



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	3-7
3.5	Energie en arbeid, vermogen en dissipatie.....	3-9
3.6	Uitvoeringsvormen van weerstanden	3-10
3.6.1	Vaste weerstanden	3-10
3.6.2	Thermistors.....	3-11
3.6.3	Variabele weerstanden.....	3-11
3.7	Schakelingen van weerstanden.....	3-12
3.7.1	Soorten schakelingen, wetten van Kirchhoff	3-12
3.7.2	Serieschakeling van weerstanden.....	3-13
3.7.3	Parallelschakeling van weerstanden	3-14
3.7.4	Een nuttige controle op de vervangingsweerstand bij serie- en parallelschakeling.....	3-15
3.7.5	Spanningsdelers	3-15
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	3-18
3.8.3	Hoeveel vermogen leveren een ideale en een niet-ideale bron?.....	3-18
3.8.4	Schakelen van spanningsbronnen	3-20
3.8.5	Schakelen van stroombronnen	3-20
3.8.6	De capaciteit van een batterij of accu	3-21



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. Hoe meet je stroom, spanning en weerstand? Daarna komen vermogen en arbeid (energie) en dissipatie (verbruik van vermogen) aan de orde.

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

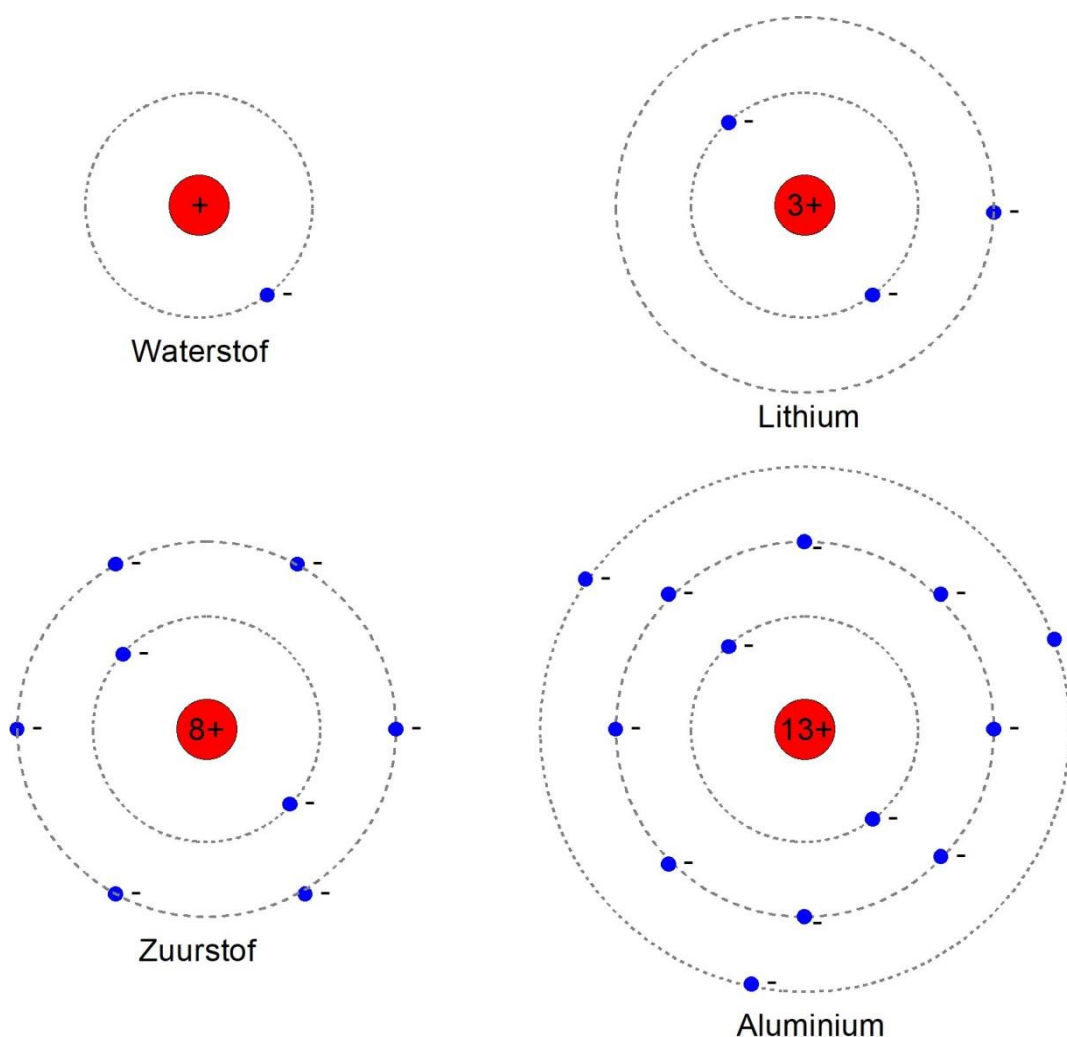
Stroom is verplaatsing van elektronen. Elektronen zijn onderdelen van atomen. Een elektron is de kleinste mogelijke elektrische lading. Die lading noemen we negatief.

