



Inhoudsopgave

3	Lading, stroom, spanning en weerstand	3-5
3.1	Wat leer je in dit hoofdstuk?	3-5
3.2	Wat is elektrische stroom?	3-5
3.2.1	Elektronen, atomen en moleculen	3-5
3.2.2	Geleiders en isolatoren.....	3-8
3.2.3	Elektrische neutraliteit, ionen.....	3-9
3.2.4	Samengevat	3-9
3.3	Elektrische spanning, stroom, weerstand en vermogen.....	3-9
3.3.1	Verplaatsen van lading.....	3-9
3.3.2	Stroom is verplaatsen van elektrische lading.....	3-11
3.3.3	Spanning: potentiaalverschil tussen twee punten	3-12
3.3.4	Weerstand, wet van Ohm.....	3-13
3.3.5	Stroom-spanningskarakteristiek.....	3-13
3.3.6	Soortelijke of specifieke weerstand	3-14
3.4	Opgaven	3-16
3.4.1	Aanwijzingen.....	3-16
3.4.2	Opgave 3-1.....	3-17
3.4.3	Opgave 3-2.....	3-17
3.4.4	Opgave 3-3.....	3-17
3.4.5	Opgave 3-4.....	3-18
3.4.6	Opgave 3-5.....	3-18
3.4.7	Opgave 3-6.....	3-18
3.4.8	Opgave 3-7.....	3-18
3.4.9	Opgave 3-8.....	3-19
3.4.10	Opgave 3-9.....	3-19
3.4.11	Opgave 3-10.....	3-20
3.4.12	Opgave 3-11.....	3-20
3.5	Metten van spanning, stroom en weerstand	3-21
3.5.1	Inleiding.....	3-21
3.5.2	Schema's en schemasymbolen	3-21



3.5.3	Het meten van spanning	3-22
3.5.4	Het meten van stroom	3-23
3.5.5	Weerstandsmeting	3-24
3.5.6	Verschillen tussen spannings-, stroom- en weerstandstroommeting	3-24
3.6	Energie en arbeid, vermogen en dissipatie.....	3-24
3.7	Uitvoeringsvormen en kleurcode van weerstanden.....	3-27
3.7.1	Vaste weerstanden	3-27
3.7.2	Variabele weerstanden.....	3-30
3.8	Schakelingen van weerstanden.....	3-31
3.8.1	Inleiding.....	3-31
3.8.2	Behoudswetten: de wetten van Kirchhoff.....	3-32
3.8.3	Serieschakeling van weerstanden.....	3-34
3.8.4	Spanningsdelers.....	3-35
3.8.5	Parallelschakeling van weerstanden	3-39
3.8.6	Toepassing van spanningsdelers bij weerstandsmeting: Brug van Wheatstone 3-42	
3.8.7	Combinaties van serie- en parallelgeschakelde weerstanden.....	3-43
3.9	Opgaven	3-47
3.9.1	Opgave 3-12.....	3-47
3.9.2	Opgave 3-13.....	3-47
3.9.3	Opgave 3-14.....	3-48
3.9.4	Opgave 3-15.....	3-48
3.9.5	Opgave 3-16.....	3-49
3.9.6	Opgave 3-17.....	3-49
3.9.7	Opgave 3-18.....	3-50
3.9.8	Opgave 3-19.....	3-50
3.9.9	Opgave 3-20.....	3-51
3.9.10	Opgave 3-21.....	3-51
3.9.11	Opgave 3-22.....	3-52
3.9.12	Opgave 3-23.....	3-52
3.10	Spannings- en stroombronnen, afzonderlijk en geschakeld.....	3-53



3.10.1	Schemasymbolen voor spannings- en stroombronnen en eenvoudige schakelaars	3-53
3.10.2	Spanningsbronnen, EMK	3-53
3.10.3	Hoeveel vermogen leveren een ideale en een niet-ideale bron?	3-54
3.10.4	Schakelen van spanningsbronnen	3-56
3.10.5	Schakelen van stroombronnen	3-59
3.10.6	Praktische bronnen	3-59
3.10.7	De capaciteit van een batterij of accu	3-60
3.11	Opgaven.....	3-62
3.11.1	Opgave 3-24.....	3-62
3.11.2	Opgave 3-25.....	3-63
3.11.3	Opgave 3-26.....	3-64
3.11.4	Opgave 3-27.....	3-64
3.11.5	Opgave 3-28.....	3-65
3.12	Uitwerkingen van de opgaven	3-66
3.12.1	Inleiding.....	3-66
3.12.2	Uitwerking van Opgave 3-1	3-66
3.12.3	Uitwerking van Opgave 3-2	3-67
3.12.4	Uitwerking van Opgave 3-3	3-68
3.12.5	Uitwerking van Opgave 3-4	3-69
3.12.6	Uitwerking van Opgave 3-5	3-70
3.12.7	Uitwerking van Opgave 3-6	3-71
3.12.8	Uitwerking van Opgave 3-7	3-72
3.12.9	Uitwerking van Opgave 3-8	3-73
3.12.10	Uitwerking van Opgave 3-9.....	3-74
3.12.11	Uitwerking van Opgave 3-10.....	3-75
3.12.12	Uitwerking van Opgave 3-11.....	3-76
3.12.13	Uitwerking van Opgave 3-12.....	3-77
3.12.14	Uitwerking van Opgave 3-13.....	3-78
3.12.15	Uitwerking van Opgave 3-14.....	3-79
3.12.16	Uitwerking van Opgave 3-15.....	3-80
3.12.17	Uitwerking van Opgave 3-16.....	3-81



