



Inhoudsopgave

3	Lading, stroom, spanning en weerstand	3-2
3.1	Wat leer je in dit hoofdstuk?.....	3-2
3.2	Elektrische lading en stroom	3-2
3.3	Elektrische stroom, spanning, weerstand en vermogen	3-4
3.3.1	De technische stroomrichting	3-4
3.3.2	Spanning of elektrische potentiaal	3-4
3.3.3	Weerstand, wet van Ohm	3-5
3.3.4	Stroom-spanningskarakteristiek: de wet van Ohm als grafiek.....	3-6
3.4	Metten van spanning, stroom en weerstand	3-6
3.5	Energie en arbeid, vermogen en dissipatie	3-8
3.6	Uitvoeringsvormen van weerstanden	3-9
3.6.1	Vaste weerstanden	3-9
3.6.2	Thermistors	3-10
3.6.3	Variabele weerstanden	3-11
3.7	Schakelingen van weerstanden.....	3-11
3.7.1	Soorten schakelingen, wetten van Kirchhoff.....	3-11
3.7.2	Serieschakeling van weerstanden.....	3-13
3.7.3	Parallelschakeling van weerstanden	3-13
3.7.4	Een nuttige controle op de vervangingsweerstand bij serie- en parallelschakeling	3-14
3.7.5	Spanningsdelers.....	3-14
3.7.6	De potentiometer iets uitgebreider	3-16
3.8	Spannings- en stroombronnen, afzonderlijk en geschakeld	3-17
3.8.1	De bronnen.....	3-17
3.8.2	De spanningsbron, EMK en klemspanning	3-17
3.8.3	Hoeveel vermogen leveren een ideale en een niet-ideale bron?.....	3-17
3.8.4	Schakelen van spanningsbronnen	3-19
3.8.5	Schakelen van stroombronnen.....	3-19
3.8.6	De capaciteit van een batterij of accu.....	3-20



3 Lading, stroom, spanning en weerstand

3.1 Wat leer je in dit hoofdstuk?

Dit hoofdstuk gaat over elektrische lading, stroom, spanning, weerstand en verbanden tussen die drie.

We beginnen met elektrische stroom, geleiders en isolatoren. Dan komen spanning en weerstand en hoe je ze meet.

Daarna behandelen we vermogen, arbeid (energie) en dissipatie (verbruik van vermogen).

Dat deel wordt gevolgd door verschillende manieren van schakelen van weerstanden en de berekening van vervangingsweerstand die is gebaseerd op twee behoudswetten.

Tot slot bespreken we hoe je spannings- en stroombronnen in een schakeling opneemt en welke combinaties wel, niet, of alleen met beperkingen mogelijk zijn.

3.2 Elektrische lading en stroom

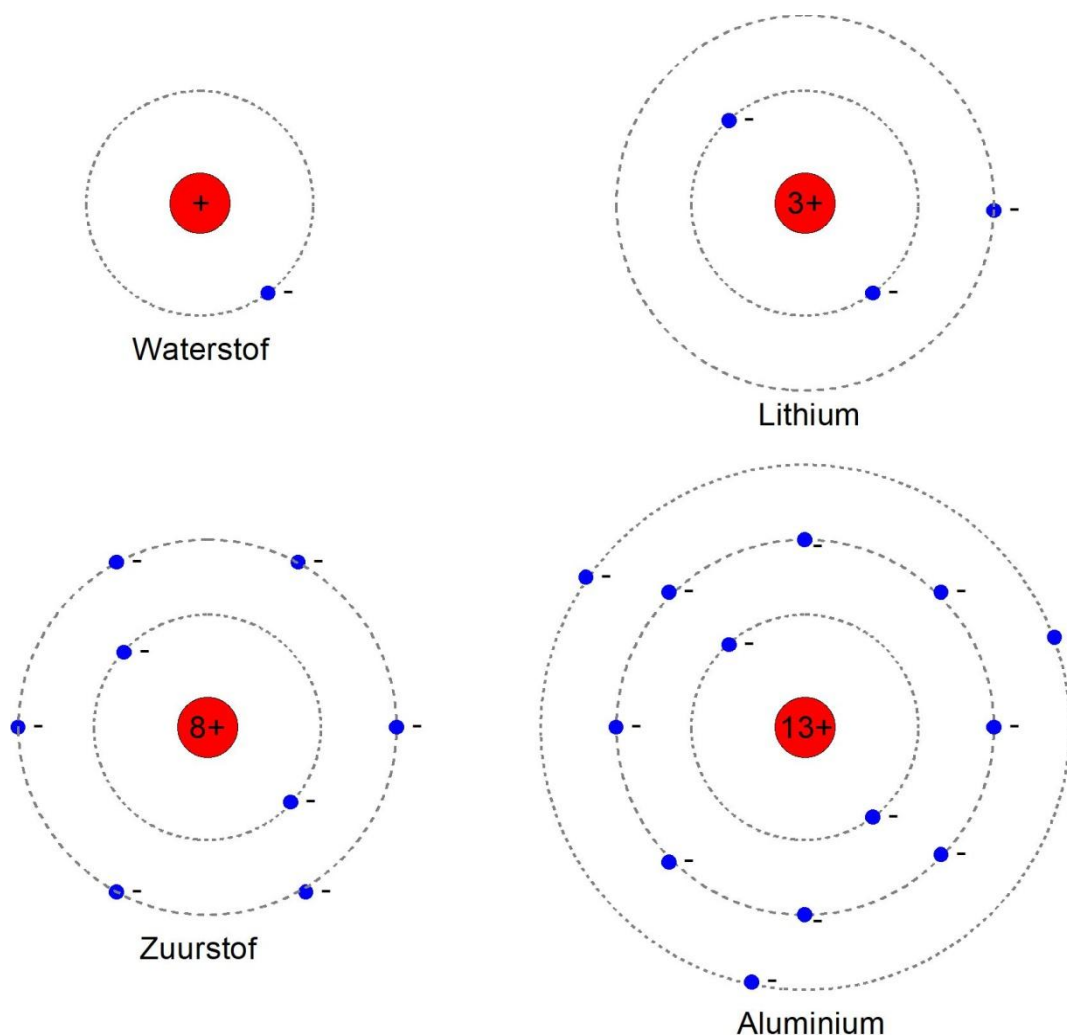
Stroom is verplaatsing van elektronen. Elektronen zijn onderdelen van atomen. Een elektron is de kleinste mogelijke elektrische lading. Die lading noemen we negatief.

In atoomkernen zitten protonen en neutronen. Een proton heeft de kleinste mogelijke positieve lading. Een neutron heeft geen lading. Protonen en neutronen zijn even groot; de massa van een elektron is 0,0022 maal de massa van een proton.

Gelijke ladingen stoten elkaar af en tegengestelde ladingen trekken elkaar aan. Een proton en een elektron hebben samen 0 lading. Dat noemen we *elektrisch neutraal*.

Protonen zijn onderdeel van atoomkernen. Ze blijven in de atoomkern, doordat daarin ook ongeladen neutronen zitten die protonen aantrekken. Een atoomkern is dus positief geladen en trekt daardoor elektronen aan. Die draaien om de kern.