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 dus tegen de technische stroomrichting in. Dit is een ongelukkige erfenis uit een ver verleden, toen men wel wist dat er ‘iets’ stroomde, maar niet wist wat het precies was.

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

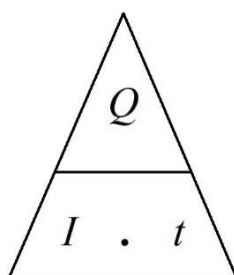
De eenheid van lading is de coulomb, afgekort C. 1 C is de lading van $6,241\,506 \cdot 10^{18}$ protonen; -1 Coulomb is de lading van $6,241\,506 \cdot 10^{18}$ elektronen Het symbool voor lading is Q . De eenheid van stroomsterkte is de ampère, afgekort A. Het symbool voor stroom is I . Bij een stroom van 1A wordt elke seconde 1 C verplaatst. In vergelijkingvorm:

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

Dat kan ook worden geschreven als

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

In woorden: stroom is lading per tijd en tijd is verplaatste lading gedeeld door de stroomsterkte. 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 subparagraaf blijkt dat spanning altijd een verschil is. Je meet spanning dus altijd als potentiaalverschil tussen twee punten in een schakeling.

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 . Het symbool voor de grootte spanning is U . Een spanning meet je altijd tussen twee punten, zoals de polen van een batterij of een auto-accu.

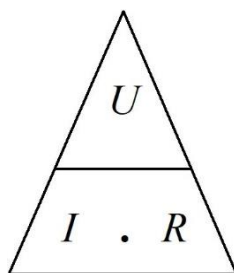
Stroom stroomt dus onder invloed van spanning. Bij een geleider gaat dat gemakkelijk, bij een isolator bijna niet. Als de spanning te groot wordt, kan stroom toch door een isolator lopen. Die is daarna meestal stuk. *Doorslag* heet dat. Een voorbeeld is de bliksem.

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**:

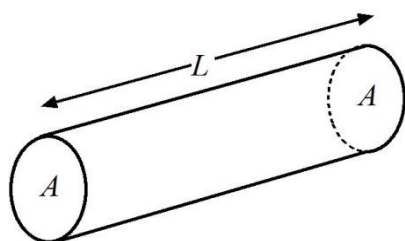
$$U = IR \quad (3.3-3)$$

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 zoals 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 geleidend materiaal heeft zijn eigen soortelijke weerstand. Ook de temperatuur beïnvloedt de weerstand, bij het ene materiaal meer dan bij het andere. We bekijken Figuur 3.3-3.



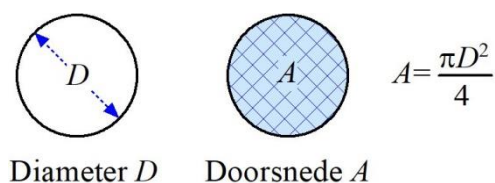
Figuur 3.3-3. Ronde geleider met doorsnede A en lengte L .

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

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

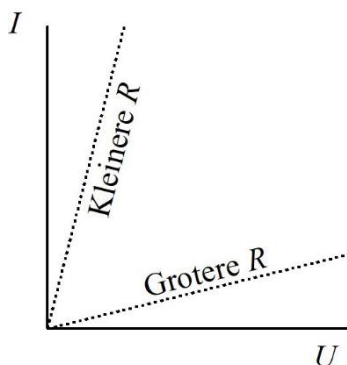
L gaat in m, A in m^2 , want L is een lengte, A een oppervlakte. Als R in Ω wordt uitgedrukt, moet ρ worden uitgedrukt in Ωm , anders komen we een lengte-eenheid te kort.

Iets om op te letten is gebruik van *diameter* in plaats van *doorsnede*. De diameter is de afstand tussen tegenoverliggende punten op de doorsnede van een ronde draad. Figuur 3.3-4 laat zien hoe dat zit.



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

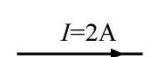
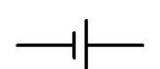
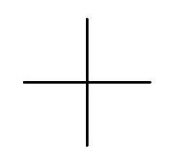
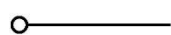
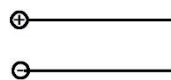
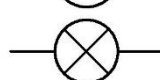


Figuur 3.3-5. Stroom-spanningskarakteristiek voor een lage en voor een hoge weerstand.

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. Bij een lage weerstand loopt de stroom I met toenemende spanning U sterker op (steile lijn) dan bij een hoge weerstand (vlakke lijn). Zie Figuur 3.3-5.

