Reader Basis Elektronica

[v1.2, 2020-2021, door Marius Versteegen]

Basis Elektronica

Natuurkunde

Onze natuurkunde beslaat allerlei domeinen. In elk van die domeinen komt energie in zijn eigen, domein-specifieke vorm voor. Het goede nieuws is dat de natuur zich in al die domeinen op vergelijkbare manier gedraagt. Als je goed gevoel hebt voor natuurkunde in een domein, kun je dat als analogon gebruiken voor een ander domein, waardoor je daar ook snel een goed gevoel voor kunt krijgen.

Daar gaan wij dankbaar gebruik van maken. Ons eerste doel is om gevoel te krijgen voor het elektrische domein. We kunnen daarvoor gebruik maken van een analogon met het mechanische domein, waarmee we in onze alledaagse werkelijkheid vertrouwd zijn.

De tabel op de volgende pagina geeft een overzicht van de grootheden in het elektrische domein en de overeenkomstige grootheden in het mechanische domein.

<table>
<tr><th>Fysieke grootheid</th><th>Elektrische Domein</th><th>Mechanische Domein</th></tr>
<tr><td>De “dingen” / energie dragers</td><td>Electronen</td><td>Water (massa)</td></tr>
<tr><td>Hoeveelheid “dingen”</td><td>Q [C]
Q = elektrische lading,
de hoeveelheid elektronen,
uitgedrukt in Coulomb
[C] = Coulomb</td><td>m [kg]
m = massa,
de hoeveelheid water,
uitgedrukt in kilogram
[kg] = kilogram</td></tr>
<tr><td>Totale energie van de “dingen”</td><td>E [J]
E = de hoeveelheid energie,
uitgedrukt in Joule</td><td>E [J]
E = de hoeveelheid energie,
uitgedrukt in Joule</td></tr>
<tr><td>Energie per “ding”</td><td>V = E / Q [V]
V = spanning,
de hoeveelheid energie per Coulomb elektronen, uitgedrukt in Volt

[V] = Volt

NB: je kunt deze formule ook schrijven in deze vorm:
E = Q * V</td><td>g * h = E / m
g * h = hoogte,
vermenigvuldigd met constante g. Dat komt dus overeen met de hoeveelheid energie per kilogram water.

h = hoogte in meters.
g = de zwaartekrachtsversnelling op aarde: 9,8 m/s^2

NB: je kunt deze formule ook schrijven in deze vorm:
E = m * g * h</td></tr>
<tr><td>De stroom van “dingen”

(het aantal “dingen” dat per seconde voorbij komt)</td><td>I = Q / Δt [A]
I = stroom,
de hoeveelheid elektronen die per seconde voorbij stroomt,
uitgedrukt in Ampere
Δt = tijdsinterval in secondes
[A] = Ampere</td><td>waterstroom = m / Δt [kg/sec]

de hoeveelheid water die per seconde voorbij stroomt.

Δt = tijdsinterval in secondes</td></tr>
<tr><td>De stroom van “energie”</td><td>P = I * V [W]
P = Vermogen, de hoeveelheid energie die per seconde voorbij stroomt, uitgedrukt in Watt.

We kunnen P dus schrijven als:
P = E / Δt

Hierboven zagen we al:
E = Q * V

Daarnaast zagen we:
I = Q/Δt

We kunnen P dus schrijven als:
P = E/Δt = Q*V/Δt = Q/Δt*V
= I*V

[W] = Watt == Joule/sec</td><td>P = m / Δt * g * h [W]
P = Vermogen, de hoeveelheid energie die per seconde voorbij stroomt, uitgedrukt in Watt.

Deze formule is ook af te leiden uit bovenstaande formules, maar dat boeit verder niet zo.</td></tr>
</table>

Extra uitleg bij bovenstaande tabel

Formules

Zorg ervoor dat je alle formules kunt herschrijven. Bijvoorbeeld gegeven V = E / Q weet je automatisch ook dat E = Q * V en Q = E / V.

Grootheden

Zorg ervoor dat je ook de bijbehorende grootheden kent. Bij de drie formules uit het voorgaande voorbeeld betekent dat: Volt = Joule / Coulomb, Joule = Coulomb * Volt en Coulomb = Joule / Volt.

Of bijvoorbeeld: P = E/Δt, dus Watt = Joule / sec. Maar ook P = V * I, dus Watt = Volt * Ampere.
Volt*Ampere wordt ook wel uitgesproken als “Voltampere”, en geschreven als “VA”.
Als er wordt gezegd dat er een hoeveelheid vermogen wordt omgezet van 5 Joule per seconde, is dat dus een alternatieve formulering voor 5 Watt en 5 VA.

Spanning: V of U?

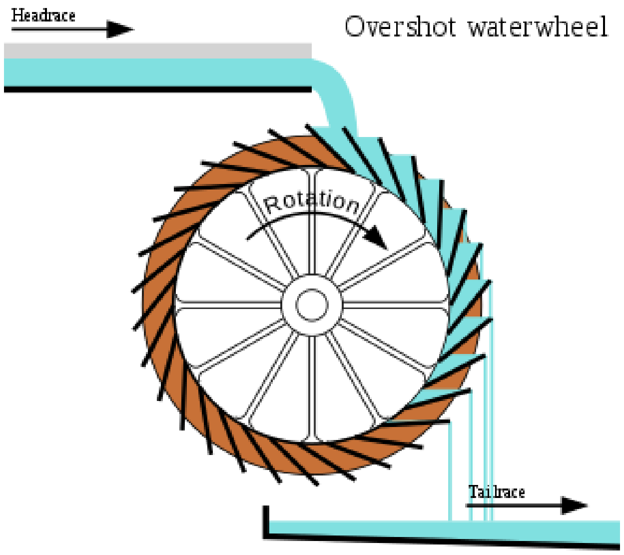
In bovenstaande tabel hebben we als **symbool** voor electrische **spanning** V gebruikt, en als **eenheid** ook V (dan betekent het “**Volt**”). Sommigen vinden dat verwarrend, en gebruiken de letter **U** als symbool voor spanning. Dat mag. Deze reader gebruikt V, maar in plaats daarvan U gebruiken is ook prima, zolang je het maar consequent toepast.

Potentiele energie

Als een massa m zich op een bepaalde hoogte h bevindt, heeft het een zogenaamde “potentiele energie” E = m * g * h.

Die massa kan bijvoorbeeld een hoeveelheid water zijn welke zich op een bepaalde hoogte bevindt. Doordat water zich op een bepaalde hoogte bevindt, bevat het dus “potentiele energie”.

Met die energie kun je iets doen. Je kunt een kilo water bijvoorbeeld door een schoepenrad naar beneden laten vallen. De hoogte van zo’n kilo water neemt daarbij af. Zijn potentiele energie neemt in evenredigheid af (wegens E=m*g*h). Als het water de grond heeft bereikt, is al zijn potentiele energie omgezet.



Wet van behoud van energie

Omgezet? Affermative! Volgens de "**wet van behoud van energie**" blijft de totale hoeveelheid energie in ons universum gelijk. Als potentiele energie van water verdwijnt, moet die energie dus in een andere vorm verschijnen.
In dit voorbeeld is de afgenomen potentiele energie omgezet in twee andere energieen: rotatieenergie die hoort bij het draaien van het waterrad en warmte. Warmte van de wrijving van de as van het rad en opwarming van het water dat ontstaat door het kletteren ervan.

Als het water ophoudt met stromen, zal door de wrijving het rad tot stilstand komen. Zijn rotatieenergie zal dan ook via wrijving in warmte zijn omgezet.

Dit blijkt een algemeen verschijnsel. In welk natuurkundig domein je ook dingen doet. Uiteindelijk wordt alle energie omgezet in warmte, de energievorm in het domein dat "thermodynamica" heet.

.. en iets dat warm is (hetgeen een manier om te zeggen dat de molekulen nog bewegen/trillen), straalt (bijvoorbeeld infrarode-) straling uit (tot het afgekoeld is tot het absolute nulpunt). Uiteindelijk zal alle warmte-energie in ons heelal dus zijn omgezet naar stralingsenergie: rondvliegende fotonen. Gelukkig duurt dat nog even.

Stroom en knooppuntsspaning

In het bovenstaande plaatje zie je een stroom van water op zekere hoogte.
Dat kun je vergelijken met een elektrische stroom die door een draad gaat op zeker voltage.

In elektrische schemas worden om die reden de knooppunten (punten waar elektronische componenten met elkaar verbonden zijn) die zich op een hoge spanning bevinden, hoger getekend dan knooppunten die zich op een lagere spanning bevinden.

Een elektrische stroom stroomt van een positieve spanning, de positieve voedingsspanning, naar de "ground" (0 Volt), van de bovenkant van het elektrische schema naar de onderkant ervan.

Vermogen

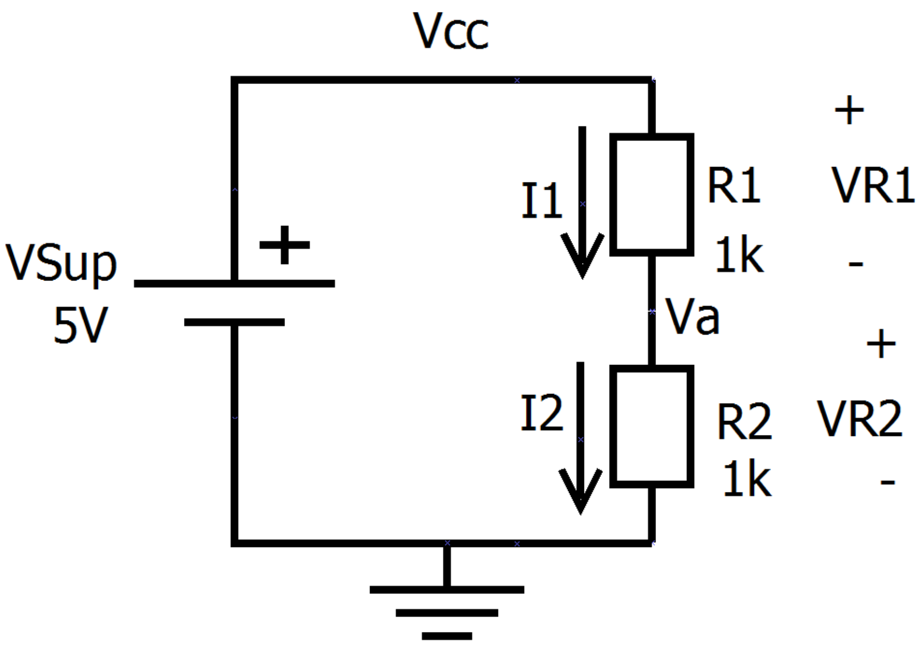
Vermogen is de hoeveelheid **energie** die **per seconde** ergens voorbij of heen gaat.
Intuitief voel je misschien al aan dat de hoeveelheid energie die het water per seconde kan overdragen aan het waterwiel, evenredig is met:

- De **hoeveelheid** water dat het wiel **per seconde** bereikt – de stroom.
  Bij electriciteit is dat: elektrische **stroom**
- De hoeveelheid potentiele **energie per hoeveelheid** water.
  Hoe hard het water tegen het wiel aan komt, hangt af van de hoogte waarvan het viel.
  De hoogte bepaalt dus de hoeveelheid energie per hoeveelheid.
  Bij electriciteit is dat: elektrische **spanning**

Omdat het vermogen evenredig is met beide, zal het je niet verbazen dat het gelijk is aan hun product: **P = I * V**

Elektrische Circuits

Elektrische Circuits / Electrische schema's/ Schakelingen laten ons zien hoe elektrische componenten met elkaar verbonden zijn. Daarnaast is er vaak extra informatie te vinden, zoals namen van de componenten, waardes van componenten, spanningen, stromen en symbolen zoals het "ground" symbool.



Component namen en waardes

In het bovenstaande schema zien we een voedingsspanning genaamd VSup met een waarde van 5V ("5 Volt"). Die voeding is verbonden met twee weerstanden, genaamd R1 en R2, elk met een waarde van 1kΩ ("1 kilo Ohm") (deze componenten worden verderop uitgelegd).