Doordat elektronen elkaar afstoten, blijven ze in hun baan om hun atoomkern zover mogelijk bij elkaar uit de buurt. Wel zit er steeds een aantal op dezelfde afstand van de kern. Elektronen op gelijke afstand vormen een *elektronenschil* of kortweg *schil*. De binnenste schil is vol met twee elektronen, de daaropvolgende met 8 en de daaropvolgende met 18. Heel grote atomen hebben nog meer schillen. Als een schil elektronen bevat, is de schil daarbinnen vol. Enkele voorbeelden staan in Figuur 3.2-1. Ze zijn tweedimensionaal (plat) getekend. In werkelijkheid zijn ze driedimensionaal.



Figuur 3.2-1. Schematische voorbeelden van atoomkernen. Waterstof is het kleinst mogelijke atoom.

Als een materiaal niet evenveel protonen als elektronen bevat, noemen we het *elektrisch geladen*. Zijn er meer elektronen dan protonen, dan is de lading negatief; zijn de protonen in de meerderheid, dan is de lading positief.

Als de buitenste schil bijna leeg is, kunnen de elektronen gemakkelijk van het ene atoom naar het andere springen en weer verder naar het volgende. Dit verschijnsel heet *geleiding*. Een stof waarin geleiding gemakkelijk tot stand komt, heet een *geleider*.

Alle metalen zijn geleiders. Vrijwel alle andere stoffen niet. Een bekende uitzondering is koolstof. Stoffen die niet geleiden heten *isolatoren*. Hoewel de ene geleider beter geleidt dan de andere en de ene isolator beter isoleert dan de andere, is er geen geleidelijke overgang tussen geleiders en isolatoren. Een stof geleidt of isoleert.

3.3 Elektrische stroom, spanning, weerstand en vermogen

3.3.1 De technische stroomrichting

Elektrische stroom is verplaatsing van elektrische lading. De verplaatsing gaat altijd met elektronen. Als positieve lading zich verplaatst van A naar B, dan zijn het eigenlijk de negatief geladen elektronen die zich verplaatsen van B naar A. De *technische stroomrichting* is de richting waarin de positieve lading zich ‘verplaatst’. Elektronen verplaatsen zich tegen de technische stroomrichting in. Dit is een ongelukkige erfenis uit de tijd waarin men wel wist dat er ‘iets’ stroomde, maar niet wat het precies was.

In de elektriciteitsleer wordt nagenoeg altijd uitgegaan van de technische stroomrichting, dus van plus naar min.

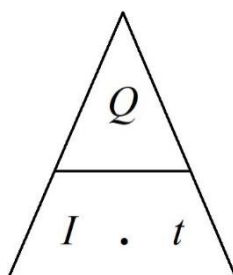
De eenheid van lading is de coulomb, afgekort C. 1 C is de lading van $6,24 \cdot 10^{18}$ protonen; -1 Coulomb is de lading van $6,24 \cdot 10^{18}$ elektronen. Het symbool voor de grootte lading is Q . De eenheid van stroomsterkte is de ampère, afgekort A. Het symbool voor de grootte stroom is I . Bij een stroom van 1 A wordt elke seconde 1 C verplaatst. De vergelijking:

$$Q = It \quad (3.3-1)$$

Dat kan ook worden geschreven als

$$I = \frac{Q}{t} \quad \text{en} \quad t = \frac{Q}{I} \quad (3.3-2)$$

Figuur 3.3-1 toont hoe je vergelijking (3.3-1) omzet in de twee vergelijkingen van (3.3-2). De figuur is bruikbaar voor alle vergelijkingen, waarin één grootte het product is van twee andere.



Figuur 3.3-1. Zo vind je de vergelijking om Q , I of t uit de andere twee grootheden te berekenen. Denk de te berekenen grootte weg. De andere twee geven het rechterlid van de juiste vergelijking.

3.3.2 Spanning of elektrische potentiaal

Spanning is potentiaalverschil tussen twee punten. Potentiaal is energie per lading. Verderop zullen we de grootte energie bespreken.

Uit de eerste regel van deze sub-paragraaf blijkt dat spanning altijd een verschil is.

Je kunt spanning bijvoorbeeld vergelijken met drukverschil tussen de binnen- en buitenkant van een opgeblazen en dichtgeknepen ballon. Als de ballon opengaat, stroomt lucht naar buiten, want binnen is de druk hoger dan buiten. Het drukverschil veroorzaakt

een luchtstroom. Potentiaalverschil (spanning) over een geleider veroorzaakt op vergelijkbare wijze een stroom van elektronen.

De eenheid van spanning is de volt, symbool V. De grootte spanning heeft U als symbool. Spanning meet je tussen twee punten, bijvoorbeeld de polen van een batterij.

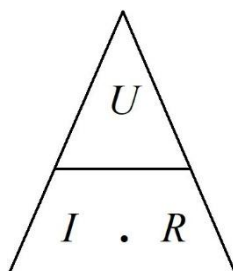
Stroom stroomt dus onder invloed van spanning. Bij een geleider gaat dat gemakkelijk, bij een isolator bijna niet. Als de spanning te groot wordt, kan stroom toch door een isolator lopen. Die is daarna meestal stuk. *Doorslag* heet dat. Een voorbeeld is de bliksem.

3.3.3 Weerstand, wet van Ohm

Stroom door een geleider wordt bepaald door de spanning over die geleider en de elektrische weerstand ervan. De eenheid is de Ohm, symbool Ω (omega). Het symbool voor de grootte weerstand is R . Het verband tussen spanning U , stroom I en weerstand R staat bekend als de **wet van Ohm**:

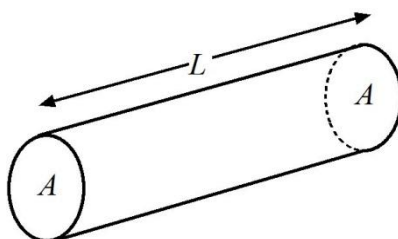
$$U = IR \quad (3.3-3)$$

Figuur 3.3-2 geeft een manier om uit twee van de grootheden in vergelijking (3.3-3) de derde te berekenen. Het gaat net als in Figuur 3.3-1.



Figuur 3.3-2. Zo vind je de vergelijking om U , I of R uit de andere twee grootheden te berekenen. Denk de te berekenen grootte weg. De andere twee geven het rechterlid van de juiste vergelijking.

De weerstand van een stuk geleider, bijvoorbeeld een draad, een plaat of een blokje, hangt af van de vorm, de afmetingen en de *soortelijke weerstand*. Elk materiaal heeft zijn eigen soortelijke weerstand. Bij een isolator is die heel hoog, bij een geleider heel laag. De soortelijke weerstand is gevoelig voor temperatuur. Die gevoeligheid is afhankelijk van het materiaal. We bekijken Figuur 3.3-3.



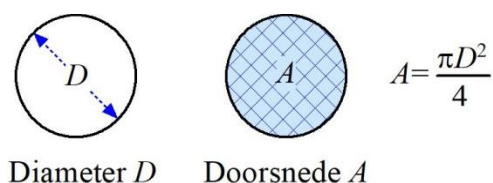
Figuur 3.3-3. Ronde geleider met doorsnede A en lengte L .

Die stelt een ronde draad voor met een doorsnede A en lengte L . De weerstand in de richting van L is evenredig met L en omgekeerd evenredig met de doorsnede A . Om de weerstand te kunnen berekenen, ontbreekt nog de soortelijke weerstand ρ (*rho*, spreek uit: 'ro'), de Griekse letter r . De vergelijking:

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (3.3-4)$$

L gaat in m, A in m², Als R in Ω wordt uitgedrukt, moet ρ worden uitgedrukt in Ωm , anders komen we een lengte-eenheid te kort.