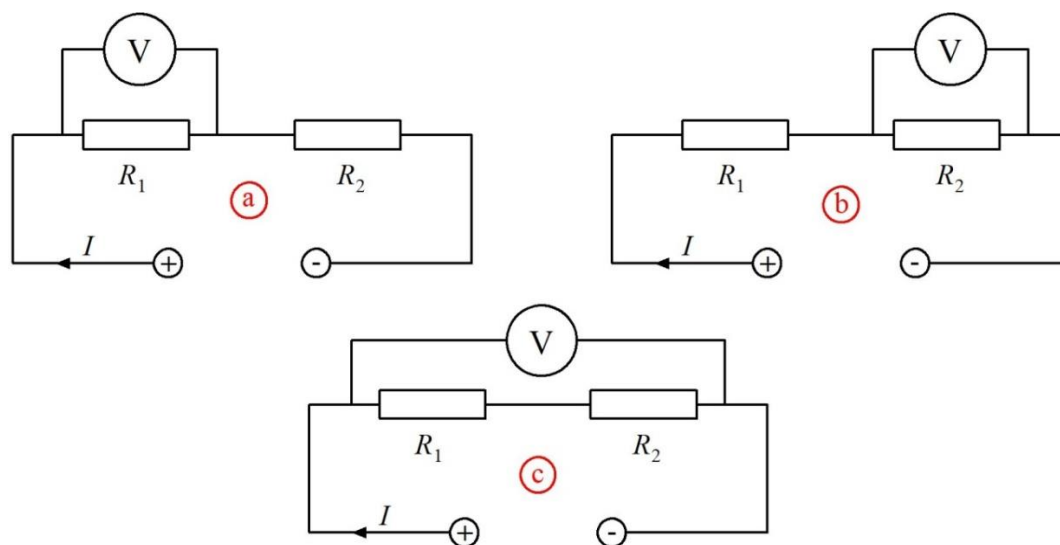
3.4 Meten van spanning, stroom en weerstand

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.

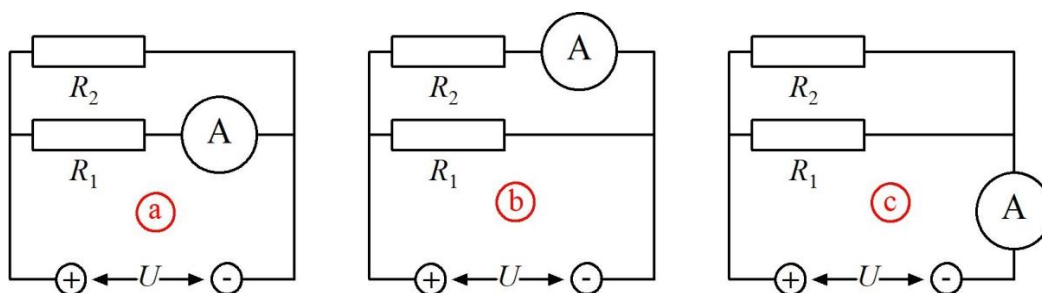
Van **spanning** weten we al dat je die altijd tussen twee punten meet. Figuur 3.4-2 geeft drie voorbeelden.



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 de schakeling.

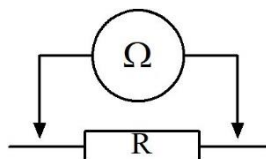
Stroom meet je *in* de stroomvoerende leiding, dus niet zoals spanning ten opzichte van een ander punt. In veel gevallen moet je de ampèremeter in de leiding opnemen. Als je geluk hebt, is een indirecte meting mogelijk, namelijk als er een bekende weerstand in de leiding zit. Meet de spanning over die weerstand met een voltmeter zoals aangegeven in Figuur 3.4-2 en reken de stroom uit met de wet van Ohm, vergelijking (3.3-3), al dan niet met behulp van Figuur 3.3-2. 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.

Het meten van **weerstand** is van de drie de lastigste. Je moet spanning over en stroom door de weerstand meten. Daarna kun je de weerstand berekenen. Een multimeter geeft de weerstand zonder rekenwerk, omdat de afleesschaal al goed staat. Je kunt de weerstand tijdens de meting niet in de schakeling laten zitten, omdat in een schakeling de stroom niet alleen maar door de te meten weerstand loopt, maar ook door de rest van de schakeling. De weerstand moet er dus uit en na de meting weer teruggesoldeerd. Maar de meeste weerstanden hebben een kleurcode die de waarde aangeeft. Meten van een weerstand in een schakeling is dus niet vaak nodig, behalve als 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.

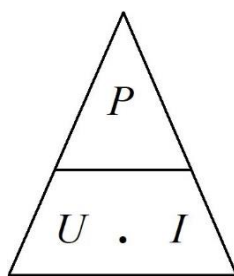
Vermogen is energie per tijd, bijvoorbeeld 1 J/s. Dat is meteen de eenheid van vermogen, de watt, afgekort W. Verwar die rechtopstaande W niet met de cursief gedrukte W van energie! En dus geldt:

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

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 desgewenst de driehoekstruc toe te passen. 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 .