Stromen

Een **tak** is een **stroompad** door een electrische component. De **elektrische stromen** worden in de schemas getekend met een pijl en een variabele voor de stroom direct naast de **takken** waar ze doorheen stromen. In de bovenstaande figuur stroom electrische stroom I1 door weerstand R1, terwijl electrische stroom I2 door weerstand R2 stroomt. Als je denkt aan het analogon van water dat naar beneden stroomt, dan zal je niet verbaasd zijn dat I1 gelijk moet zijn aan I2. Het is gebruikelijk om de pijl te tekenen in de richting waarin je de stroom verwacht, omdat we het liefst denken in termen van positieve grootheden. Vandaar dat de pijlen voor de stroom richting ground getekend zijn. Dat is echter niet verplicht. Stel bijvoorbeeld dat je de pijl van I1 naar boven zou weergeven in plaats van naar beneden, dan zal uit je berekening volgen dat I1 een negatieve stroom is. Daar kun je dan alsnog aan zien welke kant de stroom daadwerkelijk op loopt.

Electrische verbindingen

Electrische componenten kunnen in een schema met elkaar worden verbonden via electrische verbindingen: “ideale stroomdraden”. Voorbeeld: een electrische verbinding (weergegeven met een **zwarte lijn** die de bocht om gaat) verbindt de bovenzijde van voedingsspanning VSup met de bovenzijde van weerstand R1.

Knooppunten

Knooppunten zie je in het schema **vaak niet** terug als een punt. Een knooppunt bestaat uit een verzameling electrische verbindingen die met elkaar verbonden zijn. In het bovenstaande circuit zijn er 3 knooppunten, die elk worden gerepresenteerd door slechts 1 electrische verbinding: De eerder genoemde verbinding tussen VSup en R1, de verbinding van R1 met R2 en de verbinding van R2 met VSup. Een knooppunt met meer verbindingen is ook mogelijk: Stel je voor dat de bovenzijde van VSup daarnaast ook zou zijn verbonden met een andere component, dan zou het bijbehorende knooppunt dus bestaan uit meerdere verbindingen. Die meerdere verbindingen kun je altijd zo tekenen (als je zou willen) dat ze **in een enkel punt** contact maken (dan teken je het knooppunt “**stervormig**”, zoals het heet). Zo beschouwd is het toch wel logisch om over knoop**punten** te spreken, toch? Bij elk knooppunt in een schema hoort zijn eigen zogenaamde **knooppuntsspanning**. Daarover straks meer.

Ground

Als je over hoogtes praat, is het handig om een referentieniveau te hebben, zodat je weet waar je het over hebt. Stel dat iemand zegt dat zijn slaapkamer zich op 3 meter hoogte bevindt, dan maakt het meestal uit of je als referentieniveau (het 0-niveau) de hoogte van de begane grond van het huis bedoelt, of de hoogte van de zeespiegel (N.A.P).

Met electrische spanningen is het om vergelijkbare redenen handig om een knooppunt uit te kiezen waarvan je de spanning als 0V referentie gebruikt.

In circuits wordt meestal het onderste knooppunt daarvoor gekozen (water stroomt immers ook naar “de bodem”). Meestal wordt dat aangegeven door dat knooppunt een “ground” symbool: ⏚ te verbinden.

Electrische Spanningen

In schemas kunnen spanningen op twee manieren worden weergegeven:

- Als **knooppuntsspanning**
  In dit geval wordt de spanning genoteerd <u>naast een knooppunt</u>, zoals Vcc en Va in de bovenstaande figuur. In dat geval is het een absolute waarde (nou ja, t.o.v. ground).

- Als **verschilspanning**
  Als de spanning genoteerd wordt naast een tak, dan gaat het om een verschilspanning, die het **verschil** is van de **knooppuntsspanningen** aan weerszijden van de tak. Met **een + en –** symbool wordt aangegeven welk van beide kanten van de tak als "positief" wordt beschouwd voor deze definitie.
- **Naamgeving** van **verschilspanningen**
  Een manier om verschilspanningen namen te geven is door de namen van knooppuntsspanningen te verwerken. Een verschilspanning tussen knooppuntsspanning V1 en V2 (bijvoorbeeld in de figuur met de spanningsbron, verderop) kan bijvoorbeeld V12 worden genoemd, of V1_2. Impliciet wordt daarmee bedoeld: (V1-V2).
  Een andere gebruikelijke manier is om de verschilspanning te benoemen, is door de naam te gebruiken van de component in de bijbehorende tak.

  Voorbeeld: VR1 is de verschilspanning over weerstand R1. Het is het verschil tussen spanning Vcc en Va. Omdat het plus-teken aan de Vcc kant staat, geldt hier: VR1 = Vcc – Va.
  Je zou ook plus en min teken kunnen verwisselen (even gummen en omgekeerd invullen). In dat geval zou gelden: VR1 = Va-Vcc.
  Beide is prima, maar omdat het makkelijker is om te denken over positieve verschilspanningen dan over negatieve, kiezen we de + en – kant in het algemeen zodanig dat de + staat bij de kant waar we een hogere spanning verwachten dan aan de andere kant.

Geheimpje

We denken bij het stromen van elektrische stromen van hoge naar lage spanning aan water, dat van hoog naar laag stroomt. Die stroom is feitelijk een zogeheten "logische stroom". Wat van hoge naar lage spanning stroomt, zijn eigenlijk "plekken waar een electron kan zitten". De electronen zelf stromen feitelijk de andere kant op, van min naar plus. Je kunt het vergelijken met belletjes in een fles cola (maar dan omgekeerd): Je spreekt over belletjes die opstijgen. Maar eigenlijk zijn die belletjes "plekken waar cola had kunnen zitten". Als een belletje omhoog gaat, gaat de cola er omheen naar beneden.

Enfin, als we denken over electrische stromen, dan denken we dus altijd in termen van de zogenaamde **logische stroom**, die stroomt **van hoge naar lage spanning**.

Electrische Componenten

In de takken van electronische circuits bevinden zich in het algemeen electrische componenten. In het bovenstaande voorbeeld hebben we al even kennis gemaakt met de weerstand en de ideale spanningsbron.

Componentvergelijkingen

Het gedrag van electrische componenten verwerken we door hun "componentvergelijkingen" op te schrijven. Bijvoorbeeld voor een weerstand is dat de wet van Ohm: V = I * R. Meer detail daarover volgt het hoofdstukje over de weerstand.

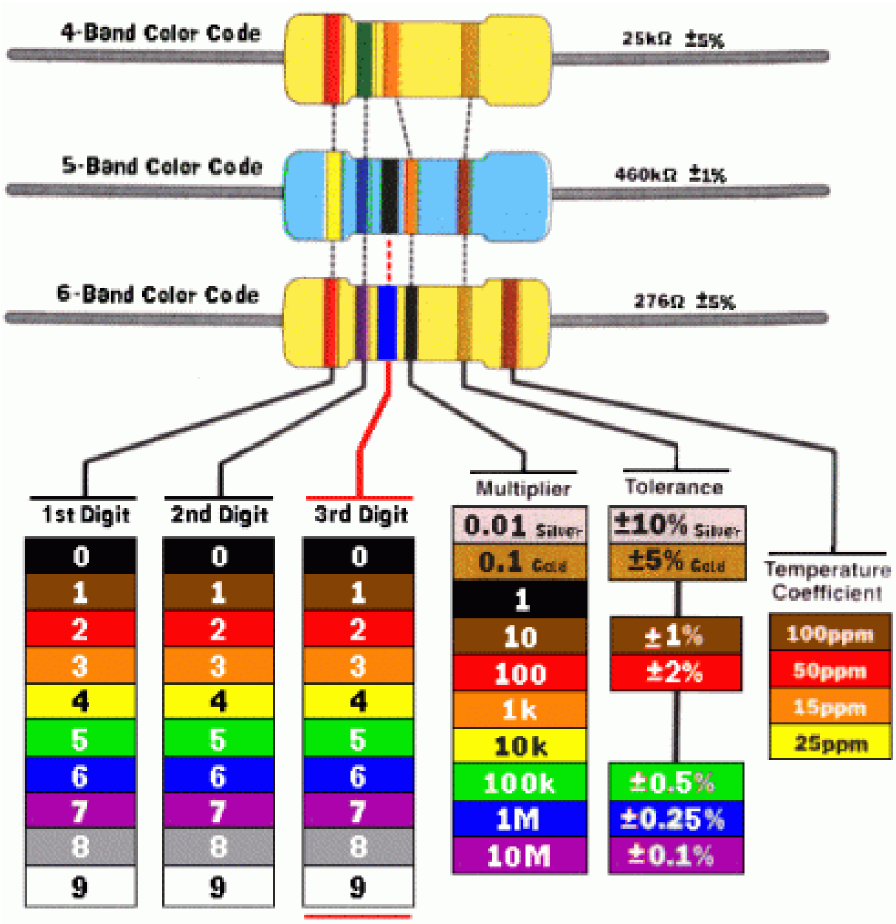
De Weerstand

De weerstand is een electrische component die “weerstand” biedt aan het stromen. In de weerstand wordt electrische energie in warmte wordt omgezet.

Het wordt gebruikt om de stromen in elektrische circuits te beperken/verminderen.

De weerstandswaarde wordt uitgedrukt in Ohm. De hoeveelheid Ohm van een weerstand wordt aangegeven met een kleurcode.

Kleurcode



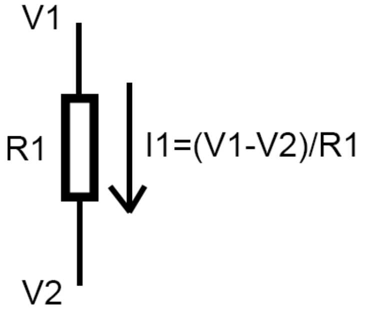
Voorbeeld: Bij de bovenste weerstand wordt een 4-bands codering gebruikt.

- De rode band komt overeen met het eerste cijfer: 2.
- De groene band komt overeen met het tweede cijfer: 5.
- De oranje band komt overeen met de multiplier.
  Oranje staat voor 3, dus de multiplier is 10^3, ofwel 1000.

- De gouden band geeft een de tolerantie weer: 5%

Samengevat: de weerstand heeft een waarde van 25 maal 1000 Ohm, ofwel 25 kiloOhm, ofwel 25 kOhm, ofwel 25kΩ, met een tolerantie van 5%.
Dat betekent dat de werkelijke waarde van de weerstand maximaal 5% kan afwijken van de gespecificeerde waarde.

Componentvergelijking van de weerstand



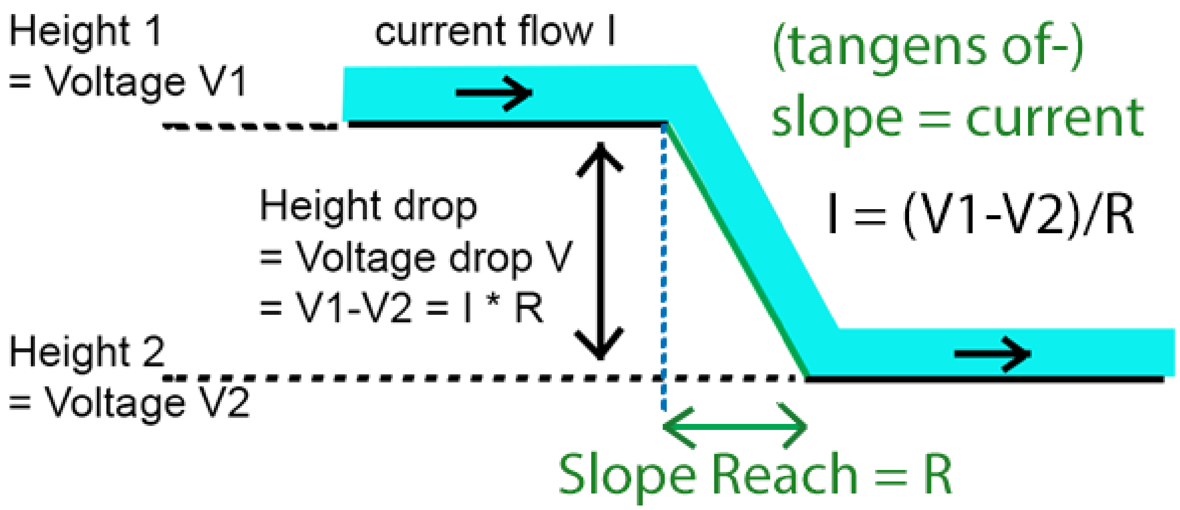
De componentvergelijking volgt "De wet van Ohm": $V = I * R$

Waar:
- R = de "weerstandswaarde" [Ω] (=Ohm)
- I = de stroom die door de weerstand stroomt in Amperes.
- V = de spanningsval (het spanningsverschil) dat voortkomt uit I en R, in Volt.