3.12.18	Uitwerking van Opgave 3-17	3-82
3.12.19	Uitwerking van Opgave 3-18.....	3-83
3.12.20	Uitwerking van Opgave 3-19.....	3-84
3.12.21	Uitwerking van Opgave 3-20.....	3-85
3.12.22	Uitwerking van Opgave 3-21.....	3-86
3.12.23	Uitwerking van Opgave 3-22.....	3-87
3.12.24	Uitwerking van Opgave 3-23.....	3-88
3.12.25	Uitwerking van Opgave 3-24.....	3-89
3.12.26	Uitwerking van Opgave 3-25.....	3-90
3.12.27	Uitwerking van Opgave 3-26.....	3-91
3.12.28	Uitwerking van Opgave 3-27	3-92
3.12.29	Uitwerking van Opgave 3-28.....	3-93



3 Lading, stroom, spanning en weerstand

3.1 Wat leer je in dit hoofdstuk?

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

We beginnen met elektrische stroom, wat geleiders zijn en hoe geleiding van stroom in grote lijnen in zijn werk gaat. Bij geleiders hoort hun tegendeel: isolatoren. Er zijn bij aardse temperaturen geen ideale geleiders en geen ideale isolatoren, maar echte tussenvormen zijn er ook niet.

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

Na wat informatie over praktische uitvoeringsvormen van weerstanden, zullen we het hebben over verschillende manieren van schakelen van weerstanden, de behoudswetten die aan de berekening van het resultaat ten grondslag liggen en hun toepassing.

Tot slot bespreken we hoe je niet-ideale spannings- en stroombronnen in een schakeling opneemt, hoe je ze tot een maximale energieafgifte brengt en welke manieren van schakelen wel, niet of met beperkingen kunnen.

3.2 Wat is elektrische stroom?

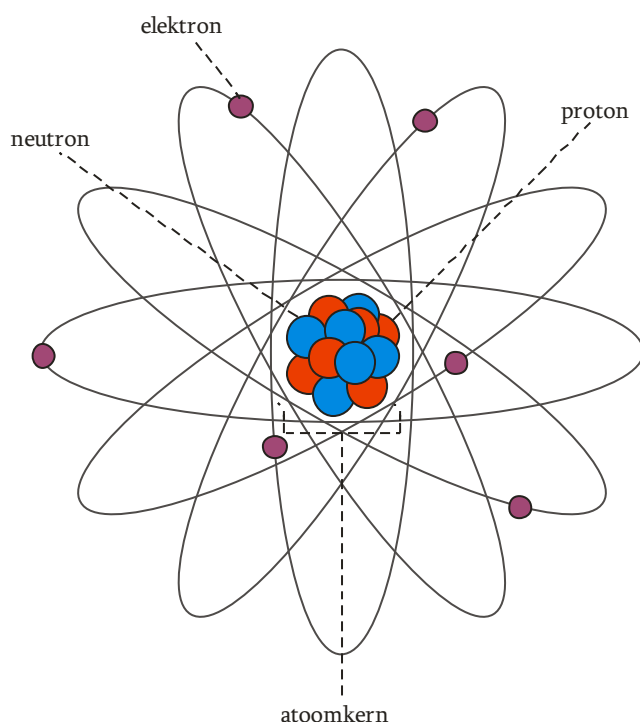
3.2.1 Elektronen, atomen en moleculen

Elektrische stroom is verplaatsing van elektronen. Deze zin leidt tot twee vragen:

1. Wat zijn elektronen?
2. Waardoor verplaatsen ze zich?

Elektronen zijn onderdelen van atomen. Alles op en in de aarde bestaat uit atomen. Atomen zijn zo klein dat je ze niet apart kunt zien. Er zijn meer dan honderd verschillende atomen.

Een atoom heeft een kern. De kern bestaat uit deeltjes die we protonen en neutronen noemen. Daaromheen bewegen zich op vaste afstanden elektronen. Op elk van die afstanden bewegen zich meerdere elektronen. Dat noemen we een *schil*. Een schil is vol als er een bepaald aantal elektronen in zit. Voor de binnenste schil is dat aantal 2, voor de volgende 8 en de daaropvolgende 18. Daarna wordt het ingewikkelder, maar voor de zendamateur is dat niet van belang. De vorm van een atoom is ongeveer zoals weergegeven in Figuur 3.2-1.