Zoals gezegd, komt dat vermogen tot uiting in warmteontwikkeling. Elke weerstand waar stroom doorheen loopt, wordt warm. Dat verschijnsel heet *dissipatie*. Een weerstand dissipeert dus 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 na hun fabricage niet meer opnieuw is in te stellen. De belangrijkste typen zijn koolfilmweerstand, metaalfilmweerstand en draadgewonden weerstanden. Draadgewonden weerstanden zijn meestal bedoeld voor de wat hogere vermogens. Koolfilmweerstand bestaan uit een baan koolstof die spiraalsgewijs om een keramisch kokertje ligt. Metaalfilmweerstand hebben een soortgelijke opbouw, maar de weerstandsbaan bestaat uit heel dun metaal.

De waarde van kool- en metaalfilmweerstand 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. De kleuren en hun betekenis zijn weergegeven in Tabel 3.6-1.

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	-	$\pm 1\%$	$\pm 2\%$	-	-	$\pm 0,5\%$	-	-	-	-	$\pm 10\%$	$\pm 5\%$

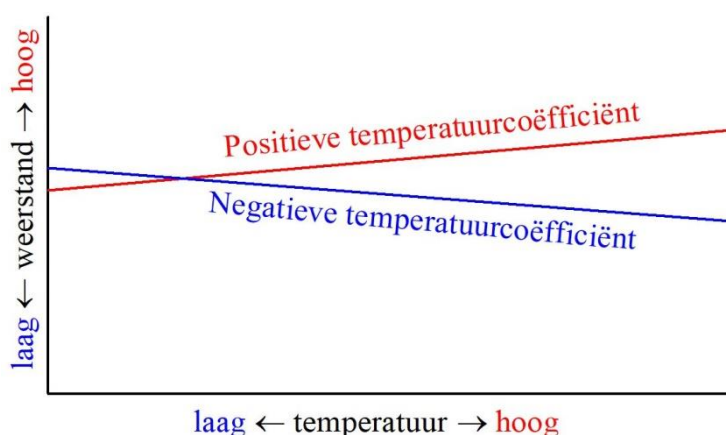
Een voorbeeld: Een weerstand heeft ringen van achtereenvolgens groen, blauw, oranje en goud. Groen is een 5, blauw is een 6, oranje betekent 3 nullen en goud betekent een tolerantie van 5%. We hebben daarmee een weerstand van 56 k Ω en een tolerantie van 5%, wat betekent dat de waarde 5%, dat is 280 Ω , naar boven of naar beneden mag afwijken.

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

Alle weerstanden zijn temperatuurafhankelijk. Bij metaal is de temperatuurcoëfficiënt positief. Dat betekent dat de weerstand bij stijgende temperatuur oploopt. Koolweerstanden gedragen zich omgekeerd: hun weerstand loopt terug bij stijgende temperatuur. In de meeste schakelingen is dat niet van belang, doordat het effect bij normale werktemperaturen klein is.

3.6.2 Thermistors

Er bestaan ook weerstanden die met opzet zó zijn gemaakt, dat hun weerstand flink verandert bij stijgende of dalende temperatuur. Ze heten *thermistors*. We kennen PTC en NTC-thermistors. PTC is de afkorting van Positieve TemperatuurCoëfficiënt, NTC (je raadt het!) van Negatieve TemperatuurCoëfficiënt. Figuur 3.6-1 toont de grafische weergave van hun gedrag.

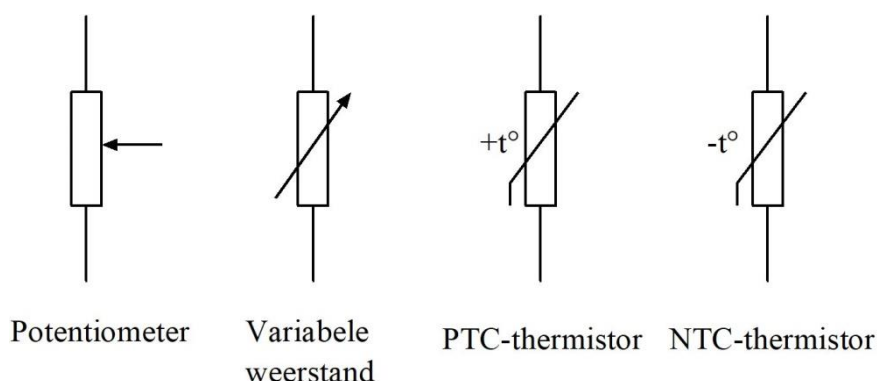


Figuur 3.6-1. Weerstand, temperatuur en temperatuurcoëfficiënt.