De formule werkt (zoals altijd met formules) alle kanten op:
- Als je de stroom door een weerstand weet, kun je met bovenstaande formule de spanningsval over de weerstand berekenen.
- Als je de spanningsval over een weerstand weet, kun je met dezelfde formule (omgeschreven) de stroom door de weerstand berekenen: I = V/R
- Als je zowel de spanningsval over een weerstand weet als de stroom erdoorheen, kun je met dezelfde formule (omgeschreven) de waarde van de weerstand berekenen: R = V/I

Analogon voor een weerstand met water

In ons watermodel is het **horizontale bereik van een helling** in de rivier een analogon voor weerstand**.** Als het bereik klein is, is de helling groot, en valt het water ongehinderd naar beneden (als bij een waterval). Er is dan geen weerstand. Als het bereik groot is, moet het water een grote afstand afleggen langs een rivierbedding. Het stroomt dan veel langzamer, langs de flauwe helling naar beneden.



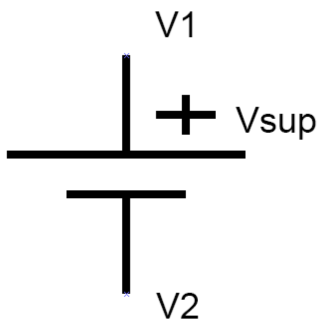
- De waterstroom is evenredig met (tangens van de) helling: des te stijler de helling, des te sneller stroomt het water.
  (uit de wiskunde: tangens van een hoek = overliggende rechthoekszijde gedeeld door aanliggende rechthoekszijde. In het bovenste voorbeeld is de tangens van de hoek die de helling maakt met de grond : hoogteverschil gedeeld door horizontale bereik. In het electrische domein is dat spanningsverschil gedeeld door weerstand)
- De helling, en daarmee dus de stroom hangt dus niet alleen af van het bereik (=R in electrisch domein), maar ook van het hoogteverschil (=spanningsverschil in electrisch domein).

In veel literatuur zie je als analogon ook vaak een buis terug met een versmalling. Hoewel die qua formules niet helemaal overeenkomt, is het ook prima om dat als analogon te hanteren.

Zolang je maar aanvoelt dat bij eenzelfde spanningsverschil (hoogteverschil) de stroom minder wordt als de weerstand groter is, en de formules in het electrische domein goed kunt toepassen.

De spanningsbron

Een ideale spanningsbron gebruikt aangevoerde energie van elders om het voltage van de electronen te verhogen.



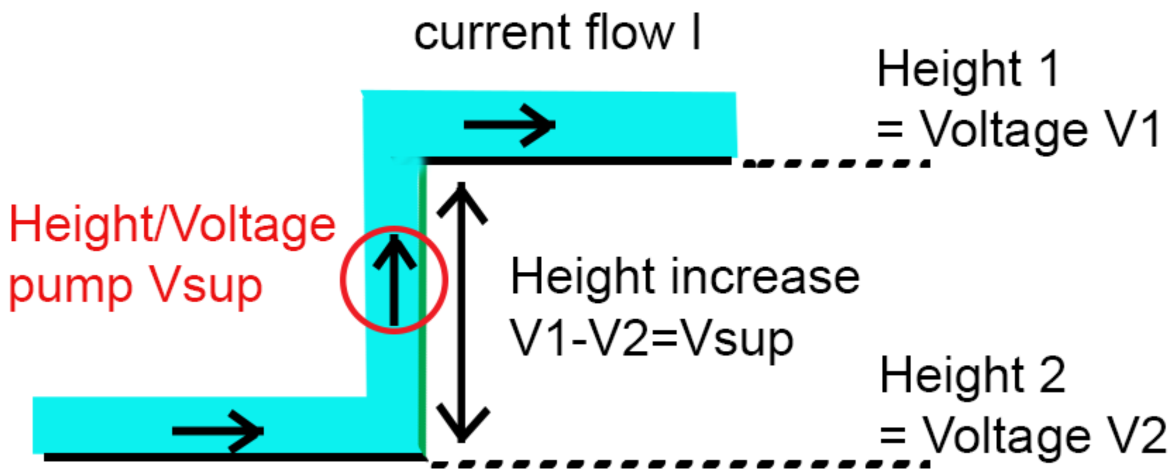
De componentvergelijking van de spanningsbron is: $V1 - V2 = Vsup$

Normaal gesproken nemen we impliciet aan dat een spanningsbron met de naam Vsup een spanningsverschil creeert met de (dezelfde naam) naam Vsup.

Analogon voor een spanningsbron met water

Het analogon van een ideale spanningsbron met water is een **pomp**. Door middel van energie van elders wordt de energie van water verhoogd door het naar een hoger niveau te pompen.

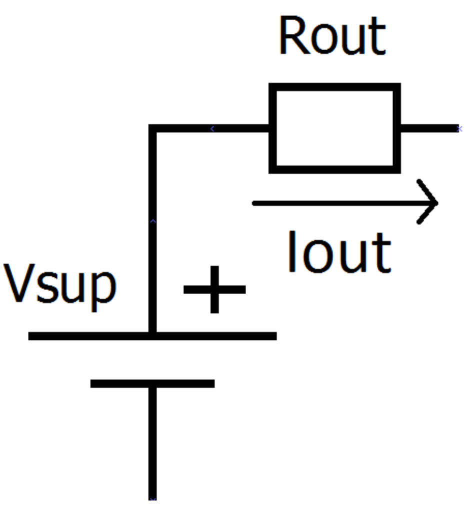
Een spanningsbron is dus een soort “elektronenpomp”, die elektronen van laag voltage (“lage hoogte”) oppompt naar een hoger voltage (“hoge hoogte”), zodat er weer energie in zit. In het geval van een batterij is die energie afkomstig uit chemische energie van moleculaire bindingen.



Niet-ideale spanningsbronnen

In de praktijk bestaan ideale spanningsbronnen niet. Realistische spanningsbronnen kunnen gemodelleerd worden als een ideale spanningsbron met een “uitgangsweerstand” in **serie geschakeld.**

(**serie** = “kop aan kont” doorverbinden. Daarnaast bestaat er ook nog **parallel** = naastgelegen componenten “**kop aan kop** en **kont aan kont**” met elkaar verbinden)



Volgens de wet van ohm neemt de spanningsval over weerstand Rout toe naarmate er meer stroom Iout doorheen stroomt: VRout (het spanningsverschil tussen linker en rechter kant) moet dus gelijk zijn aan Iout * Rout. Vergelijk spanningsval in het water-analogon gelijk aan verlies aan hoogte. Aan de rechter kant van de weerstand is de spanning (hoogte) dus lager dan aan de linkerkant. De rechterkant van de weerstand is de plek/aansluitklem waar we iets (een zogenaamde **belasting**) aansluiten. Kortom, bij een realistische, niet-ideale voedingsspanning, zakt de klemspanning in, naarmate er meer stroom uit wordt getrokken.

Voorbeeld: Stel je hebt een batterij van 4,5V, die al een beetje leeg is, waardoor de uitgangsweerstand is toegenomen naar 10. Als je daar een belasting aan hangt (bijvoorbeeld een Arduino) die een stroom van 100mA (100 milli Ampere) gebruikt, dan wordt de spanning op de klem van de batterij: 4.5V – 10 Ohm * 0.1 A = 4.5V – 1V = 3.5V. Als je Arduino een minimale spanning van bijvoorbeeld 4.2V nodig heeft, dan kan hij in zo'n geval dus niet meer goed functioneren.
(Kun jij berekenen hoe groot de uitgangsweerstand van die batterij maximaal mag zijn opdat de Arduino nog net kan functioneren?)

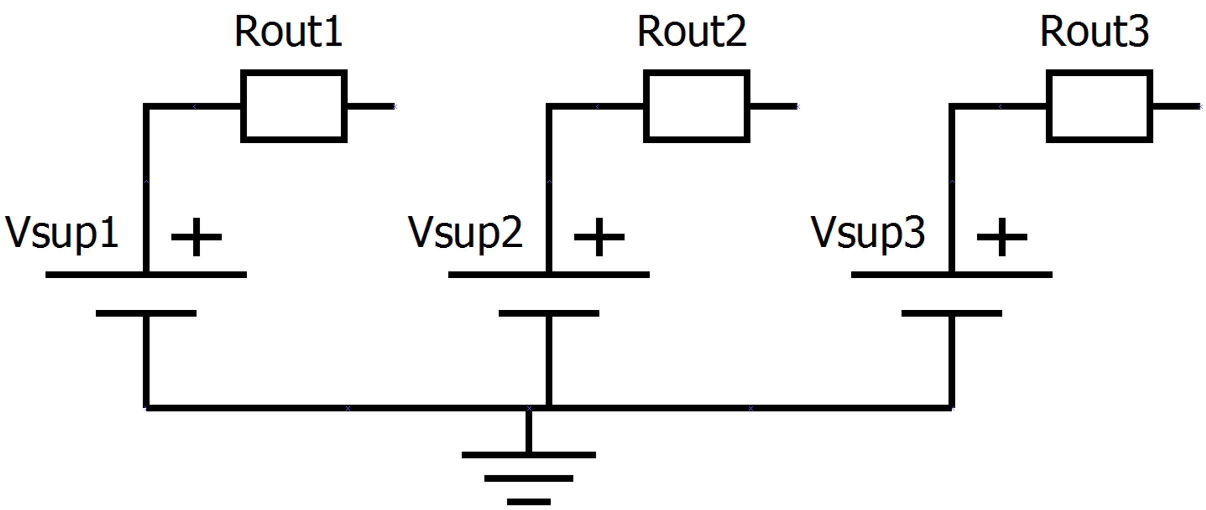
Gebruik je meerdere spanningsbronnen aan? Verbind dan hun onderzijdes met ground!

Soms wil je meerdere spanningsbronnen combineren.

Bijvoorbeeld:

- Een goede kwaliteit spanningsbron voor je microcontroller.
- Een spanningsbron die veel stroom kan leveren voor je servos.
- Sensoren kunnen uitgangen hebben die zich gedragen als spanningsbronnen.

Normaalgesproken, als je meerdere spanningsbronnen gelijktijdig wilt gebruiken, is het handig om de spanningen die ze maken allemaal te laten werken ten opzichte van dezelfde referentie: de spanning van het "ground" knooppunt (0V). Om dat te bereiken knoop je hun negatieve kanten aan elkaar, zoals in het onderstaande circuit:



Kirchhoff

Een zekere heer Kirchhoff heeft zichzelf ooit onsterfelijk gemaakt met het postuleren van twee eenvoudige wetten: De **stroomwet van Kirchhoff** en de **spanningswet van Kirchhoff**.

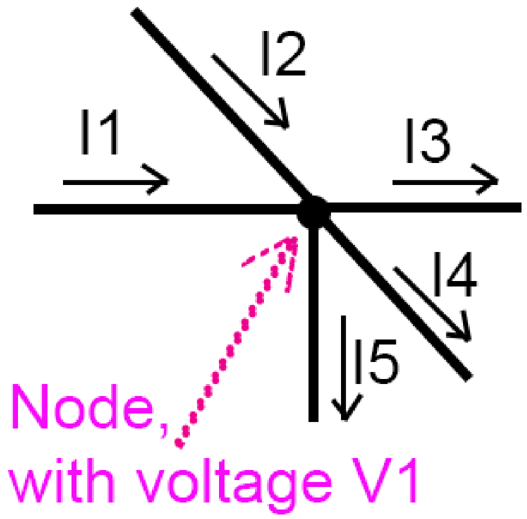
De stroomwet van Kirchhoff

*De som van alle stromen die naar een knooppunt **toe** stromen is **gelijk** aan de som van stromen die van dat knooppunt **vandaan** stromen.*

Een alternatieve om hetzelfde te zeggen, is: *De som van **alle** stromen die naar een knooppunt toe stromen is nul*. NB: Stromen die van het knooppunt wegstromen kun je zien als negatieve stromen naar het knooppunt toe.