Figuur 3.2-1. Schematische voorstelling van een atoom met de kern en de elektronen er omheen

Elektronen zijn veel kleiner en lichter dan protonen en neutronen. Protonen hebben een positieve lading. Elektronen hebben een even grote negatieve lading. Hun massa is maar 0,0022 maal die van een proton of neutron. Een atoom heeft evenveel protonen als elektronen, want neutronen hebben geen lading. De netto-lading van een atoom is daarom 0. *Elektrisch neutraal* heet dat.

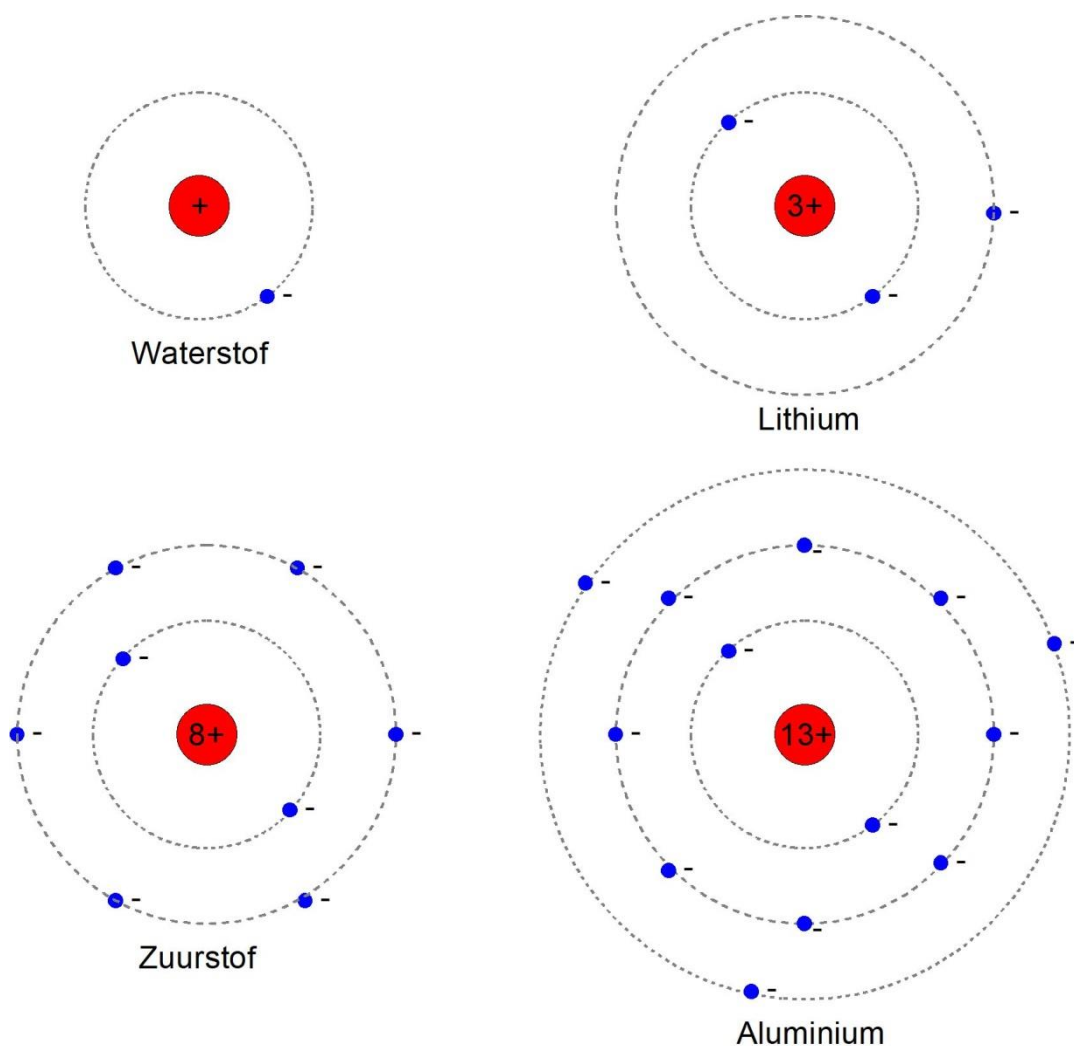
Positieve en negatieve ladingen trekken elkaar aan. Door de aantrekkingskracht van de positief geladen protonen in de kern, blijven de elektronen bij hun atoom. Ze blijven op afstand van de kern door hun snelheid, ongeveer zoals planeten die om de zon draaien. Gelijke ladingen stoten elkaar af. De elektronen in de schil(len) houden daardoor afstand van elkaar. Protonen stoten elkaar ook af, maar blijven samen in de kern doordat protonen en ongeladen neutronen elkaar aantrekken. Neutronen in de kern werken daardoor als ‘protonenlijm’.