De 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 *trimpotentiometer*. Het kan ook een manier zijn om de werking van een schakeling voortdurend te kunnen beïnvloeden. Hoe dat precies werkt, zien we bij het schakelen van weerstanden (3.7). De schemasymbolen staan in Figuur 3.6-2.



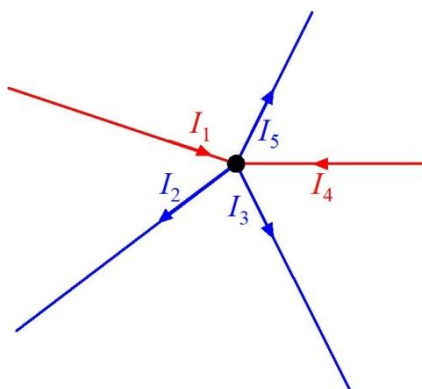
Figuur 3.6-2. Schemasymbolen voor potentiometer, variabele weerstand en thermistors. Bij de potentiometer is de lijn met de pijl het schuifcontact.

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 dezelfde spanning over de parallel geschakelde weerstanden. Dit is een uitgangspunt dat we nodig hebben als we bij een schakeling de wet van Ohm willen toepassen.

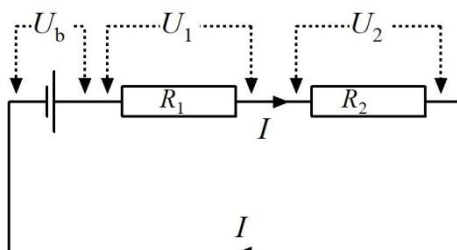
Daarbij hebben we de wetten van Kirchhoff nodig. Er zijn er twee. Ze staan bekend als de *eerste* en de *tweede wet van Kirchhoff*. De eerste wet van Kirchhoff gaat over stroom. Hij luidt: “een knooppunt van een elektrisch netwerk ontvangt evenveel stroom als eruit gaat”. In Figuur 3.7-1 loopt er dus via de rode takken 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 het behoud van stroom” noemen. Hij wordt ook wel de *Stroomwet van Kirchhoff* genoemd.

Bij een stroomwet hoort een spanningswet. Die is er. Het is de *tweede wet van Kirchhoff*.

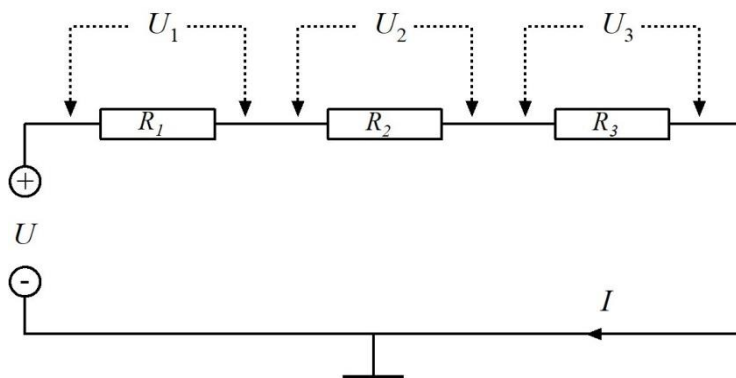


Figuur 3.7-2. Kring met batterij en twee weerstanden.

Die bekijken we aan de hand van Figuur 3.7-2. De batterij levert een spanning U_b . De pluskant is de rechterkant van de batterij. Over de weerstand R_1 staat de spanning U_1 . De spanning op de linker aansluiting van de weerstand is hoger dan die op de rechter aansluiting. De rechterkant is dus de ‘minkant’ van de weerstand. Hetzelfde geldt voor R_2 waar de spanning U_2 overheen staat. Samen zijn U_1 en U_2 even groot als U_b , maar de polariteit van U_b is tegengesteld aan die van zowel U_1 als U_2 . De som van de drie spanningen is dus inderdaad 0, als je maar let op de polariteit. Er komt in de hele schakeling nergens stiekem een millivoltje bij en er gaat er ook nergens ééntje vanaf. De “wet van het behoud van spanning” dus.

3.7.2 Serieschakeling van weerstanden

De weerstanden in Figuur 3.7-3 staan in serie.



Figuur 3.7-3. Serieschakeling van drie weerstanden.