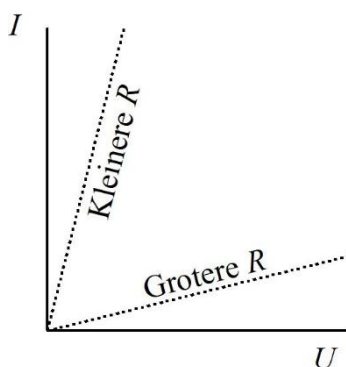
Let op het verschil tussen *diameter* en *doorsnede*. Diameter is de afstand tussen tegenoverliggende punten op de doorsnede van een ronde draad (Figuur 3.3-4).



Figuur 3.3-4. Verschil tussen diameter D en doorsnede A en hoe je A berekent uit D .

3.3.4 Stroom-spanningskarakteristiek: de wet van Ohm als grafiek


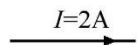
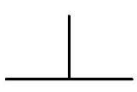
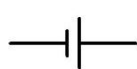
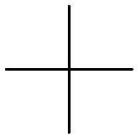
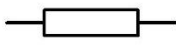
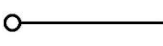

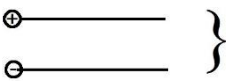
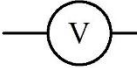

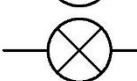
Een grafische weergave van de wet van Ohm is de stroom-spanningskarakteristiek. Zet I uit op de verticale as en U op de horizontale. De grafiek wordt dan een rechte lijn. Voor elke waarde van R gaat die lijn onder een andere hoek omhoog. Een lage R leidt tot een steile lijn (snel oplopende stroom), een hoge R tot een vlakke (langzaam oplopende stroom). Zie Figuur 3.3-5 hieronder.



Figuur 3.3-5. Stroom-spanningskarakteristiek voor een lage en voor een hoge weerstand.

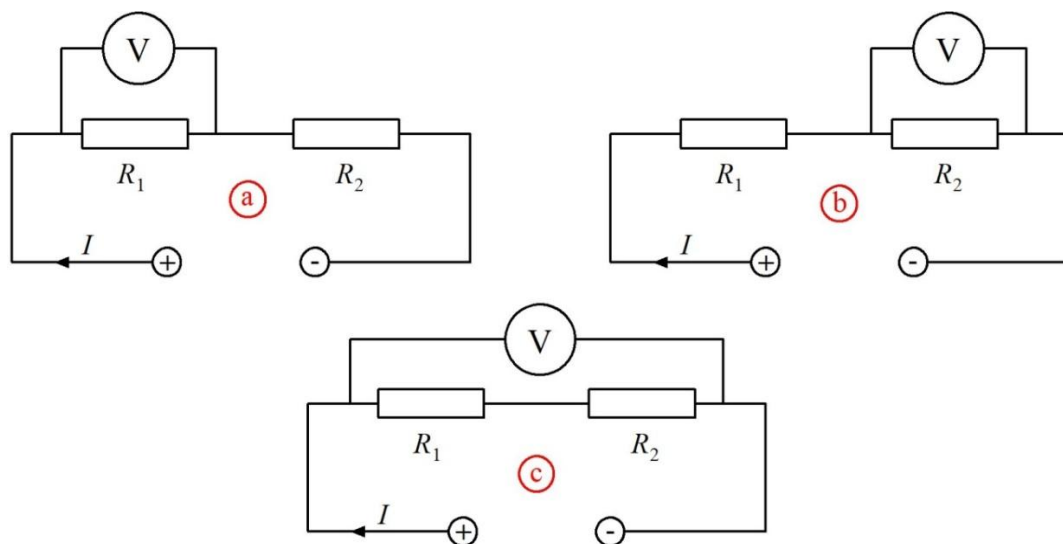
3.4 Meten van spanning, stroom en weerstand

We beginnen met enkele schemasymbolen (Figuur 3.4-1).

	Leiding		Leiding met stroomsterkte en technische stroomrichting
	Leiding met zijtak		Batterij. De lange verticale streep is de +
	Kruising van niet-verbonden leidingen		Weerstand
	Leiding met aansluitklem		Ampèremeter
	Aansluitklemmen met polariteit		Voltmeter
			Ohmmeter
			Lampje

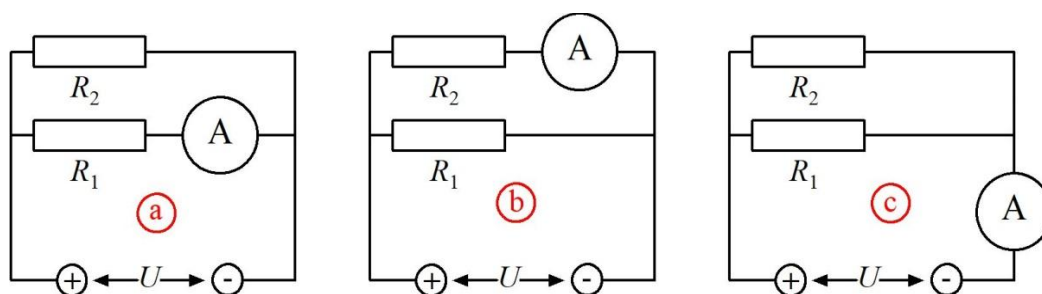
Figuur 3.4-1. Enkele schemasymbolen.

Spanning meet je tussen twee punten. Figuur 3.4-2 geeft drie voorbeelden.


Figuur 3.4-2. Spanningsmeting. a) Spanning over R_1 ; b) Spanning over R_2 ; c) Spanning over de hele schakeling.

Een voltmeter heeft een hoge weerstand ten opzichte van die van de schakeling.

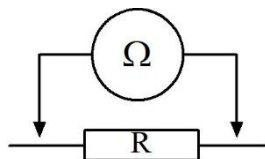
Stroom meet je *in* de stroomvoerende leiding, dus niet zoals spanning ten opzichte van een ander punt. In veel gevallen moet je de ampèremeter in de leiding opnemen. Als je geluk hebt, is een indirecte meting mogelijk, namelijk als er een bekende weerstand in de leiding zit. Meet de spanning over die weerstand met een voltmeter zoals aangegeven in Figuur 3.4-2 en reken de stroom uit met de wet van Ohm. Figuur 3.4-3 geeft drie voorbeelden van stroommeting door opnemen van de ampèremeter in de stroomvoerende leiding.



Figuur 3.4-3. Stroommeting. a) Stroom door R_1 ; b) Stroom door R_2 ; c) Stroom door de hele schakeling.

Een ampèremeter heeft een lage weerstand ten opzichte van de schakeling.

Voor het meten van **weerstand** meet je spanning over en stroom door de weerstand. Bereken vervolgens de weerstand met de wet van Ohm. Een multimeter geeft de weerstand zonder rekenwerk, omdat de afleesschaal daarvoor is aangepast. Je kunt de weerstand tijdens de meting niet in de schakeling laten zitten. Dan zou de meetstroom niet alleen door de weerstand lopen, maar door de hele schakeling. De weerstand moet er dus uit en wordt na de meting weer teruggeplaatst. Maar de meeste weerstanden hebben een kleurcode die de waarde aangeeft. Meten van een weerstand in een schakeling is dus zelden nodig, tenzij we denken dat hij stuk is. Figuur 3.4-4 toont de weerstandsmeting.