Wie wat meer over stroom en lading wil zien, kan bijvoorbeeld terecht op <https://www.youtube.com/watch?v=emBbdVrlDO4>.

In een atoom kunnen verschillende aantallen protonen, neutronen en elektronen zitten. Atomen van verschillende grootte hebben ongelijke eigenschappen. Een stof die uit atomen met eenzelfde aantal protonen bestaat, heet een *element*. Koolstof, ijzer, zwavel of goud zijn voorbeelden van elementen.

Het woord *atoom* betekent letterlijk: *ondeelbaar*. Het is het kleinste mogelijke deeltje van een stof. Als je bijvoorbeeld een ijzeratoom in tweeën zou kunnen delen, houd je geen ijzer over, maar atomen van een of twee andere elementen.

Verschillen in eigenschappen tussen elementen zijn terug te voeren op de grootte van hun atomen en vooral het aantal elektronen in de buitenste schil. In Figuur 3.2-2 zijn vier verschillende atoomkernen schematisch weergegeven. In tegenstelling tot de ruimtelijke tekening in Figuur 3.2-1, zijn ze in Figuur 3.2-2 tweedimensionaal ofwel plat getekend. Dat is duidelijker en de tekening is eenvoudiger te maken.



Figuur 3.2-2. Schematische voorbeelden van atoomkernen. Waterstof is het kleinste mogelijke atoom.

De meeste stoffen die we kennen, zijn geen elementen, maar zogenoemde *moleculaire stoffen*. Hun kleinste deeltjes zijn moleculen. Een molecuul bestaat uit atomen die onderling zijn verbonden met hun buitenste elektronen. Die vormen samen een soort vervangende buitenste elektronenschil om het molecuul. Hoe dat precies werkt, is voor ons als zendamateurs niet van belang. Een moleculaire stof is niet hetzelfde als een mengsel. Meng bijvoorbeeld zuurstof en waterstofgas. Dat wordt een mengsel. Dat



mengsel is explosief en het heet niet voor niets *knalgas*. Het resultaat van de knal is water, waarvan elk molecuul uit twee waterstofatoom en één zuurstofatoom bestaat. Water is niet explosief. Het dient zelfs als blusmiddel. Er gebeurt dus iets bijzonders met de samenstellende atomen.

Voor ons als zendamateurs is vooral van belang hoe elektronen zich in een stof gedragen. Bewegen ze zich daarin gemakkelijk of juist heel moeilijk? Daarover gaat de volgende subparagraaf.

3.2.2 Geleiders en isolatoren

Er zijn elementen met relatief weinig elektronen in de buitenste schil en elementen die hun buitenste schil bijna vol hebben. Een voorbeeld van het eerste is aluminium. Een voorbeeld van het tweede is zuurstof (beide te vinden in Figuur 3.2-2). Bij elementen met weinig elektronen in de buitenste schil springen die elektronen gemakkelijk naar een naburig atoom. Een atoom dat een elektron verliest, is daarna positief geladen en neemt gemakkelijk weer een elektron van een ander atoom over, enzovoort. Bij elementen met veel elektronen in de buitenste schil gebeurt dat vrijwel niet.

Elektronen verplaatsen zich dan ook het gemakkelijkst in elementen met weinig elektronen in de buitenste schil. Ze springen van atoom naar atoom. Alle metalen hebben die eigenschap. Een stof waarin elektronen zich gemakkelijk kunnen verplaatsen, heet een *geleider*. Metalen zijn dus geleiders, al geleidt het ene metaal iets beter dan het andere.

Een stof waarin elektronen zich heel moeilijk verplaatsen, noemen we een *isolator*. Opvallend is dat er eigenlijk geen geleidelijke overgang is tussen geleiders en isolatoren. Een stof isoleert of geleidt.

Zoals er goede en wat minder goede geleiders bestaan, zijn er ook goede en wat minder goede isolatoren. Vrijwel alle elementen die geen metaal zijn, zoals fosfor of zwavel, zijn isolatoren. Een uitzondering is koolstof. De meeste vormen ervan zijn geleiders, maar diamant, een zeldzame vorm van koolstof, is juist een goede isolator.

Moleculaire stoffen als glas, rubber, porselein of kunststoffen zijn vrijwel altijd isolatoren.

Als een stof toch 'een beetje' geleidt, is er meestal sprake van een bijzonder soort geleiding. Een voorbeeld is zout water. Zuiver water, een moleculaire stof, is een isolator. Als je er zout in oplost, wordt het een geleider. Het zijn dan niet de elektronen die van watermolecuul naar watermolecuul springen. Het is het opgeloste zout dat wordt gesplitst in een positief en een negatief geladen deel. Die delen verplaatsen zich door de vloeistof onder invloed van elektrische aantrekking en afstoting. Ook halfgeleiders, die in Hoofdstuk 7 aan de orde komen, vertonen een bijzonder soort geleiding.