De stroom I wordt bepaald door de spanning U en de drie weerstanden. Alle stroom moet alle drie de weerstanden passeren. In en tussen de weerstanden komt er niets bij en gaat er niets af, hebben we van Kirchhoff geleerd. 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

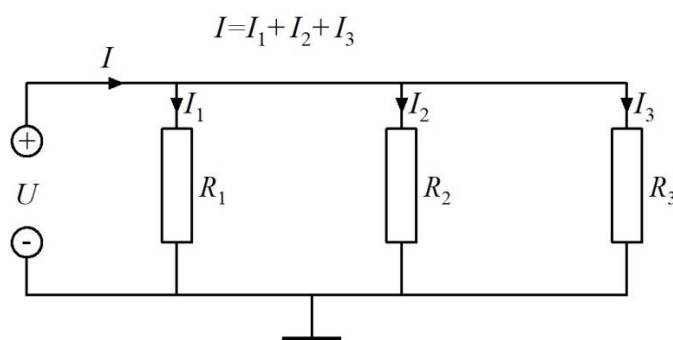
$$R_{tot} = R_1 + R_2 + \dots + R_n \quad (3.7-2)$$

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 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 . Volgens de wet van Ohm is I omgekeerd evenredig met R . Daarom is het omgekeerde van de vervangingsweerstand de som van de omgekeerden van de drie weerstanden.



Figuur 3.7-4. Parallelschakeling van 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 kennen we dan nog een bijzondere vergelijking, af te leiden uit (3.7-3) onder weglating van R_3

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

Onthoud:

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

Dit is de algemene regel. Voor twee parallel geschakelde weerstanden geldt ook de bijzondere regel, maar die is afgeleid uit de algemene regel.

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

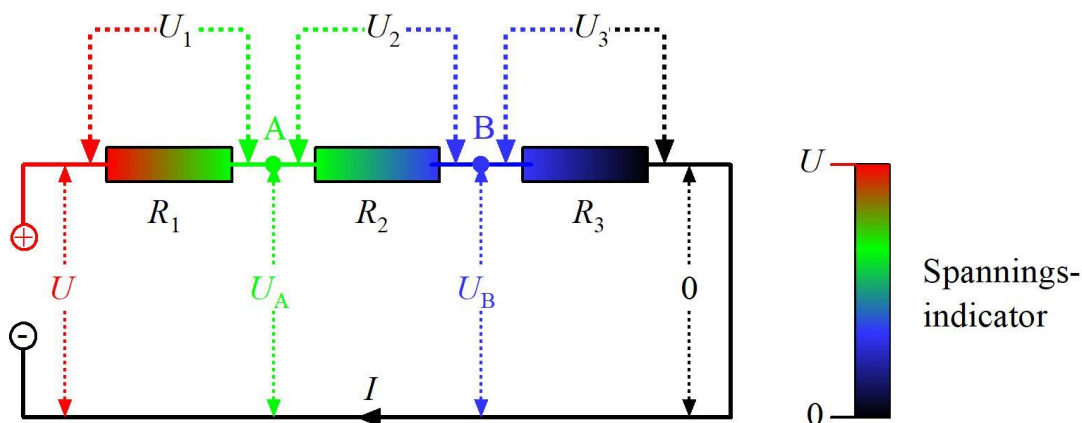
3.7.4 Een nuttige controle op de vervangingsweerstand bij serie- en parallelschakeling

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

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.



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 .

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 daardoor een potentiaalverschil. Voor de drie weerstanden R_1 , R_2 en R_3 is dat respectievelijk U_1 , U_2 en U_3 . Elk potentiaalverschil is evenredig met de weerstand (en met de stroom, maar die is voor alle weerstanden dezelfde).

Een verbindingsleiding heeft maar één kleur, want in leidingen verandert de potentiaal 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 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 :

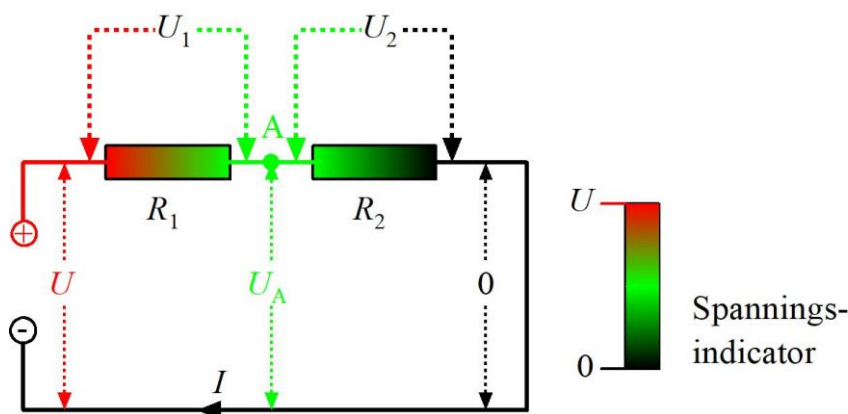
$$U_A = \frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3} U \quad (3.7-6)$$

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.



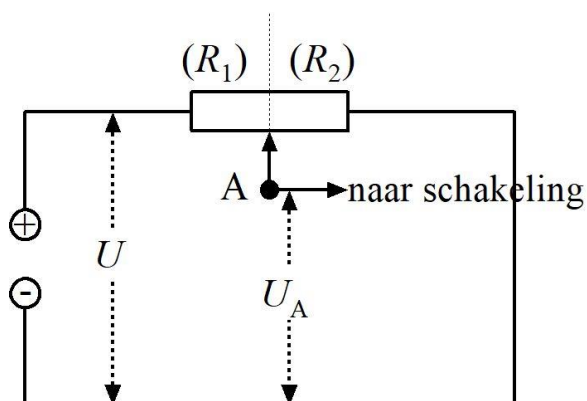
Figuur 3.7-6. Spanningsdeler als in Figuur 3.7-5, maar met twee weerstanden en dus één knooppunt.