Intuitief is het een heel logische wet: knooppunten zijn slechts "kruispunten" voor stromen. Er wordt niets in opgeslagen of zo. Daarom moet alles wat er naartoe stroomt, er (via andere paden) meteen weer vandaan stromen.

Voorbeeld:



Volgens de stroomwet van Kirchhoff moet in de bovenstaande figuur de volgende vergelijking gelden:
I1 + I2 = I3 + I4 + I5

Ook geldig voor vermogensstromen

De stroomwet van Kirchhoff geldt naast voor electrische stromen ook voor vermogensstromen.

Als je linker en rechter zijde van de bovenstaande vergelijking vermenigvuldigt met knooppuntsspanning V, krijg je de volgende vergelijking:
I1*V + I2*V = I3*V + I4*V + I5*V

Omdat geldt dat P = I * V, kun je die vergelijking herschrijven als:
P1 + P2 = P3 + P4 + P5

Kirchhoffs stroomwet geldt dus ook voor vermogensstromen. Gezien vanuit het oogpunt van de wet van behoud van energie is dat niet verwonderlijk: de hoeveelheid energie per seconde die ergens naartoe stroomt moet natuurlijk evenveel zijn als die van wat er vandaan stroomt, anders zou er nieuwe energie uit het niets moeten ontstaan (of verdwijnen in het niets).

De spanningswet van Kirchoff

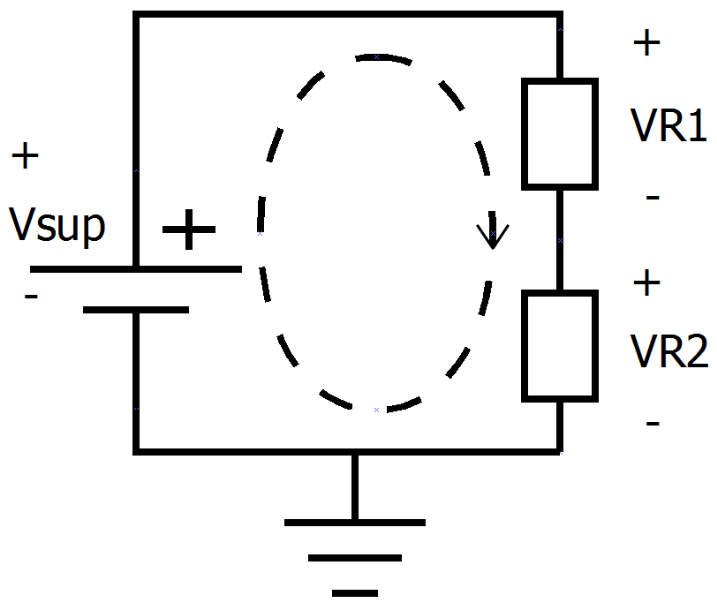
Als je rondloopt in een "lus van aaneengeschakelde takken" van een electrisch circuit, dan is de som van de spanningsverschillen die je omhoog gaat op die route gelijk aan de som van de spanningsverschillen die je omlaag gaat.

Een alternatieve manier om hetzelfde te zeggen, is: *De som van de spanningsverschillen in een electrische lus is altijd gelijk aan nul*.

Ook dit is een heel logische wet. Denk maar aan hoogtes als analogon voor voltages. Als je in een berglandschap een rondwandeling gaat maken, en je komt uiteindelijk weer op dezelfde plek terug, dan moet het wel zo zijn dat de som van alle stappen die je omhoog bent gegaan, gelijk moet zijn aan de som van alle stappen die je naar beneden bent gegaan.

Voordat je de spanningswet van Kirchoff toepast, is het een goed gebruik om de betreffende spanningslus in te tekenen, zoals is gebeurt in het onderstaande circuit.

Voorbeeld:



Laten we ons pad beginnen bij de ground node. We klimmen aan de linker kant eers met een spanningsverschil Vsup omhoog, en vervolgen met een afdaling met het spanningsverschil VR1, gevolgd door spanningsverschil VR2. Volgens de spanningswet van Kirchoff moet de som van alle spanningsverschillen op ons pad door de lus gelijk zijn aan nul. Dus moet er gelden:

Vsup - VR1 - VR2 = 0

Als we bij deze vergelijking links en rechts VR1 en VR2 optellen, krijgen we:
Vsup - VR1 - VR2 +VR1 +VR2 = VR1 + VR2

VR1 en -VR1 heffen elkaar op aan de linkerkant. Hetzelfde geldt voor VR1 en VR2. Dus resulteert:
Vsup = VR1 + VR2

Omgeschreven naar deze vorm herkennen we de alternatieve formulering van Kirchhoffs spanningswet, dat de som van wat we omhoog zijn gegaan, gelijk moet zijn aan de som van wat we naar beneden zijn gegaan.

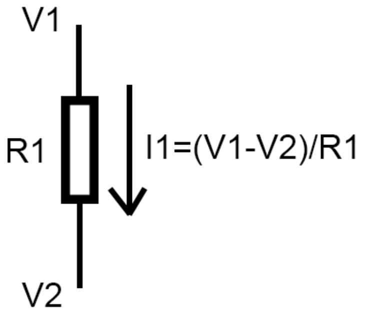
Vermogensstromen

Eerder zagen we al de wet voor vermogensstroom: P = I * V.
Vermogensstroom kun je zien als de hoeveelheid “Potentiele Energie per Seconde” voorbij stroomt.

Vermogensverlies in een weerstand

Wat betekent de wet P = I * V voor een weerstand?

Bekijk nog eens de volgende figuur:



Als er een stroom door weerstand R1 loopt, valt er volgens de wet van Ohm een spanning over van VR1 = (V1-V2)/I1

De spanningsval (“hoogte afname”) zorgt ervoor dat de potentiele energie van de ladinsdragers die voorbijstromen per seconde, afneemt.

Dat betekent dat na de spanningsval (onder de weerstand) minder electrisch vermogen de weerstand uitstroomt dan er aan de bovenkant instroomde.

De vermogensstroom die de weerstand aan de bovenkant in gaat, is:
P1 = I1 * V1

De vermogensstroom die de weerstand aan de onderkant uit stroomt (na de spanningsval dus), is:
P2 = I2 * V2

Dus de hoeveelheid electrische energie die per seconde in de weerstand verloren is gegaan, het vermogensverlies Pdiss, is:

Pdiss = P1-P2 = I1*V1 – I2*V2 = (V1-V2)*I

Gebruikmakend van de wet van Ohm kun je dit resultaat ook nog op de volgende manieren opschrijven (probeer dat zelf ook):
Pdiss = $(\Delta V)^2$/R en Pdiss = $I1^2$*R (met ΔV = V1-V2, de spanningsval over de weerstand)

Volgens de wet van behoud van energie kan die energie niet verloren gegaan zijn. De verdwenen electrische energie is omgezet in thermische energie (warmte), ofwel “gedissipeerd”. Een weerstand kun je dus zien als een klein kacheltje. Als je bij de Action een broodrooster of electrische kachel koopt, zit er normaalgesproken niet veel meer in dan een (verstelbare) (draad-) weerstand, die met de 220V voeding wordt verbonden.

NB: conform de stroomwet van Kirchhoff geldt wel nog steeds dat het aantal electronen dat voorbij komt bij bovenzijde en onderzijde van de weerstand, gelijk is: I1 = I2.

Vermogensverlies in een tak, in het algemeen

In het bovenstaande werd toevallig een weerstand genomen. Hetzelfde verhaal kun je houden voor de vele andere componenten: diodes, leds, transistoren. Alleen kun je dan niet omschrijven naar de alternatieve formules die gebaseerd zijn op de wet van ohm – die zijn specifiek voor weerstanden.

Conclusie

Het vermogensverlies is in het algemeen gelijk aan de **stroom** die erdoor gaat, **vermenigvuldigd** met de **spanningsval** er over, en komt vrij als **warmte**.

Uitzonderingen

Uitzonderingen daarop zijn de **condensator**, **spoel** en **transformator**.
In het eerste geval omdat er geen electronen van de ene kant aan de andere kant van de condensator kunnen komen (details volgen later).
In het laatste geval omdat via spoelen energie uit het electrische domein kan worden omgezet naar energie in het magnetische domein.

Parallel geschakelde weerstanden

Een set parallel geschakelde weerstanden gedraagt zich samen al seen “vervangingsweerstand” Rr met de volgende waarde:

$$Rr = \frac{1}{\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{..etc}}$$

De term “vervangingsweerstand” houdt in dat je de oorspronkelijke set weerstanden zou kunnen vervangen door een enkele “vervangingsweerstand”, zonder dat dat consequenties heeft voor de werking van (de rest van-) het circuit.

Een appendix laat zien hoe je zelf de bovenstaande formule zou kunnen afleiden met behulp van de wetten van Kirchhoff en de wet van Ohm.

Serieweerstand

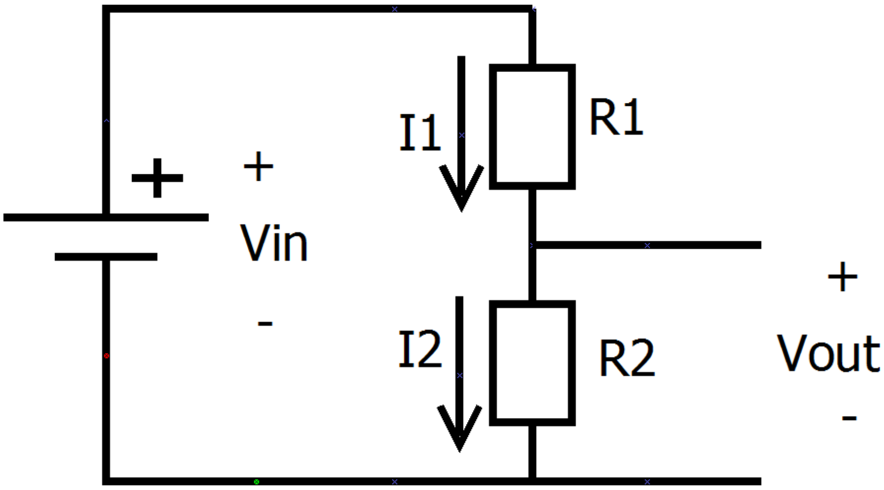
In serie geschakelde weerstanden kunnen ook vervangen worden door een “vervangingsweerstand” Rr (r van replacement):

$$Rr = R1 + R2 + etc..$$

De vervangingsweerstand is dus gelijk aan de som van de weerstanden die in serie staan.

Spanningsdeler

Onderstaande figuur laat een veel voorkomend circuit zien. Het is een spanningsdeler zien, ook wel "weerstandsdeler" genoemd. Het bestaat uit twee in serie geschakelde weerstanden.



Zoals we weten, stroomt de logische electrische stroom van hoge naar lage spanning (zoals water van hoog naar laag stroomt – hoogte van water is te vergelijken met electrische spanning). Verder weten we dat we weerstanden kunnen zien als rivierbeddingen met een bepaalde helling. Het spanningsverschil over weerstand R2 noemen we hier Vout.

In water termen: het water is via rivierbedding R1 al een eind naar beneden gestroomd vanaf hoogte Vin. Vout, de resterende hoogte, stroomt het naar beneden via rivierbedding R2.

Vout is dus slechts een deel van de spanning van Vin. Vandaar de naam spanningsdeler.

De verzwakking (engels: attenuation) die hoort bij deze spanningsdeler is:

$$att = \frac{Vout}{Vin} = \frac{R2}{R1 + R2}$$

Deze formule kun je ook makkelijk zelf afleiden. Een appendix laat zien hoe.

Voorbeeld: een 5.0V uitgang aansluiten op een 3.3V ingang

Stel, je wilt de uitgang van een Arduino Nano aansluiten op de ingang van een ESP.
De uitgang van de Arduino Nano kan 5V worden. De ingang van een ESP mag niet boven de 3.3V komen, anders kan de ESP kapot gaan. Wat nu?

Je raadde het al – gebruik een spanningsdeler om ze met elkaar te matchen:

We willen een verzwakking att = 3.3V/5V = 0.66.
Er moet gelden:
att = R2 / (R1+R2)   (met att = 0.66, maar dat vullen we later pas in)

Welke waarden voor R2 en R1 moeten we daar nu voor gebruiken?
Om dat te weten, willen we bovenstaande vergelijking herschrijven zodat R1 of R2 aan een kant staat.