Figuur 3.4-4. Weerstandsmeting

De Brug van Wheatstone, ook een manier van weerstand meten, komt aan de orde bij de spanningsdelers. De verschillen tussen spannings-, stroom- en weerstandsmeting zijn samengevat in Tabel 3.4-1.

Tabel 3.4-1. Verschillen tussen spannings-, stroom- en weerstandsmeting

Meting	Soort meter	Positie van het meetinstrument	Inwendige weerstand
Spanning	Voltmeter	Over de schakeling	Zeer hoog
Stroom	Ampèremeter	In de schakeling	Zeer laag
Weerstand	Ohmmeter	Over de losse weerstand	Niet aan de orde

3.5 Energie en arbeid, vermogen en dissipatie

Energie en arbeid betekenen hetzelfde. Het symbool is W (van het Engelse *work*). De SI-eenheid is de joule, afgekort J.

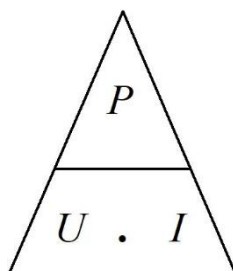
Vermogen P is energie per tijd, dus J/s. De eenheid van vermogen is de watt, afgekort W. 1 W is 1 J/s. Verwar die rechtopstaande W niet met de cursieve W van energie! Er geldt:

$$W = Pt \quad (3.5-1)$$

Arbeid is vermogen maal tijd. Vermogen is arbeid per tijd. 100 W=100 J/s en 100 J=100 Ws. Nu naar stroom en spanning. Het SI-stelsel zit zo netjes in elkaar, dat

$$P = UI \quad (3.5-2)$$

Alweer vergelijkingen waarin één grootte het product is van twee andere. Geschikt voor de driehoekstruc die we al kennen van onder meer de wet van Ohm (Figuur 3.3-2).



Figuur 3.5-1. Hulpje bij vergelijking (3.5-2)

De driehoek voor vergelijking (3.5-1) kun je nu wel zelf invullen. We kunnen nu ook via de wet van Ohm de weerstand erbij betrekken.

$$U = IR \text{ en } P = UI \rightarrow P = IR \cdot I = I^2 R \quad (3.5-3)$$

En

$$I = \frac{U}{R} \text{ en } P = UI \rightarrow P = U \cdot \frac{U}{R} = \frac{U^2}{R} \quad (3.5-4)$$

Ook hiervoor is de driehoekstruc toepasbaar. Vergelijking (3.5-3) spreekt voor zichzelf; vergelijking (3.5-4) verbouw je eerst tot $U^2=PR$ en dan werkt de truc ook. We zien hier dat het vermogen dat in een weerstand wordt omgezet in warmte, evenredig is met het kwadraat van de spanning U en ook met het kwadraat van de stroom I .

Elke weerstand waar stroom doorheen loopt, wordt dus warm. Dat verschijnsel heet *dissipatie*. Een weerstand dissipeert vermogen. De term *verbruiken* in plaats van dissiperen is ook gangbaar. Onthoud ze dus beide.

3.6 Uitvoeringsvormen van weerstanden

3.6.1 Vaste weerstanden

Vaste weerstanden hebben één waarde. Die ligt na hun fabricage vast. De belangrijkste typen zijn koelfilmweerstand, metaalfilmweerstand en draadgewonden weerstanden. Draadgewonden weerstanden zijn meestal bedoeld voor de wat hogere vermogens. Koelfilmweerstand bestaan uit een baan koolstof die spiraalsgewijs om een keramisch

kokertje ligt. Metaalfilmweerstanden hebben net zo'n opbouw, maar de weerstandsbaan bestaat uit heel dun metaal.

De waarde van kool- en metaalfilmweerstanden is meestal aangegeven in de vorm van een *kleurcode*, zelden in cijfers. De kleurcode bestaat uit vier of vijf gekleurde ringen. Die met vier ringen is het meest algemeen. Tabel 3.6-1 toont de kleuren en hun betekenis.

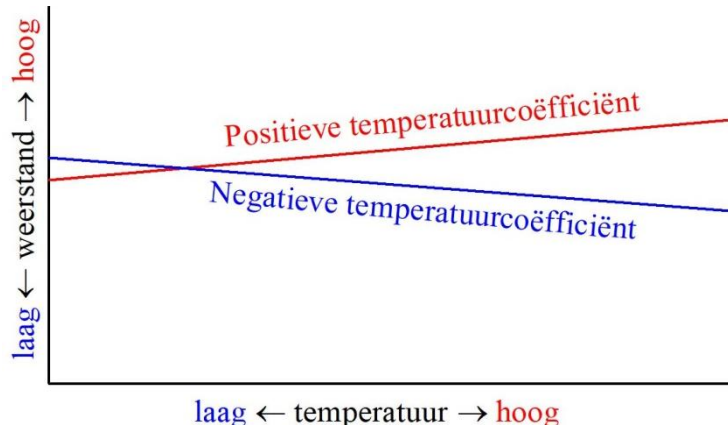
Tabel 3.6-1. Kleurcode voor weerstanden met ezelsbrug om de betekenis van de kleuren te onthouden.

Kleur	Zwart	Bruin	Rood	Oranje	Geel	Groen	Blauw	Violet	Grijs	Wit	Zilver	Goud
Ezelsbrug	Zij	brengt	rozen	op	Gerrits	graf	bij	vies	grijs	weer		
Ring 1	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	-	-
Ring 2	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	-	-
Ring 3	$10^0=1$	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7	-	-	10^{-2}	10^{-1}
Ring 4 ¹	-	$\pm 1\%$	$\pm 2\%$	-	-	$\pm 0,5\%$	-	-	-	-	$\pm 10\%$	$\pm 5\%$

Een voorbeeld: Een weerstand heeft opeenvolgende ringen van groen, blauw, oranje en goud. Groen is 5, blauw 6, oranje 3 nullen en goud een tolerantie van 5%. De tolerantiegrenzen zijn dan $56 \text{ k}\Omega \pm 5\%$, dat is $56 \text{ k}\Omega + 280 \text{ }\Omega$ en $56 \text{ k}\Omega - 280 \text{ }\Omega$.

Weerstanden zijn temperatuurafhankelijk. Bij metaal is de temperatuurcoëfficiënt positief. Dan loopt de weerstand bij stijgende temperatuur iets op. Koolweerstand gedragen zich omgekeerd: hun weerstand daalt bij stijgende temperatuur. Het effect is bij normale werktemperaturen klein, dus zelden van belang.

3.6.2 Thermistors



Figuur 3.6-1. Weerstand, temperatuur en temperatuurcoëfficiënt van thermistors.

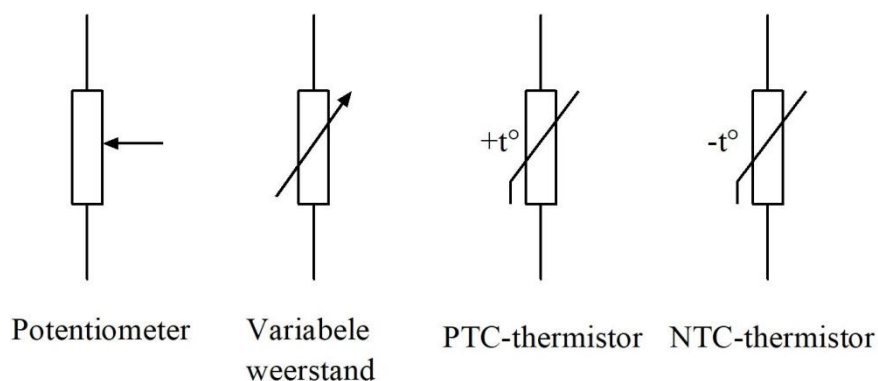
Figuur 3.6-1 toont het gedrag van weerstanden die met opzet zo zijn gemaakt, dat hun weerstand flink verandert bij stijgende of dalende temperatuur. Ze heten *thermistors*. We

¹ Als ring 4 ontbreekt, is de tolerantie 20%.

kennen PTC en NTC-thermistors. PTC staat voor Positieve TemperatuurCoëfficiënt, NTC van Negatieve TemperatuurCoëfficiënt. Hun schemasymbolen staan in Figuur 3.6-2.