Daarvoor geldt volgens dezelfde vetgedrukte regel op de vorige bladzijde

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

3.7.6 De potentiometer iets uitgebreider

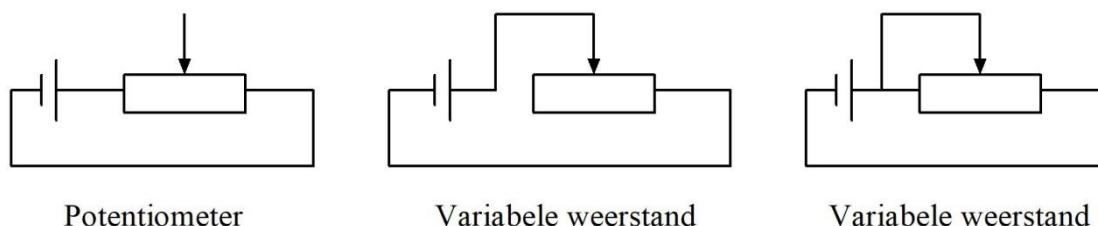
Figuur 3.7-6 is eigenlijk niets anders dan een potentiometer (schemasympool in Figuur 3.6-2), maar dan één met een vastgezet schuifcontact. In een 'echte' potentiometer is de som van R_1 en R_2 constant, want het is de weerstand tussen de uiteinden. Die verandert niet door de positie van een schuifcontact. Vergelijking (3.7-8) heeft dus niet alleen betrekking het gedrag van de spanningsdeler in de figuur, maar U_A is ook 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 noemer in vergelijking (3.7-8), $R_1 + R_2$ dus, blijft in het geval van een potentiometer constant. R_2 varieert tussen 0 en de volle weerstand tussen de aansluitpunten en U_A tussen 0 en U .

Een potentiometer kan ook dienen als variabele weerstand (Figuur 3.7-8)



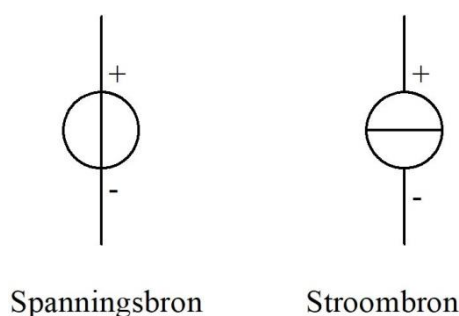
Figuur 3.7-8. Potentiometer als variabele weerstand.

De batterij in de figuur is niet strikt nodig. Ook zonder batterij blijft een weerstand een weerstand. Van de variabele weerstand in het midden is het linker contact niet aangesloten, bij de rechter wel. Omdat in beide gevallen alleen het rechterdeel van de potentiometer meedoet (het linkerdeel is ofwel niet aangesloten ofwel kortgesloten), 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. We kennen twee ideale bronnen, de spanningsbron en de stroombron. De schemasymbolen zien we in Figuur 3.8-1.

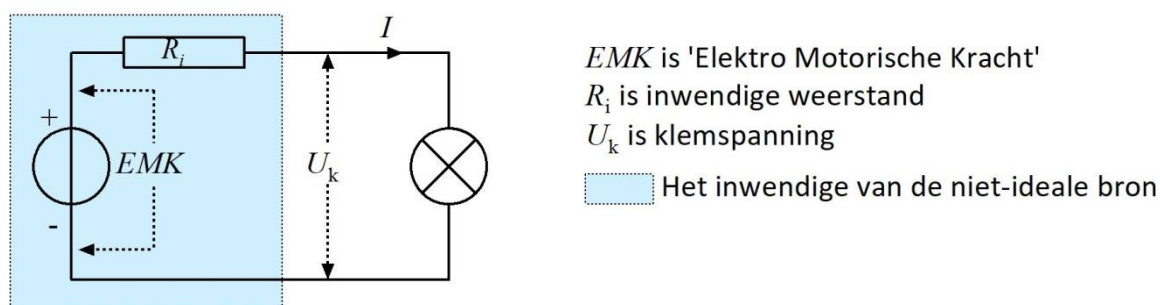


Figuur 3.8-1. Schemasymbolen voor de ideale spanningsbron (links) en de ideale stroombron (rechts).