Ik kies (willekeurig) voor R2.

In onze vergelijking komt R2 nog in een noemer (R1+R2) voor. Als we R2 willen weten, moeten we die noemer eerst wegwerken. Dat doen we door linker en rechterkant van de vergelijking te vermenigvuldigen met die noemer:

$$\mathrm{att} * (\mathrm{R1} + \mathrm{R2}) = \frac{\mathrm{R2}}{(\mathrm{R1} + \mathrm{R2})} * (\mathrm{R1} + \mathrm{R2})$$

Immers, een vergelijking is een bewering dat het linker deel gelijk is aan het rechter deel van een = teken. Dat blijft gelden als je linker en rechter deel met hetzelfde vermenigvuldigt. Voorbeeld: als we $2 = \frac{10}{2+3}$ links en rechts vermenigvuldigen met 5, dan wordt dat $2 * 5 = \frac{10}{2+3} * 5$, hetgeen nog steeds klopt.

Aan de rechter kant zien we nu dat we R2 delen door (R1+R2), maar vervolgens ook weer vermenigvuldigen met (R1+R2). Dat heft elkaar op (getallenvoorbeeld: $\frac{2}{(3+4)} * (3+4) = 2$).

We kunnen bovenstaande vergelijking dus herschrijven tot:

$$\mathrm{att} * (\mathrm{R1} + \mathrm{R2}) = \mathrm{R2}$$

Haakjes uitvermenigvuldigen levert:

$$\mathrm{att} * \mathrm{R1} + \mathrm{att} * \mathrm{R2} = \mathrm{R2}$$

Links en rechts att*R2 er vanaf trekken levert:

att * R1 = R2 - att * R2
R2 buiten haakjes halen levert:
att * R1 = (1 - att) * R2
Om R2 helemaal apart te schrijven, delen we linker en rechter deel van de vergelijking door (1-att):

att * R1 / (1-att) = (1 - att) * R2 / (1 - att)
Omdat bij vermenigvuldigen en delen de volgorde niet uitmaakt, is dat gelijk aan:

$$\frac{\mathrm{att}}{1 - \mathrm{att}} * \mathrm{R1} = \frac{1 - \mathrm{att}}{1 - \mathrm{att}} * \mathrm{R2}$$

<->

$$\frac{\mathrm{att}}{1 - \mathrm{att}} * \mathrm{R1} = \mathrm{R2}$$

Kortom, we kunnen elke gewenste verzwakking att bereiken, als we R2 een factor att/(1-att) maal zo groot kiezen als R1.

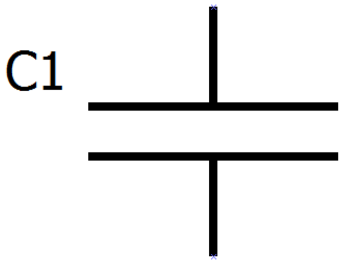
In ons voorbeeld van het matchen van de 5Volt output van de Arduino Nano met de 3.3V input van de ESP, willen we een verzwakking met factor att = 0.66.

In dat geval moet dus gelden:

R2 = 0.66/(1-0.66) * R1
<->
R2 = 1.94 * R1
Stel bijvoorbeeld dat we R1 = 1.1kOhm kiezen, dan hebben we dus R2 = 2.1kOhm nodig.
De 2.1kOhm weerstand komt niet voor in een gangbare weerstandsreeks. Je zou hem bijvoorbeeld kunnen maken door een 2.0kOhm weerstand in serie te zetten met een 100 ohm weerstand.

De condensator

Een condensator kun je zien als een “vat” waar je electrische lading in kunt opslaan.



Zijn componentvergelijking is:

$$C = Q / V \ [F]$$

Met:

- C = capaciteit
- Q = electrical lading (in Coulomb)
- V = spanning (in Volts)
- F = Farad, de **eenheid** van capaciteit

Met deltas

Zoals met alle lineaire formules, geldt hetzelfde voor verschillen.

Omdat geldt: C = Q/V
Geldt dus automatisch ook: **C = ΔQ/ΔV**

Δ staat voor “een kleine verandering”, een “verschil”, een “toename”.

In andere woorden: de capaciteit van een condensator is de hoeveelheid Coulombs aan lading die je in het vat kunt gieten voordat dat spanning toeneemt met 1V.

Je kunt het vergelijken met het waterdomein: hoeveel water kun je in een vat gieten voordat de hoogte van het waterpeil in het vat met 1 meter toeneemt?

NB: De capaciteit is evenredig met de breedte van het vat.
Een condensator bestaat uit 2 metalen platen tegenover elkaar. Ook daarbij is de capaciteit evenredig met de breedte.

In tegenstelling van wat je misschien van het woord capaciteit verwacht is het is dus **NIET** de totale hoeveelheid lading die pas op een condensator.

Maximum spanning

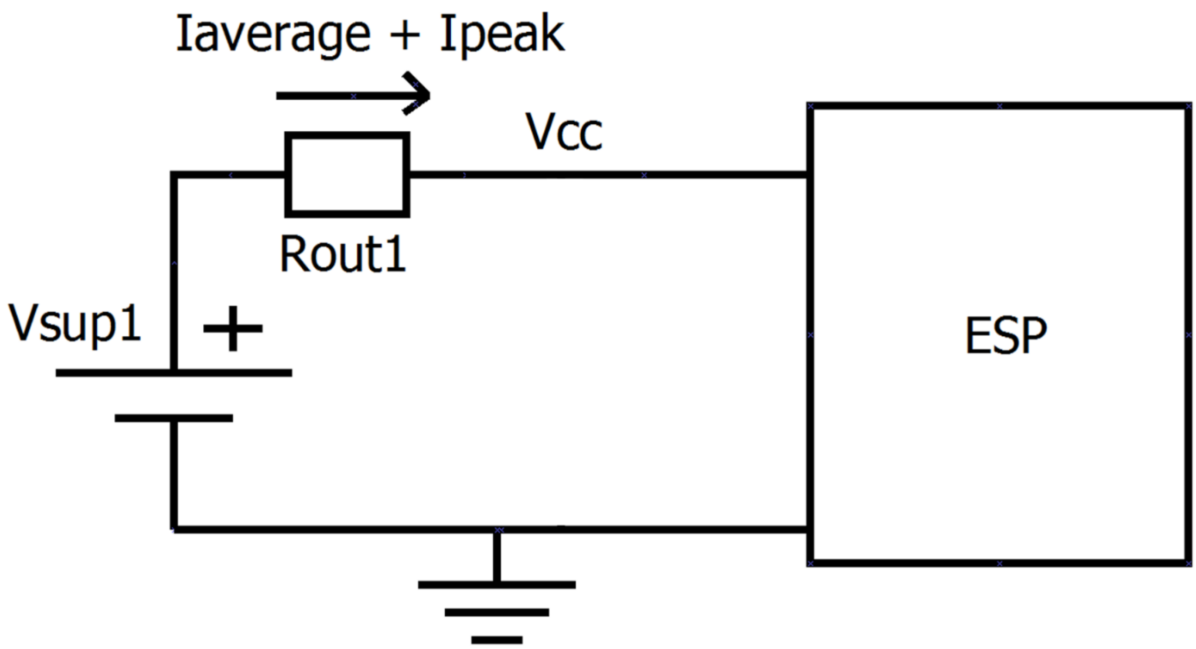
Het vat in het bovenstaande plaatje heeft een bepaalde hoogte. Die begrenst tot hoe hoog hij gevuld mag/kan worden.

Bij een condensator is er iets soortgelijks. Elke condensator heeft een maximum toegestane spanning die er op gezet mag worden (door het met lading te vullen). Als je die maximum spanning overschrijdt, gaat de condensator kapot. Controleer dus altijd de maximum toegestande spanning van je condensator, voordat je hem toepast in een schakeling.

De condensator gebruiken als buffer

We zagen eerder al dat een realistische voedingsspanning gemodelleerd kan worden als een ideale spanningsbon met een uitgangsweerstand in serie, en dat daardoor de klemspanning van die voeding inzakt naarmate er meer stroom uit getrokken wordt.

Het onderstaande schema laat een ESP zien die is aangesloten op zo’n realistische voeding. De ESP trekt een gemiddelde stroom ter grootte van Iaverage.
Daarbovenop trekt het af en toe heel kort, stroompieken ter grootte van Ipeak.



Getallenvoorbeeld:

- Vsup1 = 3.3V
- Rout1 = 1 Ohm
- Iaverage = 100mA

- Ipeak = 500mA.
  Zo'n piekstroom duurt 1ms, en komt eens per 100ms voor.
- Vcc, de voeding van de ESP moet tussen de 3.0V en de 3.3V liggen.
  Beneden de 3.0V schakelt hij zichzelf uit.

Op momenten dat er geen piekstroom loopt, is de spanningsval over Rout volgens de wet van ohm gelijk aan:

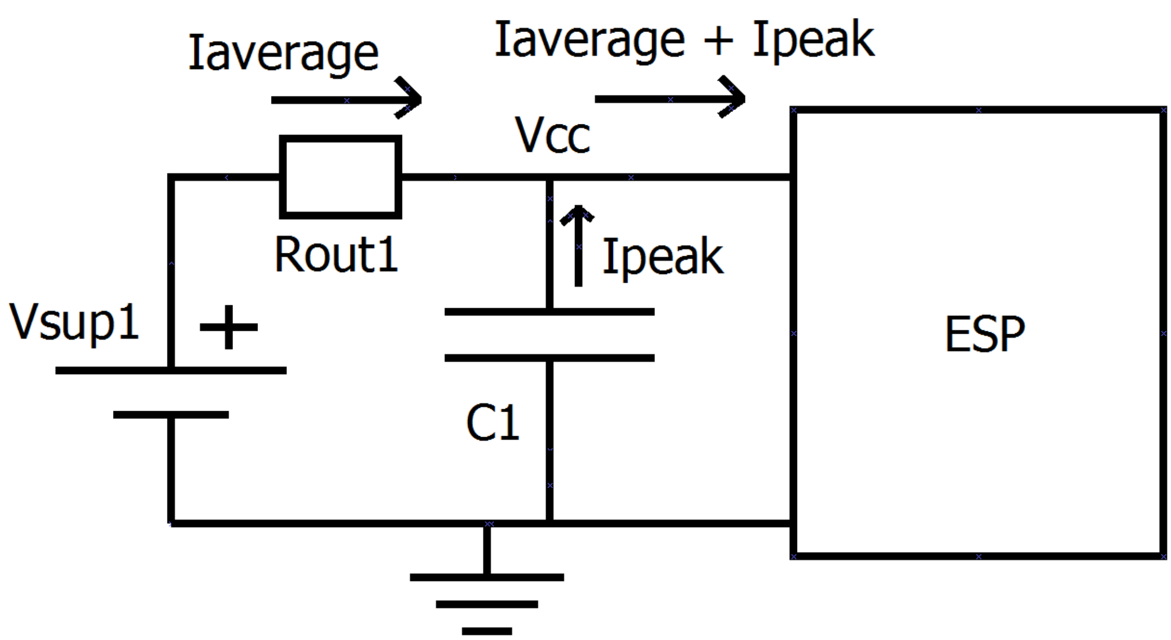
Vrout1_av = Iaverage * Rout
<->
Vrout1_av = 0.1 A * 1 Ohm = 0.1V

Dus moet in die situatie gelden voor vcc:
vcc_av = Vsup – Vrout1_av = 3.3V – 0.1V = 3.2V
3.2V ligt tussen de 3.0V en de 3.3V, dus de ESP is blij.

Stel nu dat er bovenop de gemiddelde stroom nog de piekstroom van 0.5A loopt.
In die situatie moet gelden:
Vrout1_peak = (0.1A + 0.5A) * 1 Ohm = 0.6V
vcc_peak = Vsup – Vrout1_peak = 3.3V – 0.6V = 2.7V
2.7V is minder dan 3.0V. De ESP schakelt zichzelf dus uit bij de eerste de beste piek.
Hoe lossen we dat op?

Een mogelijkheid is om een "zwaardere"/duurdere voeding te kopen, met een lagere uitgangsweerstand. Kun jij uitrekenen hoe laag die uitgangsweerstand zou moeten zijn?

Een veel goedkopere (en dus betere) mogelijkheid is een condensator als buffer aan vcc te hangen.
Het onderstaande circuit laat de nieuwe situatie zien.