Liefhebbers kunnen nog eens kijken op https://nl.wikipedia.org/wiki/Elektrische_isolatie. Vanuit die webpagina vind je ook links naar onderwerpen als geleiding.



3.2.3 Elektrische neutraliteit, ionen

We hebben gezien dat een atoom evenveel elektronen als protonen bevat en dat hun ladingen tegengesteld, maar even groot zijn. De som van de ladingen van een atoom is dus 0. In 3.2.1 noemden we dat *elektrisch neutraal*.

Een atoom dat één of meer elektronen te veel of te weinig heeft, heet een *ion*. Een ion is dus altijd negatief of positief geladen. In het voorbeeld van geleidend water worden opgeloste zouten gesplitst in positieve en negatieve ionen. Batterijen, al of niet oplaadbaar, werken altijd op basis van ionen.

Ionen kunnen ook op andere manieren ontstaan, bijvoorbeeld in de bovenste lagen van de atmosfeer. Dan hebben ze voor de radiotechniek belangrijke eigenschappen. Dat komt verderop in de cursus aan de orde.

Als we ergens in een geleider de elektrische neutraliteit verstoren, bijvoorbeeld door elektronen toe te voegen, dan zullen de ‘overtollige’ elektronen elkaar onderling afstoten, een plek in een buitenste elektronenschil opzoeken, waarna het elektron dat uit die schil is verdreven, op zijn beurt op zoek moet naar een plek. Dat gaat door tot op de één of andere manier de elektrische neutraliteit is hersteld of in elk geval de elektronen gelijk over de geleider zijn verdeeld.

3.2.4 Samengevat

Alle stoffen om ons heen zijn opgebouwd uit atomen bestaande uit één of meer positief geladen protonen en op waterstof na, één of meer neutronen (de kern) en negatief geladen elektronen. Het maakt niet uit, uit welke stof ze afkomstig zijn. Ze zijn allemaal gelijk. De positieve kernen trekken de negatieve elektronen aan.

- Zoals de stoffen in de natuur voorkomen, zijn ze bijna altijd elektrisch neutraal.
- Als we van een neutraal atoom één of meer elektronen wegnemen, is het atoom positief geladen. Het heet dan een *positief ion*. Stoppen we er één of meer elektronen bij, dan is het geheel negatief geladen en is het een *negatief ion* geworden.
- Als elektronen zich in een stof gemakkelijk verplaatsen, dan is de stof een geleider.
- Als elektronen zich in een stof moeilijk verplaatsen, is de stof een elektrische isolator.
- Metalen zijn *geleiders*, de meeste andere elementen en moleculaire stoffen *isolatoren*.

3.3 Elektrische spanning, stroom, weerstand en vermogen

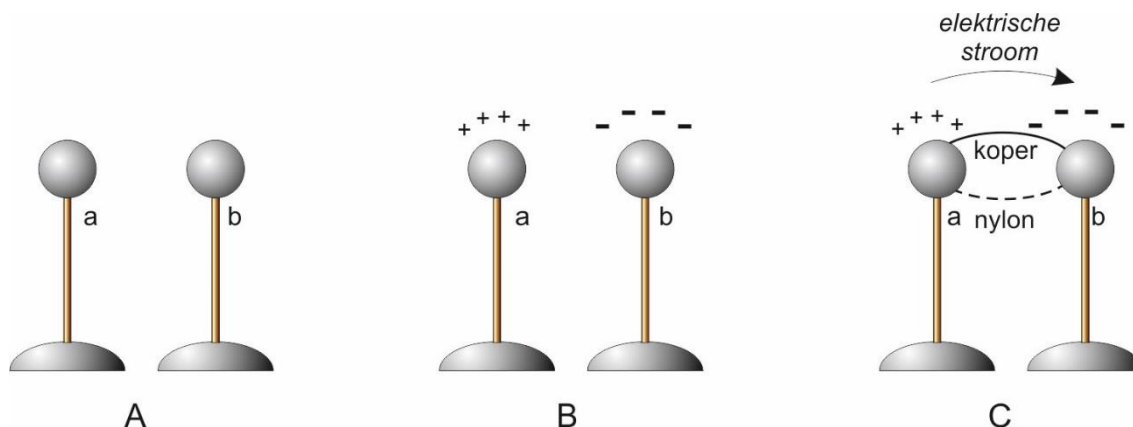
3.3.1 Verplaatsen van lading

We weten nu dat stoffen zijn in te delen in geleiders en isolatoren.

- a) Geleiders hebben elektronen in de buitenschil die zich gemakkelijk van het ene atoom naar het volgende verplaatsen, waaronder alle metalen;
- b) Isolatoren zijn ofwel atomaire stoffen met elektronen in de buitenschil die zó vastzitten dat zij heel moeilijk van hun plaats te krijgen zijn, zoals zwavel of fosfor, ofwel het zijn moleculaire stoffen, zoals glas, rubber, kunststoffen of mica (een mineraal).