3.6.3 Variabele weerstanden

Van variabele weerstanden kun je de waarde instellen. Het zijn weerstanden met een instelbare aftakking. Meestal zijn er drie uiteinden: de twee ‘normale’ aansluitingen van een weerstand en één daartussen. Als alle drie de aansluitingen worden gebruikt, spreekt men van een *potentiometer* of kortweg *potmeter*. Een potentiometer dient om in een schakeling een spanning in te stellen. Dat instellen kan éénmalig zijn. Dan spreken we over een *instel-* of *trim*potentiometer. Het kan ook de bedoeling zijn om de werking van een schakeling voortdurend te kunnen beïnvloeden. Hoe dat precies werkt, zien we bij het schakelen van weerstanden (paragraaf 3.7). De schemasymbolen staan in Figuur 3.6-2.



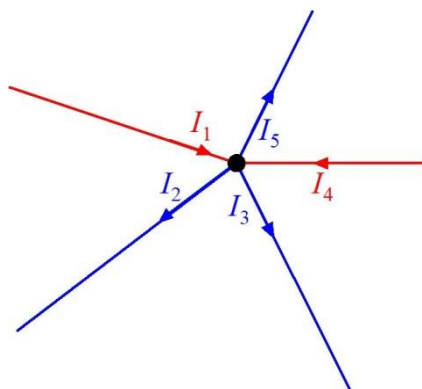
Figuur 3.6-2. Schemasymbolen voor potentiometer, variabele weerstand en thermistors. Bij de potentiometer is de lijn met de pijl het schuifcontact.

3.7 Schakelingen van weerstanden

3.7.1 Soorten schakelingen, wetten van Kirchhoff

Weerstanden kunnen in serie of parallel worden geschakeld. In serie betekent: kop aan staart. Parallel betekent naast elkaar, dus kop aan kop, staart aan staart. Bij serieschakeling loopt door de seriegeschakelde weerstanden dezelfde stroom, bij parallelschakeling staat over de parallel geschakelde weerstanden dezelfde spanning. Dit uitgangspunt hebben we nodig als we bij een schakeling de wet van Ohm willen toepassen.

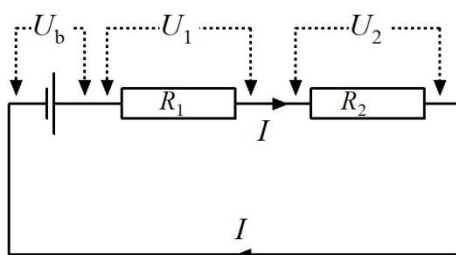
Daarbij gebruiken we de wetten van Kirchhoff. Er zijn er twee, de *eerste* en de *tweede wet van Kirchhoff*. De eerste wet van Kirchhoff gaat over stroom. Hij luidt: “een knooppunt van een elektrisch netwerk ontvangt evenveel stroom als eruit gaat”. Figuur 3.7-1 geeft zo’n knooppunt weer. Via de rode takken loopt evenveel stroom het knooppunt in als er via de blauwe takken uitloopt.



Figuur 3.7-1. Stroomknooppunt met vijf takken. De stromen naar het knooppunt zijn rood, die van het knooppunt af zijn blauw.

Je kunt de eerste wet van Kirchhoff heel goed de “wet van behoud van stroom” noemen. Hij heet dan ook wel de *Stroomwet van Kirchhoff*.

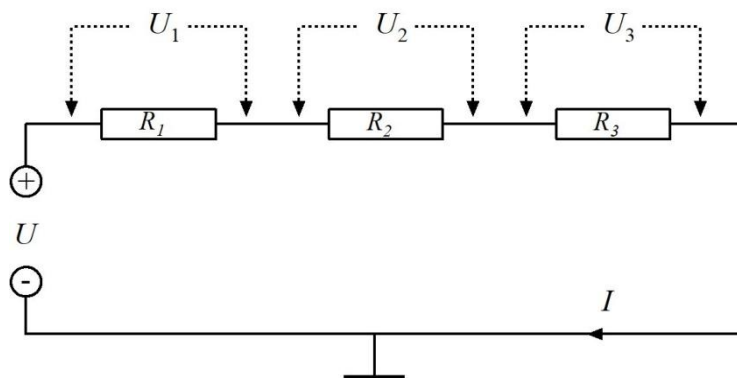
Bij een stroomwet hoort een spanningswet. Dat is de *tweede wet van Kirchhoff*. Die bekijken we aan de hand van Figuur 3.7-2.



Figuur 3.7-2. Kring met batterij en twee weerstanden.

De batterij levert een spanning U_b . De pluskant van de batterij zit rechts. Over weerstand R_1 staat spanning U_1 . De spanning op de rechter aansluiting van de weerstand is lager dan die op de linker. Dan is de linkerkant de ‘pluskant’ van de weerstand. Hetzelfde geldt voor R_2 waar spanning U_2 overheen staat. De polariteit over de weerstanden is dus andersom vergeleken met de batterij. Samen zijn U_1 en U_2 even groot als U_b , maar hun polariteit is tegengesteld aan die van U_b . De som van de drie spanningen is dus inderdaad 0. Er komt nergens stiekem een millivoltje bij en er gaat nergens ééntje vanaf. De “wet van behoud van spanning” dus.

3.7.2 Serieschakeling van weerstanden



Figuur 3.7-3. Serieschakeling van drie weerstanden.

De weerstanden in Figuur 3.7-3 staan in serie. De stroom I wordt bepaald door de spanning U en de drie weerstanden. Dezelfde stroom loopt door alle drie de weerstanden. In en tussen de weerstanden komt er niets bij en gaat er niets af, zegt Kirchhoff. Dan moet de totale weerstand R_{tot} wel gelijk zijn aan de som van de weerstanden R_1 t/m R_3 . Dus

$$R_{tot} = R_1 + R_2 + R_3 \quad (3.7-1)$$

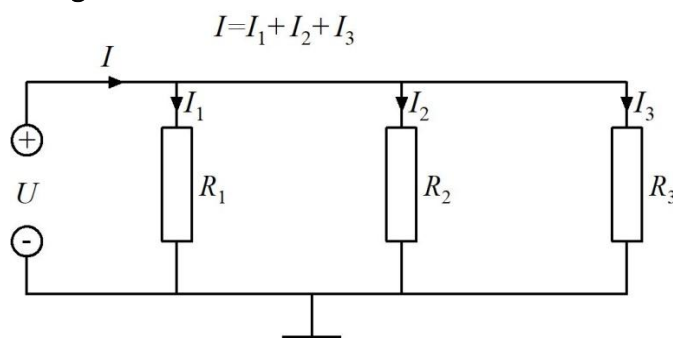
R_{tot} wordt de *vervangingsweerstand* genoemd. I bereken je met de wet van Ohm uit U en R_{tot} . De afzonderlijke spanningen U_1 t/m U_3 bereken je uit I en de weerstanden R_1 t/m R_3 . Voor n weerstanden in serie kunnen we schrijven

$$R_{tot} = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (3.7-2)$$

Onthoud:

Bij serieschakeling van weerstanden is de vervangingsweerstand gelijk aan de som van de in serie geschakelde weerstanden.