In deze situatie zal vcc veel minder inzakken als de piekstroom optreedt, als C1 groot genoeg is.
Je kunt C1 zien als een grote bak water. Als daar veel water per seconde uit wordt gehaald, maar voor slechts heel even, gaat het om niet al te veel water vergeleken de grootte van de bak. Het waterniveau zal tijdens zo'n piekstroom dus amper dalen. De spanning vcc zal dus amper veranderen door de piekstroom. Anders geformuleerd: de condensator levert de piekstroom aan de ESP. De weerstand levert de gemiddelde benodigde stroom voor de ESP, plus uitgesmeerd over de tijd een klein beetje extra stroom dat gebruikt wordt om de lading (het water) aan te vullen dat tijdens de piek uit de condensator werd getrokken.

Hoe groot moeten we de condensator kiezen zodanig dat de ESP zich bij de stroompieken niet uitschakeld?

1. De hoeveelheid lading die tijdens de piekstroom uit de condensator wordt getrokken, kunnen we berekenen met de formule die lading in verband brengt met stroom:
   $I = \Delta Q / \Delta t$
   Door links en rechts met Δt te vermenigvuldigen, kunnen we dit herschrijven tot:
   $\Delta Q = I * \Delta t$
   De hoeveelheid lading die tijdens de piekstroom uit de condensator wordt getrokken, is in ons geval dus:
   $\Delta Q_{peak} = I_{peak} * \Delta t\_peak$
   <-> $\Delta Q_{peak} = 0.5A * 0.1ms = 0.05mC$ (0.05 milliCoulomb, ofwel 50 microCoulomb)
2. We kunnen nu berekenen hoe groot de condensator ten minste moet zijn om te zorgen dat de ESP altijd netjes blijft werken.
   We weten al van een eerdere berekening dat zonder de stroompiek geldt: $Vcc\_av = 3.2V$
   Wij een stroompiek mag de spanning dus nog met 0.2V inzakken, voordat de grens van 3.0V bereikt wordt.

   We willen dus een condensator die bij een $\Delta Q = 0.05mC$ ladingverlies inzakt met $\Delta V = 0.2V$.
   We gebruiken de componentvergelijking voor de condensator: $C = \Delta Q / \Delta V$.
   $C = 0.05mC / 0.2V = 0.25mF = 250uF$ (250 micro Farad).

   In de praktijk ben je liever "safe than sorry", dus kies je een grotere waarde dan je hebt uitgerekend. Bruikbare opties uit de standaardreeks zijn in dit geval bijvoorbeeld 330uF en 470uF. NB: je wilt de condensator ook weer niet heel veel groter kiezen dan nodig, omdat dat duurder is.

Conclusie
Als je te maken hebt met grote, doch korte piekstromen, dan hoef je toch geen last te hebben van grote voedingsdips, mits je een voldoend grote condensator als buffer gebruikt.

Twee condensatoren parallel: iets doen tegen inductie
In de praktijk spelt "inductie" binnen grote condensatoren een rol. Inductie is een wisselwerking tussen het elektrische domein en het magnetische domein. Het ontstaat als stroom loopt door draden en spoelen.

Je kunt het vergelijken met de massatraagheid van water. Als je water snel heen en weer wil laten bewegen, kost dat nogal wat moeite, vooral als het om veel water gaat.

In het electrisch domein zie je iets soortgelijks terug. Des te sneller stromen snel willen veranderen (zoals bij piekstromen), des te meer “serieweerstand” er uit het niets lijkt te ontstaan.

Door de manier waarop ze opgebouwd zijn (met lange opgerolde lagen aluminium, bijvoorbeeld), hebben grote condensators meer last van inductie dan kleinere condensators.

In het bovenstaande voorbeeld leek het alsof we met een 330uF condensator klaar waren.
Die condensator is waarschijnlijk effectief om de bulk van de piek mee af te vlakken.
Alleen, als het begin van de piek heel stijl is, verandert de stroom daar veel, en krijgt de condensator door inductie op die flank een serieweerstand. Daardoor eet hij die flank van de piek niet meteen helemaal op, en krijg je alsnog een ultra-korte spanningsdip.

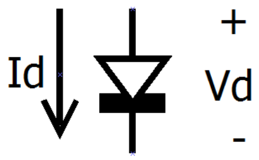
Een effectieve oplossing is om in de praktijk meerdere condensators parallel te schakelen. Meestal is volstaat een tweede condensator op een duizendste van de grote condensator.

Bijvoorbeeld een condensator van 330nF (nano Farad), parallel aan de condensator van 330uF.

De grote 330uF is in staat de bulk van de stroompiek op te eten. De 330nF is beter in staat om de korte flanken van die piek op te eten.

De diode

De onderstaande figuur laat het symbool van de component “diode” zien. Het heeft twee aansluitpunten. Het bovenste aansluitpunt heet “anode”, het onderste “kathode”.



In de meeste gevallen kan het gedrag van de diode als volgt worden samengevat:

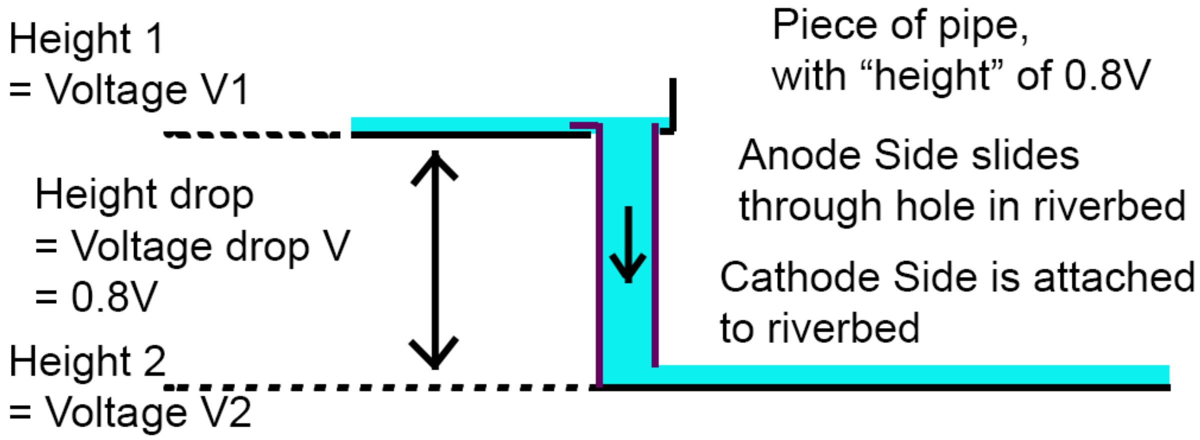
- Als de diodespanning Vd kleiner is dan pakweg 0.8V (of zelfs negatief is), dan is de stroom Id door de diode praktisch gelijk aan 0. Dan is het voor de rest van het circuit dus net of de diode er niet is.
  Stroom stroomt altijd van plus naar min. Het voorgaande betekent dus ook dat de stroom door de diode alleen kan lopen van anode naar kathode. Nooit andersom.
- **Als** er een “praktische”(niet absurd klein of groot) stroom Id door de diode stroomt, dan mag je bij benadering aannemen dat de spanningsval Vd over de diode pakweg 0.8V is.
  Voorbeelden:
  Gegeven: Id = 50uA, wat is Vd? Antwoord: 0.8v
  Gegeven: Id = 100mA, wat is Vd? Antwoord: 0.8v
  Gegeven: Id = 500mA, wat is Vd? Antwoord: 0.8v
  Gegeven: Id = -100mA, wat is Vd? Antwoord: De vraag klopt niet: de stroom kan alleen van anode naar kathode lopen.

De genoemde waarde van 0.8V is correct voor de meeste diodes (die gebaseerd zijn op silicium). Er zijn echter ook nog wat speciale diodes die een andere “schakelspanning” hebben:

- Shottkey diodes
  Deze diodes schakelen rond 0.2 of 0.3V
- Leds
  Deze lichtgevende “**L**ight **E**mitting **D**iodes” schakelen afhankelijk van de kleur e.d. bij pakweg 1.5V of 2V.

Analogon in het mechanische domein

Onderstaande figuur laat een (enigszins) analogon van een diode zien in het waterdomein.



De anode zou je kunnen modelleren als een rivierbedding waar water aan komt stromen.
De kathode zou je kunnen modelleren als een rivierbedding waar water weer wegstroomt.

De stroom binnenin de diode gaat door een verticale pijp, met een “hoogte” van 0.8V.

De pijp is bevestigd aan het onderste rivierbed, en kan schuiven door een gat in de bovenste rivierbedding. Daarbij word het gelimiteerd door een haak: de anode rivierbedding kan niet meer dan 0.8V “hoger” worden dan de kathode rivierbedding. Als je de anode rivierbedding verder omhoog trekt, trek je de kathode rivierbedding met die haak mee omhoog.

Verder zie je aan het analogon dat als het hoogteverschil kleiner dan 0.8V wordt, dat de pijp boven het water van de anode rivierbedding uitsteekt. Er kan dan dus geen water meer door lopen.

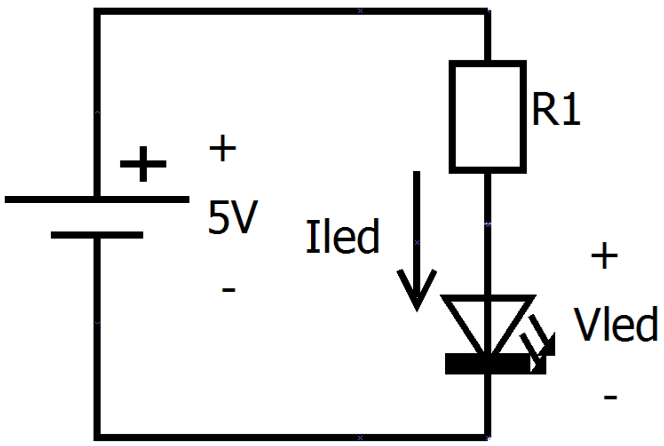
Voor de situatie dat de anode zich op een lagere spanning bevindt dan de kathode, voldoet het analogon helaas niet.

Voorschakelweerstanden

Over een diode kan niet meer spanning vallen dan zijn schakelspanning. Forceer je dat toch, dan loopt er een hele grote stroom, en gaat de diode stuk.

Stel nu dat we een led met een “schakelspanning” van 2V willen beschermen voor een te grote stroom. We kunnen dat doen door er een zogenaamde **voorschakelweerstand** mee in serie te zetten.

Het onderstaande circuit laat zo’n met voorschakelweerstand beschermde led zien die op een voeding van 5V is aangesloten.



Stel dat we de stroom door de led willen beperken tot 2mA, welke weerstandswaarde moeten we dan voor voorschakelweerstand R1 kiezen?

Aangenomen dat de gewenste 2mA (> 0mA) door de led stroomt, kunnen we stellen dat de spanningsval Vled over de led gelijk moet zijn aan zijn schakelspanning: VLed=2V.

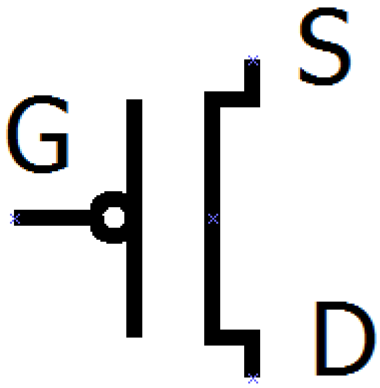
Denkend aan het water-analogon: in het bovenste knooppunt is de spanning 5V, en op de bovenkant van de led is de spanning nog maar 2V. Wat is dan het spanningsverschil (hoogteverschil) dat over weerstand R1 moet vallen?

VR1 = Vsup – Vled = 5V-2V = 3V
IR1 = Iled = 2mA

Volgens de wet van ohm moet gelden:
R1 = VR1 / IR1 = 3V/2mA = 1.5kΩ

PMOS FET

Een PMOS FET is een speciaal type transistor. Het is afgebeeld in onderstaande figuur.



Het heeft 3 aansluitpunten: een Gate, een Drain en een Source.