Als een deel van een geleider negatief geladen is, dus meer elektronen dan protonen bevat en een ander deel een tekort aan elektronen heeft en dus positief geladen is, dan zal er altijd een vereffening plaats vinden in de vorm van een elektronenverplaatsing van overschot naar tekort.

We maken dat wat aanschouwelijker. Stel dat we twee metalen bolletjes *a* en *b* hebben gemonteerd op een isolerend staafje, bijvoorbeeld van kunststof (Figuur 3.3-1).



Figuur 3.3-1. Elektrische lading. A: bolletjes *a* en *b* zijn elektrisch neutraal. B: bolletje *a* is positief, bolletje *b* negatief geladen. C: met een nyloodraadje blijft het ladingsverschil in stand en met een koperdraadje ontstaat een stroom, waardoor het verschil in lading verdwijnt.

We bespreken drie mogelijke gebeurtenissen. De alinealetters komen overeen met de letters onder de plaatjes in Figuur 3.3-1.

- A. Beide bolletjes zijn elektrisch neutraal;
- B. Bolletje *a* heeft door een of andere oorzaak een tekort aan elektronen gekregen (+) en bolletje *b* een overschot (-);
- C. De bolletjes worden eerst verbonden met een nylon visserssnoertje (stippellijn). Wat gebeurt er? Antwoord: niets! Nylon is een kunststof die uit heel grote moleculen bestaat, dus een isolator.

Het nylon draadje wordt vervangen door een koperen draadje. Koper is een metaal en geleidt. Zo ontstaat een verplaatsing van elektronen van *b* naar *a*. De doorstroming gaat zo: een atoom met een tekort aan elektronen trekt aan de elektronen van een naastliggend atoom dat zo een elektron kwijtraakt en een nieuw elektron van aan ander atoom pikt, enz. Dit proces gaat door totdat het geheel weer elektrisch neutraal is geworden. De elektronen springen dus van atoom naar atoom. De drijvende kracht daarachter heet *potentiaalverschil*. Daarover lees je in 3.3.3 meer. Hoe groter het potentiaalverschil, des te sneller de verplaatsing van elektronen. Dat geldt ook voor de dikte van de verbindingsdraad. Hoe dikker de draad, des te sneller verloopt het proces. We zeggen dat de *weerstand* van de draad lager is, naarmate hij dikker is.



We hebben zo kennis gemaakt met drie begrippen uit de elektriciteitsleer die met elkaar samenhangen:

- Verplaatsing van elektrische lading
- Potentiaalverschil tussen twee punten
- Weerstand

Die zullen we eerst stuk voor stuk en daarna in onderling verband bezien.

3.3.2 Stroom is verplaatsen van elektrische lading

Sommigen zullen zich afvragen, waarom elektronen negatief geladen zijn. Het is niet meer dan naamgeving, een erfenis uit het verleden. Lang geleden wist men al dat er twee soorten lading bestonden en dat gelijksoortige ladingen elkaar afstoten en ongelijksoortige elkaar aantrekken. De één werd plus genoemd, de ander min. Toen men erachter kwam dat de ladingsdragers bij een elektrische stroom, elektronen dus, de ‘minnen’ waren, waren die termen ingeburgerd. De geleerden van destijds hadden elektronen dus beter een ‘+’ kunnen geven en protonen een ‘-’.

De echte stroomrichting, de verplaatsingsrichting van elektronen, is van min naar plus. Wiskundig gezien is dat hetzelfde als positieve lading die van plus naar min loopt. Dit laatste noemen we de *technische stroomrichting*. Die is tegengesteld aan de echte stroomrichting. We werken praktisch altijd met de technische stroomrichting, dus van plus naar min. Het lijkt raar, maar het went snel.

Elektrische stroom is dus verplaatsing van lading. De eenheid van lading, de coulomb, symbool C, is al in Hoofdstuk 2 ter sprake geweest. 1 coulomb is gelijk aan de elektrische lading in $6,241\,506 \cdot 10^{18}$ protonen; -1 Coulomb is de lading in hetzelfde aantal elektronen. Dat zijn duizelingwekkende getallen. Een proton en een elektron hebben een lading van +, respectievelijk $-1,602\,214 \cdot 10^{-19}$ coulomb. Leer deze getallen niet uit het hoofd!

De eenheid van stroomsterkte is de A (ampère). $1A=1C/s$, in woorden 1 coulomb per seconde. Omdat de ampère één van de basisgrootheden van het SI-stelsel is, zeggen we liever dat $1C=1As$. Dat kennen we van Hoofdstuk 2.

