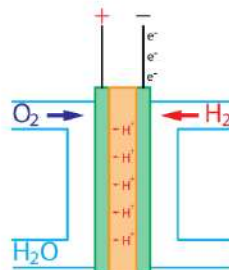


Parallelschakeling

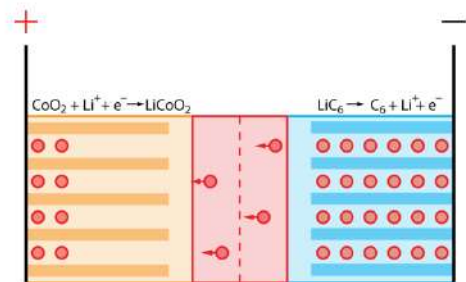
Gemengde schakelingen.



Elektrolyse

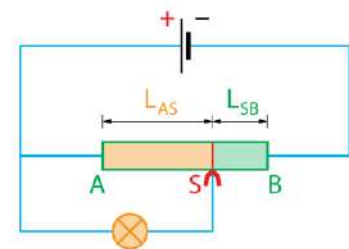
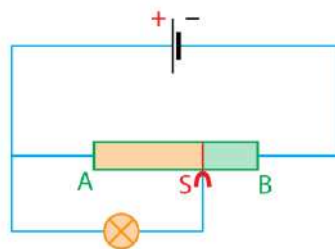
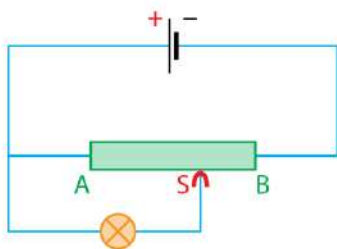
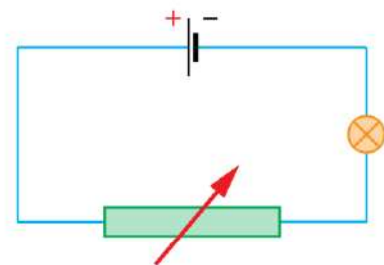
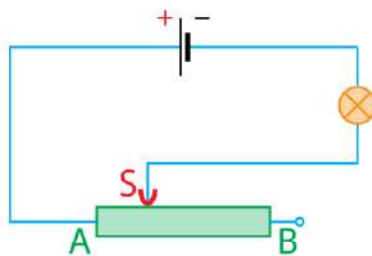


Brandstofcel

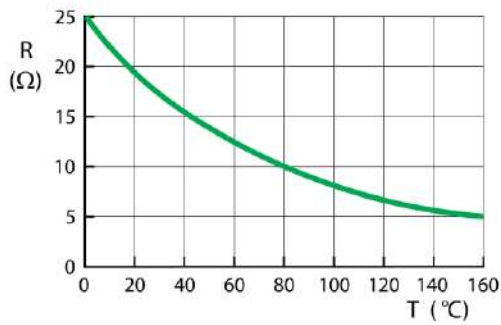


Li-ion accu

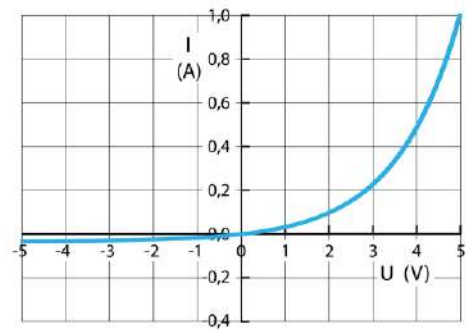
Een lampje in serie met een variabele weerstand.



Een spanningsdeler is een gemengde schakeling. De weerstanden verhouden zich zoals de lengten.

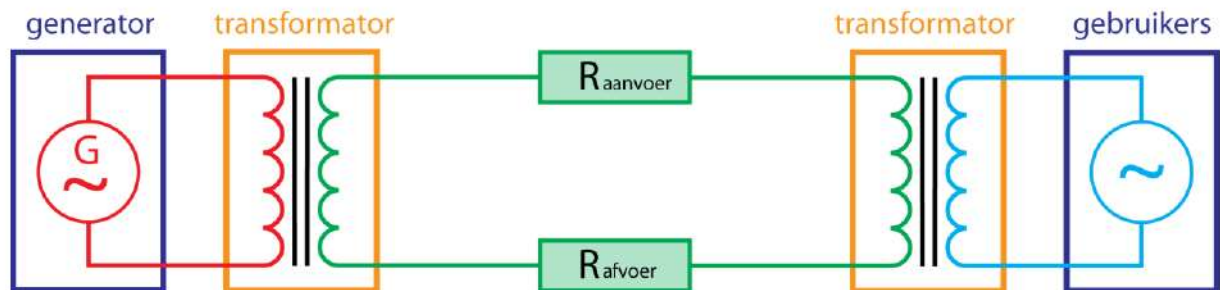
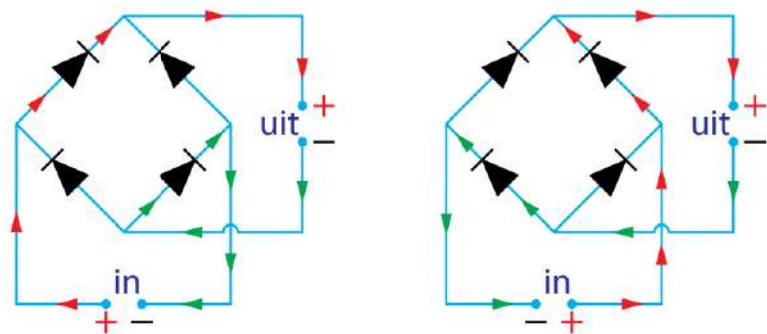


(R, T)-diagram van een NTC weerstand.
De weerstand neemt af als de temperatuur toeneemt.



Diode → blokkeert bij negatieve spanning (sperrichting) en laat door bij positieve spanning (doorlaatrichting).

Diodes worden gebruikt om wisselspanning om te zetten in gelijkspanning.



Om elektriciteit te transporteren met weinig energieverlies is een hoge spanning nodig. Bij de elektriciteitscentrale brengt een transformator de wisselspanning omhoog (150 kV of 380 kV) en bij een stad of woonwijk brengen transformators de spanning omlaag naar 230 volt.