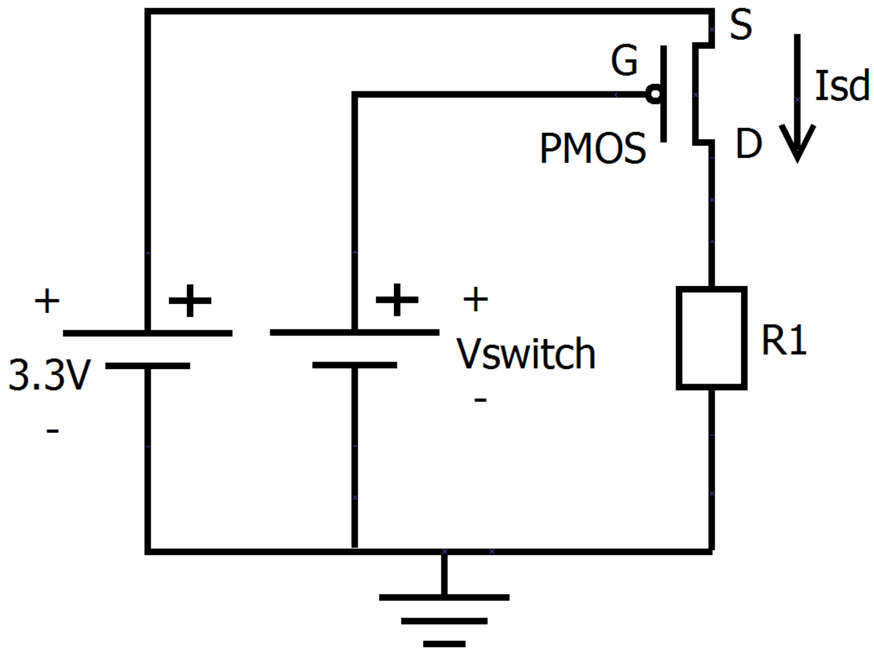
De transistor kan gebruikt worden als een spanningsgestuurde schakelaar:
Als de Gate spanning laag genoeg is vergeleken de Source spanning, dus als (Vs-Vg) groter wordt dan een zekere “Threshold spanning”, dan gaat een kanaal tussen Source en Drain open. De weerstand tussen Source en Drain is dan heel laag. Er is als het ware een schakelaar gesloten tussen Source en Drain.
Omgekeerd, als (Vs-Vg) kleiner is dan de vereiste “Threshold spanning”, is de “schakelaar” open, en is er geen stroompad tussen Source en Drain.

Zoals bij alle FETs geld took voor de PMOS: de stroom die in de gate stroomt, is verwaarloosbaar (ongeveer 0A). Je kunt met een FET dus een stroom schakelen met een spanning.

Geef je microcontrollers spierballen – schakelen met een PMOS

De maximum uitgangsstroom van een ESP8266 is gelimiteerd tot 15mA.
We kunnen daarvoor bijvoorbeeld een PMOS transistor gebruiken.

In het onderstaande circuit gebruiken we een NDP6020P PMOS. Die heeft een threshold spanning (0.7V) die klein genoeg is om te kunnen gebruiken om te schakelen 3.3V.



Stel dat Vswitch de uitgangspin is van een microcontroller die werkt op een 3.3V voeding, zoals een ESP.
Als Vswitch 0V is, dan is de PMOS schakelaar gesloten, en is R1 verbonden met 3.3V.
Als Vswitch 3.3V is, dan is de PMOS schakelaar open, en kan er geen stroom stromen door R1.

De stroom die door de Gate stroomt is zoals altijd bij FETs gelijk aan 0, ongeacht de hoeveelheid stroom die wordt geschakeld. Met de NDP6020P kun je stromen schakelen van **vele Amperes** (mits gekoeld met een heatsink).

Deze configuratie kan ook handig zijn in batterij gevoedde, low power internet of things applicaties. Een klein zielig microcontrollertje zoals de ATiny dat bijna geen stroom verbruikt, houdt de tijd bij, en initieert 12 keer per dag een reeks weerstation-metingen. Voor die metingen wordt een ESP8266 gebruikt, in samenwerking met wat andere chips. Na elke meting verzendt de ESP8266 de gemeten waarde via wifi naar een server. De laatstgenoemde chips verbruiken behoorlijk wat stroom. Door ze alleen aan te schakelen wanneer het nodig is wordt het gemiddelde stroomverbruik duizenden malen kleiner, en gaat de batterij veel langer mee – en/of kan op peil worden gehouden met een klein zonnepaneeltje.

Meten met een multimeter

Gelijkspanningen meten

Je kunt met een mulitmeter DC (“direct current”) spanning, ofwel een gelijkspanningsverschil meten tussen twee knooppunten. Zet je multimeter in de DCV (DC Voltage) meet modus. Kies de kleinste range die groter is dan de spanning die je verwacht te meten. Als je de range te klein kiest, geeft de multimeter gen waarde weer. Als je de range te groot kiest, geeft de multimeter de waarde weer met minder significante cijfers. Als je niet weet welke spanning je moet verwachten, kun je beginnen met het grootste meetbereik, en dan stapsgewijs terugschakelen om het kleinste (en dus meest nauwkeurige) bereik te vinden waarbij de spanning nog op de display wordt weergegeven.

Gelijkstromen meten

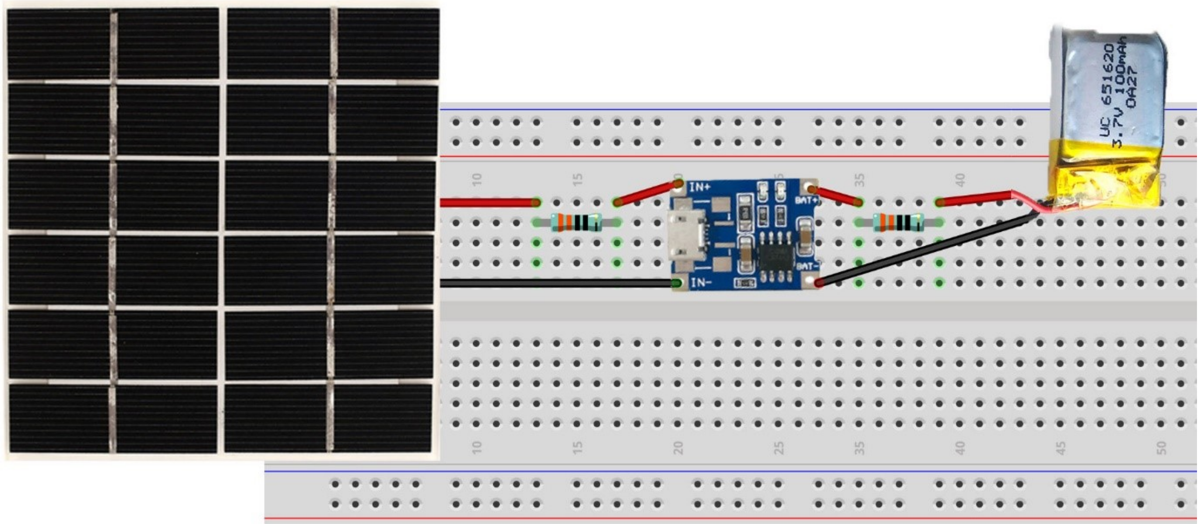
Het is theoretisch mogelijk om stromen met de multimeter te meten in de DCA (Direct Current Ampere) modus, maar **dat raad ik sterk af**, omdat:

- Als de multimeter in DC ampere mode schakelt, dan ontstaat er effectief een **kortsluiting** tussen de pinnen.
  Stel dat je de voedingsspanning wilt meten, zoals in de vorige paragraaf, maar de multimeter staat per ongeluk nog in DCA mode, dan sluit je de voedingspanning kort.
  Dan gaat de voeding stuk en/of een zekering in je multimeter.
- Als je met de multimeter in DCA mode zou meten, dan moet je de multimeter in het stroompad zetten. Dus: een stroomdraad vervangen door het stroompad door de multimeter.
  De aansluitdraden van de multimeter zijn lang. Die hebben daardoor een grote zelfinductie. Daardoor geleiden ze minder goed voor hoge frequenties. De bijbehorende stroomlus is ook nog eens groot, waardoor makkelijk storing wordt verspreidt en opgepikt.
- Het vervangen van een stroomdraad door de multimeter pinnen is nogal invasief.
  Onhandig als een en ander al is vastgesoldeerd, maar ook onhandig in een breadboard.
  Als je de stroom in de voedingspin van je microcontroller wilt weten, moet je eerst die pin loskoppelen – waardoor de microcontroller uitschakelt. Dat wil je vaak niet.

Okee dan, maar wat is dan de juiste manier om gelijkstromen te meten?

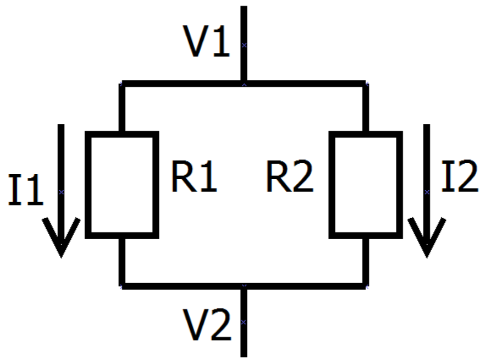
De truc is om kleine meetweerstandjes in je circuit in te bouwen, op plekken waar je de stroom wilt kunnen meten. Op elk gewenst kun je met de multimeter de spanning over die meetweerstandjes meten, en met behulp van de wet van ohm de bijbehorende stroom door die weerstandjes berekenen.

In de onderstaande figuur zijn bijvoorbeeld twee meetweerstanden van 0.33Ω tussengevoegd. Dankzij de meetweerstanden kun je de stroom die van het zonnepaneel naar de TP4056 lipobatterij-lader stroomt meten, en (met een andere multimeter) tegelijkertijd de stroom waarmee de lipobatterij wordt opgeladen.



Appendix 1: Afleiding van de formule van de vervangingsweerstand van parallel geschakelde weerstanden

In deze appendix "bewijzen" we de formule voor parallel geschakelde weerstanden. We beginnen met het geval van twee parallelle weerstanden.



Om te **rekenen aan een circuit**, hebben we **altijd** de volgende wapens ter beschikking:

- De **componentvergelijkingen**
- De **stroomwet** van Kirchhoff
- De **spanningswet** van Kirchhoff

De spanningswet is hier niet zo interssant, omdat die alleen zegt dat de spanningsval over weerstand R1 gelijk moet zijn aan de spanningsval over R2.

Dus resulteert:

1. I1 = (V1-V2)/R1 — De componentvergelijking van weerstand R1, de wet van ohm.
2. I2 = (V1-V2)/R2 — De componentvergelijking van weerstand R2, de wet van ohm.
3. Rr = (V1-V2)/(Ir) — De componentvergelijking van de beoogde vervangingsweerstand Rr, die we willen gebruiken in plaats van R1 en R2. Ook de wet van ohm.
4. Ir = (I1 + I2) — De stroomwet van Kirchhoff. We willen dat na vervanging door Rr er nog evenveel stroom vloeit als voordien. (naast V1 hadden we een neergaande pijl met Ir kunnen tekenen)

We willen Rr weten in termen van R1 en R2. Daar komen we achter als we de andere variabelen een voor een wegwerken. Je kunt variabelen wegwerken door ze in een van de vergelijkingen aparte te schrijven, en vervolgens in de overige in te vullen.

Begin bijvoorbeeld bij variabele Ir. Die staat al in een vergelijking (de 4^{e}) apart: Ir = (I1 + I2), dit kunnen we vervolgens invullen in de andere vergelijkingen waar Ir voorkomt.
We vullen daar dus (I1+I2) in, in plaats van Ir.

Dit is het resultaat:

1. I1 = (V1-V2)/R1
2. I2 = (V1-V2)/R2
3. Rr = (V1-V2)/(I1+I2)

Vergelijking 4 hebben we verwijderd, want die hebben we al gebruikt voor substitutie.
Vergelijking 3 is veranderd doordat we Ir hebben vervangen.
Vergelijkingen 1 en 2 blijven ongewijzigd, want daar kwam geen variabele Ir in voor om te vervangen.

Mooi, nu hebben we nog maar 3 vergelijkingen over, en hebben we een zorg minder (nl Ir).