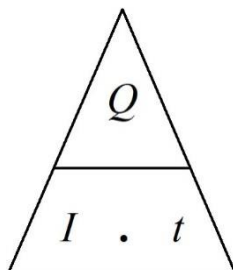
Het symbool voor de grootte lading is Q dat voor de grootte stroom is I . Het symbool voor tijd is t . Het verband tussen deze drie is

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

Dat kun je ook schrijven als

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

Als dit omwerken van vergelijkingen (nog) wat lastig is, kan het ook met behulp van Figuur 3.3-2. Deze truc werkt voor alle vergelijkingen waarin één grootte het product is van twee andere, zoals in (3.3-1).



Figuur 3.3-2. Zo vind je de vergelijking om Q , I of t uit de overige twee grootheden te berekenen. Denk de te berekenen grootheid weg of leg je vinger erop. De overige symbolen geven het rechterlid van de bijbehorende vergelijking in verg. (3.3-1) of (3.3-2).

3.3.3 Spanning: potentiaalverschil tussen twee punten

In de elektriciteitsleer is potentiaal energie per lading. De grootheid energie is in Hoofdstuk 2 wel aan de orde geweest, maar een nauwkeurige definitie is daar niet gegeven. Omdat in onze tijd iedereen wel een notie heeft van wat energie ongeveer is, laten we dat voorlopig zo. Later in dit hoofdstuk komen we erop terug.

Elektrische spanning is potentiaalverschil. Je moet een spanning dus altijd meten tussen twee punten. Spanning is dan ook iets relatiefs. Je kunt dat bedenken als je vogels op een hoogspanningsleiding ziet zitten. Er gebeurt ze niets. Het potentiaalverschil tussen twee vogelpootjes op de leiding is verwaarloosbaar klein. Tussen de draad en de tegenpool –de aarde– is lucht. Lucht isoleert. Zou een vogel op de draad toch geleidend contact maken met de grond, dan is de vogel dood en deels in rook opgegaan.

Je kunt spanning ook vergelijken met het drukverschil tussen de binnen- en buitenkant van een opgeblazen en dichtgeknepen ballon. Als de ballon opengaat, stroomt de lucht naar buiten, want binnen is de druk hoger dan buiten. Zodra de druk binnen en buiten de ballon dezelfde is, stopt de luchtstroom. Die luchtstroom is te vergelijken met de stroom door een geleider, zoals het koperdraadje in Figuur 3.3-1C. Spanning over een geleider veroorzaakt een stroom.

De eenheid van spanning is de volt, symbool V . Het symbool voor de grootheid spanning is U . Een autoaccu heeft meestal een spanning van 12 V . Die meet je tussen de positieve pluspool en de negatieve minpool. Meten aan één pool heeft geen zin, zagen we al.

In een isolator kunnen elektronen zich nauwelijks verplaatsen, maar in een isolator kan onder uitzonderlijke omstandigheden een grote stroom lopen. Dat gebeurt als het potentiaalverschil over de isolator zo groot wordt, dat de kracht ervan groter is dan de kracht waarmee protonen elektronen bij de atoomkern houden. Dat noemen we *doorslag*. Een voorbeeld is bliksem. Lucht isoleert. Maar als het potentiaalverschil in de lucht te groot wordt, gaat er toch stroom lopen, de bliksem. Isolatoren die we in de elektrotechniek gebruiken, zijn na doorslag meestal stuk.

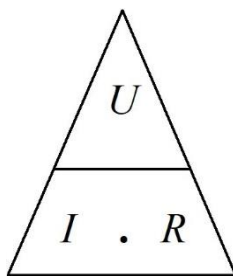
3.3.4 Weerstand, wet van Ohm

Weerstand is de evenredigheidsconstante tussen stroom door en spanning over een geleider. *Spanning over* betekent: potentiaalverschil tussen twee punten, zoals uiteinden van een draad of de aansluitingen van een apparaat.

De eenheid van weerstand is de ohm, symbool Ω . Dat is de Griekse hoofdletter voor de lange 'o', de omega. Omega betekent letterlijk 'grote O'. Het symbool voor de grootte weerstand is R . Denk aan het Engelse woord *resistance*, dat 'weerstand' betekent. Het verband tussen spanning, stroom en weerstand is

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

Vergelijking (3.3-3) staat bekend onder de naam **Wet van Ohm**. Georg Ohm was een Duits wis- en natuurkundige uit de 19^e eeuw. Zijn wet is een van de belangrijkste verbanden in de elektriciteitsleer. Je zult die wet vaak tegenkomen. In (3.3-3) is de grootte U het product van I en R . We kunnen ook hier de driehoek van Figuur 3.3-2 toepassen (Figuur 3.3-3).



Figuur 3.3-3. Zo vind je de vergelijking om U , I of R uit de overige twee grootheden te berekenen. Denk de te berekenen grootte weg of leg er een vinger op. De twee overgebleven symbolen geven het rechterlid van de bijbehorende vergelijking die je kunt afleiden van vergelijking (3.3-3).