3.7.3 Parallelschakeling van weerstanden



Figuur 3.7-4. Parallelschakeling van drie weerstanden.

Figuur 3.7-4 toont de parallelschakeling van drie weerstanden. De spanning U staat over alle drie de weerstanden. De stroom I door de hele schakeling is de som van de stromen I_1 t/m I_3 door de weerstanden R_1 t/m R_3 . I is omgekeerd evenredig met R (Wet van Ohm).

Daarom is het omgekeerde van de vervangingsweerstand R_{tot} de som van de omgekeerden van de drie weerstanden. Dus

$$\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (3.7-3)$$

En voor n weerstanden geldt:

$$\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (3.7-4)$$

Voor twee parallel geschakelde weerstanden R_1 en R_2 is uit (3.7-3) af te leiden:

$$R_{tot} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.7-5)$$

Onthoud:

Bij parallelschakeling van weerstanden is de omgekeerde van de vervangingsweerstand gelijk aan de som van de omgekeerden van de afzonderlijke weerstanden.

Dit is de algemene regel. Voor twee parallel geschakelde weerstanden geldt:

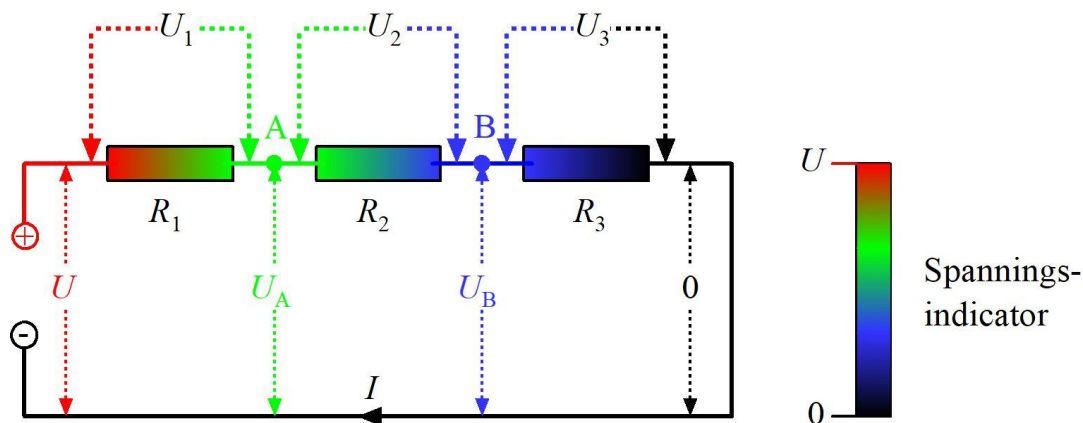
Bij parallelschakeling van twee weerstanden is de vervangingsweerstand gelijk aan het product van beide gedeeld door de som van beide.

3.7.4 Een nuttige controle op de vervangingsweerstand bij serie- en parallelschakeling

Uit de vergelijkingen (3.7-2) en (3.7-4) zijn twee controles op rekenuitkomsten af te leiden:

1. Bij serieschakeling van weerstanden is de vervangingsweerstand altijd groter dan de grootste afzonderlijke weerstandswaarde
2. Bij parallelschakeling van weerstanden is de vervangingswaarde altijd kleiner dan de kleinste afzonderlijke weerstandswaarde.

3.7.5 Spanningsdelers



Figuur 3.7-5 Spanningsdeler met drie weerstanden en spanningsverloop aangegeven in kleur (van rood via groen naar blauw en zwart). Knooppunten A en B met spanning U_A en U_B .

Een spanningsdeler bestaat uit twee of meer in serie geschakelde weerstanden zoals weergegeven in Figuur 3.7-5. De hoogste spanning is U op de plusaansluiting links.

Binnen elke weerstand daalt de potentiaal gelijkmatig van het linker naar het rechter aansluitpunt. Dat is aangegeven met een kleurverloop. Rood is U en zwart is 0. Over elke weerstand staat een potentiaalverschil. Voor de weerstanden R_1 , R_2 en R_3 is dat respectievelijk U_1 , U_2 en U_3 . Elke U_n is evenredig met de bijbehorende weerstand R_n .

Een verbindingsleiding heeft maar één kleur. Langs leidingen verandert de potentiaal nu eenmaal niet merkbaar. De knooppunten tussen de weerstanden heten A en B. De spanning U_A op A is $U - U_1$ en U_B is $U - U_1 - U_2$, maar ook gelijk aan U_3 .

De spanning op een knooppunt in een serieschakeling van weerstanden is gelijk aan de spanning over de hele schakeling, vermenigvuldigd met de weerstand die de stroom nog moet passeren en gedeeld door de totale weerstand.

Voor knooppunt A moeten R_2 en R_3 nog worden gepasseerd. De totale weerstand is $R_1 + R_2 + R_3$, zoals het hoort bij in serie geschakelde weerstanden. Dan geldt voor de spanning U_A :

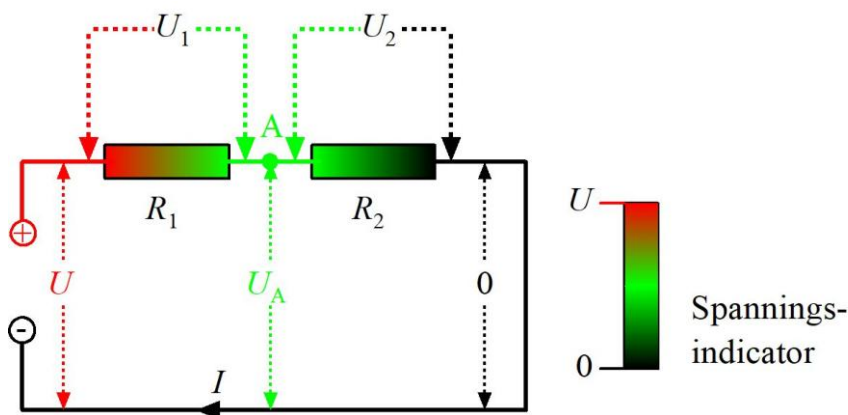
$$U_A = U \frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (3.7-6)$$

Voor U_B waar de stroom alleen R_3 nog moet passeren, geldt dan

$$U_B = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} U \quad (3.7-7)$$

En dat is óók gelijk aan U_3 .

Als we in Figuur 3.7-5 R_3 weglaten, ontstaat een spanningsdeler met maar twee weerstanden R_1 en R_2 en één knooppunt, A. Die zien we in Figuur 3.7-6.