We kunnen nu I1 wegwerken. I1 staat al apart geschreven in vergelijking 1:
I1 = (V1-V2)/R1. We kunnen I1 dus substitueren in de overige vergelijkingen (van onze laatste set).
Dit is het resultaat:

2. I2 = (V1-V2)/R2
3. Rr = (V1-V2) / ((V1-V2)/R1 + I2)

Vergelijking 1 hebben we verwijderd, want die hebben we al gebruikt voor substitutie.
Vergelijking 3 is veranderd doordat we I1 hebben vervangen.
Vergelijking 2 blijft ongewijzigd, want daar kwam geen variabele I1 in voor om te vervangen.

Mooi, nu hebben we nog maar 2 vergelijkingen over, en hebben we een zorg minder (nl I1).

We kunnen nu I2 wegwerken. I2 staat al apart geschreven in vergelijking 2:
I2 = (V1-V2)/R2. We kunnen I2 dus substitueren in onze laatste versie van vergelijking 3.
Dit is het resultaat:

3. Rr = (V1-V2) / ((V1-V2)/R1 + (V1-V2)/R2)

Vergelijking 2 hebben we verwijderd, want die hebben we al gebruikt voor substitutie.
We hebben dus alleen nog vergelijking 3 over, en die laat zien wat we zoeken: Rr.
Maar wat vervelend dat we nog met die (V1-V2) factoren zitten. Wat moeten we daar nu mee?

Genoteerd met de formule editor kunnen we de structuur van deze vergelijking wat makkelijker zien:

$$\mathrm{Rr} \;= \frac{(\mathrm{V1}-\mathrm{V2})}{\frac{(\mathrm{V1}-\mathrm{V2})}{\mathrm{R1}}+\frac{(\mathrm{V1}-\mathrm{V2})}{\mathrm{R2}}}$$

We zien dat alle termen in te teller en noemer van de hoofdbreuk de factor (V1-V2) bevat.
(Je mag altijd teller en noemer van een breuk door hetzelfde getal delen. Dan blijft de breuk gelijk.
Getallenvoorbeeld: $\frac{3*5}{7*5+2*5}=\frac{3}{7+2}$, dat vinden we door de teller en de noemer door 5 te delen)

In ons geval delen we teller en noemer door (V1-V2). Dat valt daardoor weg:

$$\mathrm{Rr} \;= \frac{1}{\frac{1}{\mathrm{R1}}+\frac{1}{\mathrm{R2}}}$$

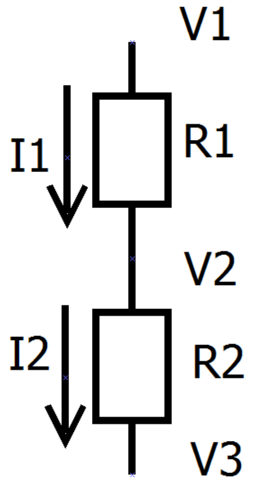
Voila, daar is onze formule voor de vervangingsweerstand voor twee parallele weerstanden.

Als je het bovenstaande hebt bestudeerd, zal je opvallen dat een extra weerstand R3 een extra componentvergelijking had opgeleverd (hetzelfde als vergelijking 2, maar dan met R3 ipv R2), die in de noemer +1/R3 zou hebben toegevoegd.

Etc.. elke extra weerstand Ri die je parallel toevoegt, resulteert in een exra term 1/Ri in de noemer.
In het algemeen geldt dus voor de vervangingsweerstand van parallel geschakelde weerstanden:

$$Rr = \frac{1}{\frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{..etc}}$$

Appendix 2: Afleiding van de formule van vervangingsweerstand voor weerstanden in Serie



Om te **rekenen aan een circuit**, hebben we **altijd** de volgende wapens ter beschikking:

- De **componentvergelijkingen**
- De **stroomwet** van Kirchhoff
- De **spanningswet** van Kirchhoff

De stroomwet is hier eigenlijk niet zo interessant, omdat die alleen zegt dat de stroom door weerstand R1 gelijk moet zijn aan de stroom door R2.

Dus resulteert:

1. (V1-V2) = I1 * R1 De componentvergelijking van weerstand R1, de wet van ohm.
2. (V2-V3) = I2 * R2 De componentvergelijking van weerstand R2, de wet van ohm.
3. Ir = I1 = I2 De stroomwet van Kirchhoff.
4. Rr = (V1-V3)/Ir De componentvergelijking van de beoogde vervangingsweerstand Rr, die we willen gebruiken in plaats van R1 en R2. Ook de wet van ohm.

We willen Rr weten in termen van R1 en R2. Daar komen we achter als we de andere variabelen een voor een wegwerken. Je kunt variabelen wegwerken door ze in een van de vergelijkingen aparte te schrijven, en vervolgens in de overige in te vullen.

In dit geval zien we bij vergelijking 3 dat I1, I2 en Ir gelijk aan elkaar zijn. Dat kunnen we gebruiken door in de overige vergelijkingen overal waar I1 of I2 staat, dat te vervangen door Ir.

Dit zijn dan de resulterende vergelijkingen:

1. (V1-V2) = Ir * R1
2. (V2-V3) = Ir * R2
4. Rr = (V1-V3)/Ir

Vergelijking 3 nemen we niet meer mee, want die hebben we al gebruikt om in te vullen in de overige vergelijkingen. Vergelijking 1 en 2 zijn geupdate. Vergelijking 4 blijft wat hij was, omdat er geen I1 en I2 in voorkwamen om te vervangen.

Welke variabele zullen we nu eens elimineren/vervangen? Op zich maakt het niet uit, maar een makkelijke is V1.

NB: een vergelijking is een bewering dat links gelijk is aan rechts. Als dat waar is, blijft het waar als we links en rechts hetzelfde getal optellen. Voorbeeld: als 2*10 = 20, dan moet ook gelden:
2*10+5 = 20+5

We kunnen dus makkelijk vergelijking 1 herschrijven zodat V1 apart aan de linkerkant komt te staan. Dat kunnen we door bij vergelijking 1 aan de linkerkant en rechterkant V2 erbij op te tellen:

1. V1-V2+V2 = Ir * R1+V2

   Dus:
   1. V1 = Ir*R1 + V2

Nu vergelijking 1 is herschreven, kunnen we hem gebruiken om V1 in de overige vergelijkingen te vervangen (“substitueren”).
Het resultaat is:

2. (V2-V3) = Ir * R2
4. Rr = (Ir*R1+V2-V3)/Ir

Vergelijking 1 hebben we verwijderd, want die hebben we al gebruikt voor substitutie.
Vergelijking 4 is veranderd doordat we V1 hebben vervangen.
Vergelijking 2 blijft ongewijzigd, want daar kwam geen variabele V1 in voor om te vervangen.

Op soortgelijke manier kunnen we vergelijking twee herschrijven zodat V2 apart aan de rechterkant komt te staan. Dat kunnen doen we door bij vergelijking 2 aan de linkerkant en rechterkant V3 erbij op te tellen:

2. V2-V3+V3 = Ir*R2 +V3

   Dus:
   2. V2 = Ir*R2 +V3

Nu vergelijking 2 is herschreven, kunnen we hem gebruiken om V2 in de overige vergelijkingen te vervangen (“substitueren”).

Het resultaat is:

4. Rr = (Ir*R1+Ir*R2+V3-V3)/Ir

Ofwel:

4. Rr = (Ir*R1+Ir*R2)/Ir

Maar wat vervelend dat we nog met die Ir factoren zitten. Wat moeten we daar nu mee?

Genoteerd met de formule editor kunnen we de structuur van deze vergelijking wat makkelijker zien:

$$\mathrm{Rr} = \frac{\mathrm{Ir} * \mathrm{R1} + \mathrm{Ir} * \mathrm{R2}}{\mathrm{Ir}}$$

We zien dat alle termen in te teller en noemer van de hoofdbreuk de factor Ir bevat.
(Je mag altijd teller en noemer van een breuk door hetzelfde getal delen. Dan blijft de breuk gelijk. Getallenvoorbeeld: $\frac{7*5+2*5}{3*5} = \frac{7+2}{3}$, dat vinden we door de teller en de noemer door 5 te delen)
In ons geval delen we teller en noemer door Ir. Die valt daardoor weg:

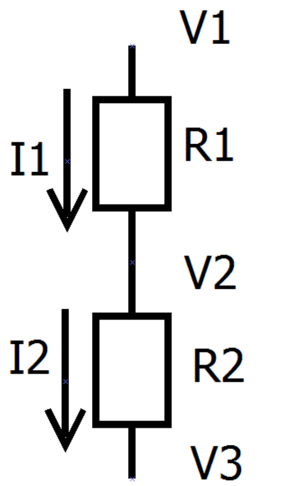
$$\mathrm{Rr} = \frac{\mathrm{R1+R2}}{1}$$

ofwel: **Rr = R1+R2**

De formule is nu afgeleid voor 2 weerstanden. Als je meer weerstanden toevoegt, komen die ook als positieve term in de formule van de vervangingsweerstand erbij. Dat is nu niet zo makkelijk te zien.

Om dat makkelijk inzichtelijk te maken, gebruik ik een alternatieve afleiding (zie volgende paragraaf). Daarbij noteer ik V1-V2 als V12, en de spanning over het totaal noem ik V12+V23 in plaats van (V1-V3). Dat is hetzelfde, want V12+V23 = V1-V2+V2-V3 = V1-V3.

Alternatieve afleiding



Om te **rekenen aan een circuit**, hebben we **altijd** de volgende wapens ter beschikking:

- De **componentvergelijkingen**
- De **stroomwet** van Kirchhoff
- De **spanningswet** van Kirchhoff

De stroomwet is hier eigenlijk niet zo interessant, omdat die alleen zegt dat de stroom door weerstand R1 gelijk moet zijn aan de stroom door R2.

Dus resulteert:

1. V12 = I1 * R1 De componentvergelijking van weerstand R1, de wet van ohm.

2. V23 = I2 * R2 De componentvergelijking van weerstand R2, de wet van ohm.
3. Ir = I1 = I2 De stroomwet van Kirchhoff.
4. Rr = (V12+V23)/Ir De componentvergelijking van de beoogde vervangingsweerstand Rr, die we willen gebruiken in plaats van R1 en R2. Ook de wet van ohm.

We willen Rr weten in termen van R1 en R2. Daar komen we achter als we de andere variabelen een voor een wegwerken. Je kunt variabelen wegwerken door ze in een van de vergelijkingen aparte te schrijven, en vervolgens in de overige in te vullen.

In dit geval zien we bij vergelijking 3 dat I1, I2 en Ir gelijk aan elkaar zijn. Dat kunnen we gebruiken door in de overige vergelijkingen overal waar I1 of I2 staat, dat te vervangen door Ir.

Dit zijn dan de resulterende vergelijkingen:

1. V12 = Ir * R1
2. V23 = Ir * R2
4. Rr = (V12+V23)/Ir

Vergelijking 3 nemen we niet meer mee, want die hebben we al gebruikt om in te vullen in de overige vergelijkingen. Vergelijking 1 en 2 zijn geupdate. Vergelijking 4 blijft wat hij was, omdat er geen I1 en I2 in voorkwamen om te vervangen.

We kunnen nu achtereenvolgens V12 vervangen met vergelijking 1 en V23 vervangen met vergelijking 2.

Het resultaat is:

4. Rr = (Ir*R1+Ir*R2)/Ir

Genoteerd met de formule editor kunnen we de structuur van deze vergelijking wat makkelijker zien:

$$\mathrm{Rr} = \frac{\mathrm{Ir} * \mathrm{R1} + \mathrm{Ir} * \mathrm{R2}}{\mathrm{Ir}}$$

We delen teller en noemer door Ir. Die valt daardoor weg:

$$\mathrm{Rr} = \frac{\mathrm{R1+R2}}{1}$$

ofwel: **Rr = R1+R2**

Kijk nog eens naar het setje van 3 vergelijkingen uit de vorige stap.

Stel nu dat er een extra weerstand R3 zou zijn geweest, dan zou er een extra vergelijking als vergelijking 2 bij zijn gekomen: maar dan met V34 en Ir*R3, en zou tussen de haakjes van vergelijking 4 de term V34=Ir*R3 erbij gekomen zijn. Het resultaat is dat Rr wordt verhoogd met R3.

Hetzelfde gebeurt bij elke extra weerstand die je in serie toevoegt.

Daarmee zien we dus de vervangingsweerstand van willekeurig aantal in seriegeschakelde weerstanden de som is van die weerstanden:

$$Rr = R1 + R2 + etc..$$