3.8.2 De spanningsbron, EMK en klemspanning

Een ideale spanningsbron heeft geen weerstand. Een echte spanningsbron heeft dat wel. Als je een batterij aansluit op een voltmeter, meet je een spanning. Zodra de batterij een stroom levert, is de gemeten spanning lager. Dat is niet zo bij een ideale spanningsbron. Die levert altijd dezelfde spanning.

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 en verliezen we dus geen spanning. De spanning die we dan meten, wordt ElektroMotorische Kracht, afgekort EMK genoemd. Natuurkundig gezien is spanning geen kracht, maar de naam is nu eenmaal ingeburgerd. Een veel betere, maar helaas minder gangbare naam is *bronspanning*. De weerstand noemen we de *inwendige weerstand*. Zodra er stroom loopt, staat er een spanning over de inwendige weerstand en is de spanning op de aansluitingen lager dan de EMK. De spanning op de aansluitingen heet de *klemspanning*, meestal aangeduid met symbool U_k (Figuur 3.8-2)



Figuur 3.8-2. Niet-ideale spanningsbron, dus met inwendige weerstand, EMK en klemspanning U_k en met belasting in de vorm van een lampje.

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:

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

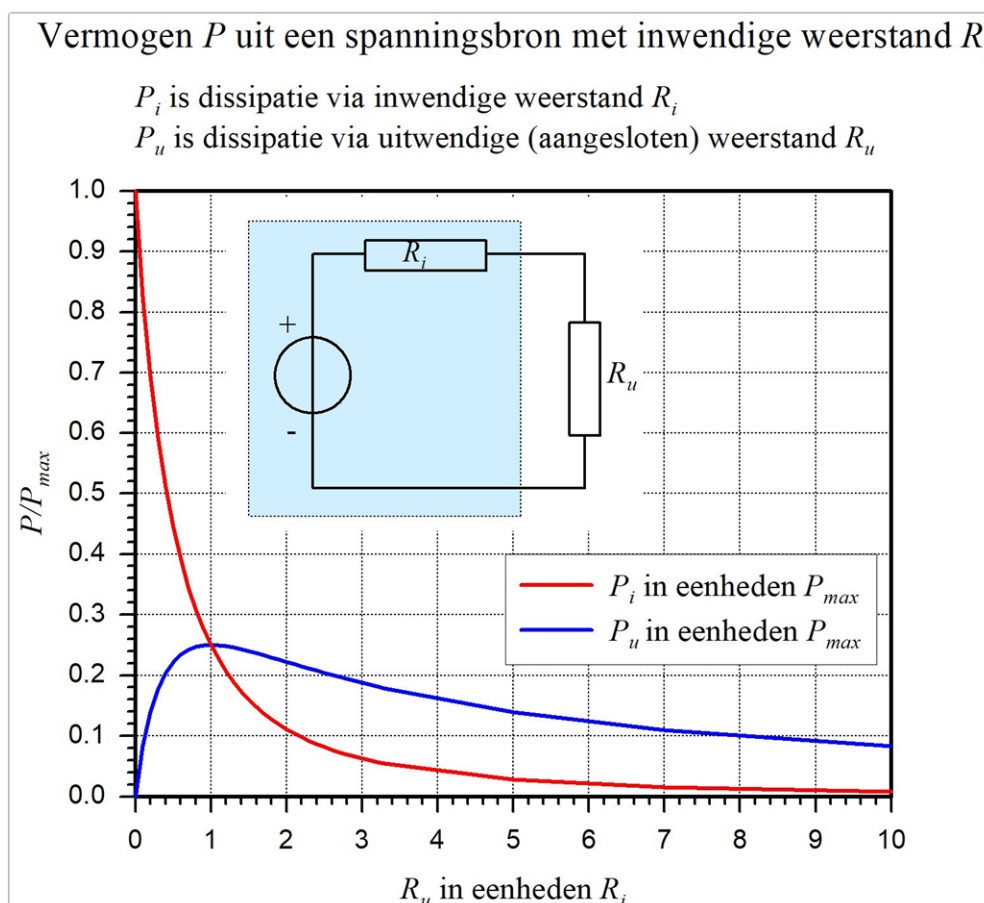
De bronspanning U ligt vast. R staat in de noemer, dus hoe kleiner R , hoe groter P .

Bij een niet-ideale bron verbruikt de inwendige weerstand een deel van het vermogen. De totale weerstand R van de stroomkring is gelijk aan $R_i + R_u$, 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} 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 gelijk is geworden aan R_i , is R gelijk aan $2R_i = 2R_u$. Dan is het vermogen P in de kring gehalveerd. Omdat R_i en R_u even groot zijn, is P precies gelijk verdeeld over beide weerstanden. Elk de helft van de helft is een kwart van P bij $R_u = 0$. 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 zijn goed parallel te schakelen. Tel de afzonderlijke stromen op en klaar is Kees. In serie schakelen werkt niet. Bron A wil stroom A leveren, bron B stroom B. Tegelijk kan dat 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 daarom 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.