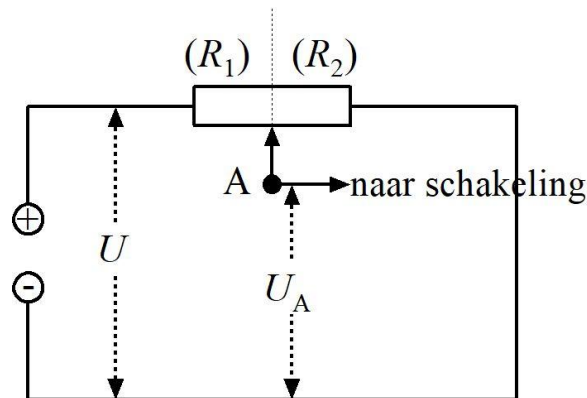
Figuur 3.7-6. Spanningsdeler als in Figuur 3.7-5, maar met twee weerstanden en dus één knooppunt.

Daarvoor geldt volgens de vetgedrukte regel op deze bladzijde:

$$U_A = U \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.7-8)$$

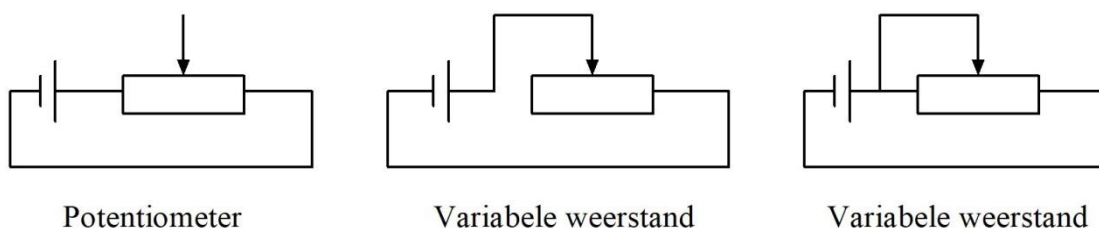
3.7.6 De potentiometer iets uitgebreider

Figuur 3.7-6 geeft eigenlijk niets anders weer dan een potentiometer (schemasympbool in Figuur 3.6-2). Hij heeft alleen met twee vaste weerstanden zoiets als een vastgezet schuifcontact. Vergelijking (3.7-8) heeft door die gelijkenis niet alleen betrekking op het gedrag van de spanningsdeler in Figuur 3.7-6, maar ook op de spanning op het schuifcontact van een potentiometer (Figuur 3.7-7).



Figuur 3.7-7. Potentiometervariant van Figuur 3.7-6. R_1 en R_2 staan tussen haakjes omdat ze samen één potentiometer vormen. Het gestippelde dunne scheidelijntje valt samen met het schuifcontact dat knooppunt A voorstelt.

De waarde van de $R_1 + R_2$ in vergelijking (3.7-8) is in een potentiometer onveranderlijk. R_1 en R_2 variëren tussen 0 en de volle weerstand tussen de aansluitpunten. Een potentiometer kan dan ook dienen als variabele weerstand (Figuur 3.7-8).



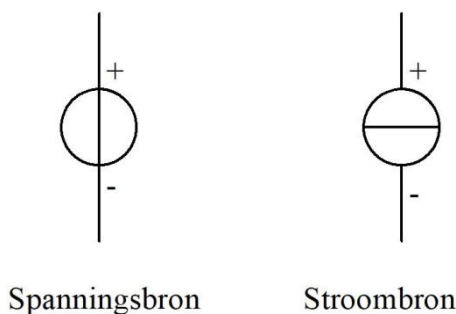
Figuur 3.7-8. Links een potentiometer. Rechts de potentiometer als variabele weerstand in twee varianten.

De batterij in de figuur is niet strikt nodig. Ook daarzonder is een weerstand een weerstand. Van de variabele weerstand in het midden is het linker contact niet aangesloten, bij de rechter wel. In beide gevallen doet alleen het rechterdeel van de potentiometer mee. Praktisch is er geen verschil tussen beide schakelingen.

3.8 Spannings- en stroombronnen, afzonderlijk en geschakeld

3.8.1 De bronnen

Vaak worden schema's getekend met ideale stroom- en spanningsbronnen. De schemasymbolen zien we in Figuur 3.8-1.

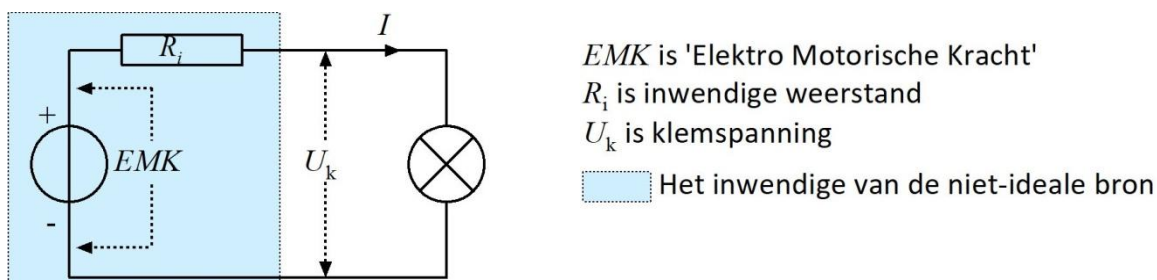


Figuur 3.8-1. Schemasymbolen voor de ideale spanningsbron (links) en de ideale stroombron (rechts).

3.8.2 De spanningsbron, EMK en klemspanning

Een ideale spanningsbron heeft geen weerstand. Een echte spanningsbron heeft die wel. Sluit een batterij aan op een voltmeter en je meet een spanning. Sluit dan een lampje aan op de batterij. De gemeten batterijspanning is dan lager. De batterij moet daarom van binnen weerstand hebben.

Een spanningsbron in de 'echte' wereld kun je splitsen in een serieschakeling van een ideale bron en een weerstand. Als er geen stroom wordt afgenomen, levert de combinatie de bronspanning, want zonder stroom staat over de weerstand 0V. De spanning die we dan meten, heet ElektroMotorische Kracht, afgekort EMK. Een betere, maar minder gangbare naam is *bronspanning*. De weerstand heet de *inwendige weerstand*. Zodra er stroom loopt, ontstaat er een spanning over de inwendige weerstand. Dan is de spanning op de aansluitingen lager dan de EMK. Die spanning heet *klemspanning*, vaak aangeduid met symbool U_k (Figuur 3.8-2).



Figuur 3.8-2. Niet-ideale spanningsbron met belasting in de vorm van een lampje. Inwendige weerstand, stroom I , EMK en klemspanning U_k aangegeven.

3.8.3 Hoeveel vermogen leveren een ideale en een niet-ideale bron?

Voor een **ideale spanningsbron** geldt: hoe kleiner de belastingsweerstand R , hoe groter het vermogen P dat buiten de bron beschikbaar komt. Vergelijking (3.5-4) geeft het antwoord in vergelijkingvorm:

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (3.5-4)$$

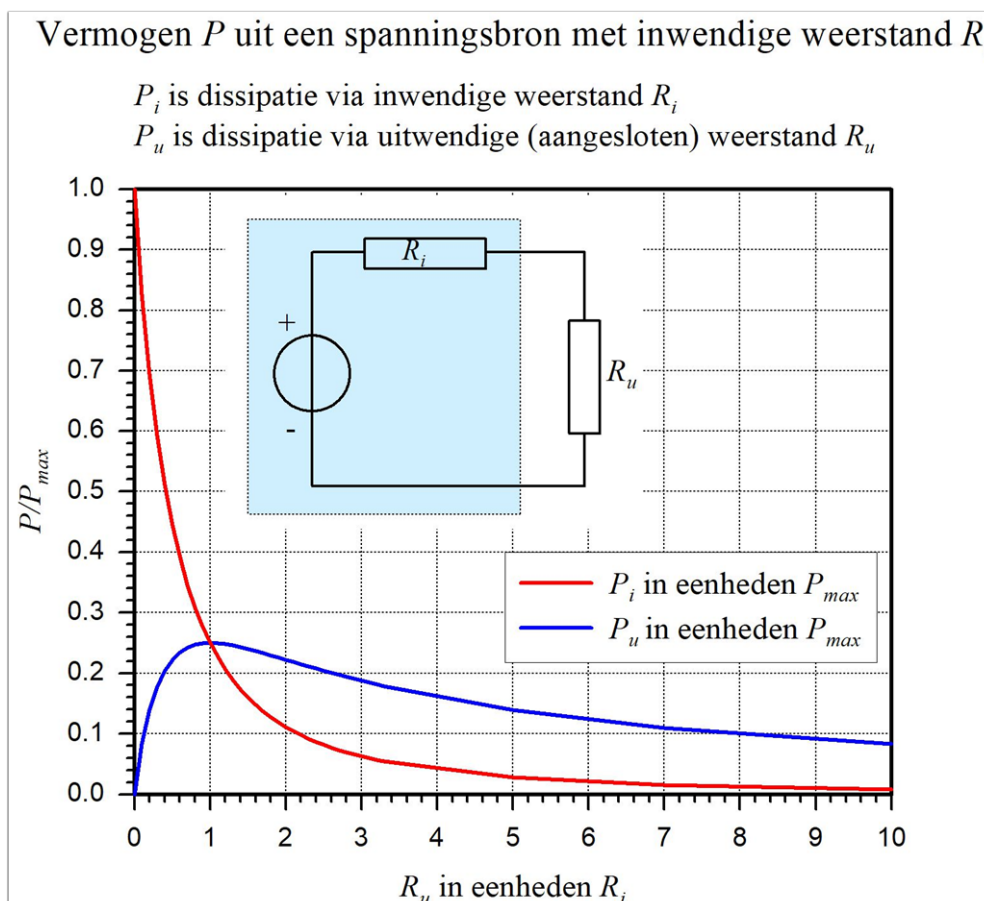
De bronspanning U ligt vast. R staat in de noemer, dus hoe kleiner R , hoe groter P .

Bij een niet-ideale bron verbruikt de inwendige weerstand een deel van het vermogen. De totale weerstand R van de stroomkring is de som van R_i en de uitwendige weerstand R_u , want die twee staan in serie. R en de EMK bepalen de stroom. Voor twee extreme situaties valt eenvoudig te bedenken wat er gebeurt:

Situatie 1: R_u is 0 (kortsluiting). Dan is $R = R_i$. Dit is vergelijking (3.5-4) van de ideale bron die meer vermogen levert, naarmate R kleiner is.

Situatie 2: R_u is oneindig (niets aangesloten). Het geleverde vermogen is 0, want de weerstand van de hele stroomkring is oneindig.

Als we R_u van 0 naar oneindig laten groeien, gaan we van situatie 1 naar situatie 2. We doen dat in twee stappen en aan de hand van Figuur 3.8-3.



Figuur 3.8-3. Vermogensdissipatie P van een niet-ideale bron (inzet; bron en inwendige weerstand R_i in blauw veld en uitwendige weerstand R_u). De eenheid voor dissipatie is de maximale dissipatie P_{max} . Die ontstaat bij kortgesloten aansluitpunten ($R_u=0$). Eenheid van weerstand is de inwendige weerstand R_i .



Stap 1. R_u gaat van 0 naar R_i . Dat is de waarde 1 op de horizontale schaal. De totale weerstand R in de kring is dan gelijk aan $R_i + R_u$. Als $R_u = R_i$, dan is $R = 2R_i = 2R_u$. Het vermogen P in de kring gehalveerd. Omdat R_i en R_u even groot zijn, is P gelijk verdeeld over beide weerstanden. Elk de helft van de helft is elk een kwart van P_{max} . Dat is op het snijpunt van de blauwe en de rode curve.

Stap 2. Naarmate R_u groter wordt, neemt het vermogen verder af. R_i blijft gelijk. Het aandeel van P_i in P neemt steeds verder af. Doordat het totale vermogen P met toenemende R_u afneemt, doet P_u (blauwe curve) dat ook, al is het langzamer dan P_i . De grafiek loopt tot $R_u = 10R_i$, maar het proces loopt door tot oneindig.

Conclusie: Een niet-ideale bron levert het hoogste vermogen aan een uitwendige weerstand als die gelijk is aan de inwendige weerstand.

Dit is het belangrijkste uitgangspunt als het erom gaat, uit een zender zoveel mogelijk energie de antenne in te krijgen. De zender is de bron, de antenne de belasting.

3.8.4 Schakelen van spanningsbronnen

Spanningsbronnen kunnen heel goed in serie worden geschakeld. De totaalspanning is de som van de spanningen van de afzonderlijke bronnen.

Bij serieschakeling van niet-ideale spanningsbronnen tel je behalve de spanningen ook de inwendige weerstanden op om de vervangende niet-ideale spanningsbron te vinden.

Parallel schakelen van spanningsbronnen kan in theorie. Ze moeten dan volledig identiek zijn, want bij elk klein spanningsverschilletje stuurt de ene bron een stroom door de andere. Dat geldt ook voor niet-ideale bronnen.

Een overzicht voor in serie en parallel geschakelde niet-ideale spanningsbronnen staat in Tabel 3.8-1.

Tabel 3.8-1. Overzicht serie- en parallelschakeling van niet-ideale spanningsbronnen met spanning U en inwendige weerstand R_i .

Schakeling	R_i	U	Beperking
Serie (n bronnen)	$R_i = R_{i1} + \dots + R_{in}$	$U = U_1 + \dots + U_n$	-
Parallel (n bronnen)	$R_i = \frac{R_{i1}}{n} = \dots = \frac{R_{in}}{n}$	$U = U_1 = \dots = U_n$	Bronnen identiek

3.8.5 Schakelen van stroombronnen

Stroombronnen parallel schakelen kan. De afzonderlijke stromen worden opgeteld. In serie schakelen werkt niet. Bron A wil stroom A leveren, bron B stroom B. Beide stromen moeten dan samen door beide bronnen lopen en dat gaat niet.



Niet-ideale stroombronnen hebben een inwendige weerstand die niet oneindig is. Voor parallel geschakelde stroombronnen wordt de vervangende inwendige weerstand berekend als de vervangende weerstand van een parallelschakeling.

3.8.6 De capaciteit van een batterij of accu

De capaciteit van een batterij of van een accu wordt meestal uitgedrukt in Ah, ampère-uur. 1 Ah betekent 1 A gedurende precies 1 uur, $\frac{1}{2}$ A gedurende 2 uur, 2 A gedurende $\frac{1}{2}$ uur, enz. De capaciteit is het product van stroom en tijdsduur waarin die stroom kan worden geleverd. De Ah is een broertje van de C (coulomb), de eenheid van lading. 1 coulomb is gelijk aan 1 As, ampèreseconde, dus $1\text{ C} = 1\text{ As}$.

Capaciteit is dan ook niet hetzelfde als energie, maar is de hoeveelheid lading die een accu of batterij kan leveren. Ook met spanning heeft deze grootheid niets te maken. Een batterij van 120 V en 1 Ah geeft 100 maal zoveel energie als één van 1,2 V en 1 Ah, maar heeft toch een even grote capaciteit.