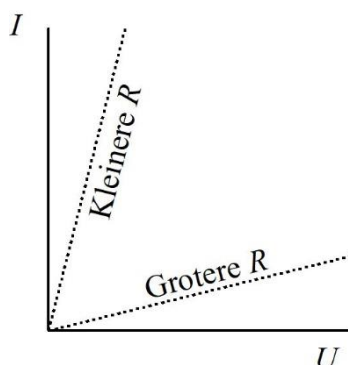
Een lamp bijvoorbeeld, heeft weerstand. Er zijn ook elektronica-onderdelen met de naam *weerstand*. Die doen in schakelingen wat hun naam zegt: weerstand bieden aan stroom.

Volgens de wet van Ohm stroomt door een weerstand van 1Ω waarover een spanning van 1V staat, een stroom van 1A. Zou de weerstand 10Ω zijn, dan zou er bij diezelfde spanning van 1V een stroom van 0,1 A=100 mA lopen.

De weerstand R van een geleider is niet alleen afhankelijk van de grootte van de doorsnede van de geleider. Ook lengte, soort materiaal en de temperatuur spelen een rol.

3.3.5 Stroom-spanningskarakteristiek

De wet van Ohm kun je grafisch weergeven. Die grafiek heet de stroom-spanningskarakteristiek. Zet I uit op de verticale as en U op de horizontale. De grafiek wordt dan een rechte lijn. In hoofdstuk 2 is dit soort grafieken behandeld. Voor elke waarde van R gaat de lijn onder een andere hoek omhoog. Een steile lijn wijst op een lage waarde van R en een vlakke lijn op een hoge, want bij een lage weerstand loopt de stroom I met toenemende spanning U sterker op dan bij een hoge weerstand (Figuur 3.3-4).



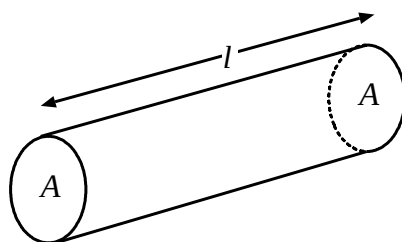
Figuur 3.3-4. Stroom-spanningskarakteristiek voor een lage en voor een hoge weerstand R .

3.3.6 Soortelijke of specifieke weerstand

Zelfs een geleider heeft bij aardse temperaturen weerstand. Die is afhankelijk van

- Het materiaal
- De doorsnede
- De lengte
- De temperatuur

We beginnen met het verband tussen materiaal, doorsnede en lengte (Figuur 3.3-5).



Figuur 3.3-5. Ronde geleider met doorsnede A en lengte l .

Het is niet moeilijk in te zien dat de weerstand van de geleider in de lengterichting groter wordt naarmate hij langer is. De stroom moet dan een langere weg afleggen. Het is ook niet lastig te begrijpen dat de weerstand van de geleider kleiner wordt, naarmate deze dikker is. Dan is er meer ruimte voor de stroom. Dat de weerstand van de geleider in Figuur 3.3-5 evenredig is met de lengte L en omgekeerd evenredig met de doorsnee A , laat zich dus gemakkelijk raden.

Geleiders met dezelfde afmetingen, maar van ongelijk materiaal, hebben ongelijke weerstand. Het materiaal doet er dus toe. Om de weerstand van een geleider als in Figuur 3.3-5 te berekenen, hebben we dus een zogenoemde *materiaalconstante* nodig. Die heet in dit geval de *specifieke weerstand* of de *soortelijke weerstand*. Beide termen betekenen hetzelfde. Het algemeen gebruikte symbool is het Griekse broertje van onze letter 'r'. Dat broertje heet rho (spreek uit: 'ro'), geschreven als ρ . Dus kunnen we voor de weerstand van de geleider in Figuur 3.3-5 schrijven:

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

De uitkomst van het rechterlid in (3.3-4) moet weerstand zijn, omdat het linker lid R is. De grootheid l is de lengte, de grootheid A oppervlakte. Oppervlakte is lengte.lengte is lengte². Lengte gedeeld door lengte² is 1/lengte. Rechts van het = teken staat dus soortelijke weerstand gedeeld door lengte. Als dit de grootheid weerstand moet opleveren, moet ρ weerstand.lengte zijn. De soortelijke (of specifieke) weerstand ρ drukken we dan ook uit in Ωm (ohmmeter). Dat de grootheid soortelijke weerstand ongelijk is aan weerstand, is niets bijzonders. Soortelijk gewicht bijvoorbeeld is ook geen gewicht, maar gewicht per volume. Tabel 3.3-1 geeft de soortelijke weerstand van een aantal metalen bij 15°C.

Tabel 3.3-1. Soortelijke weerstand ρ van een aantal metalen.

Materiaal	ρ in Ωm bij 15°C	Materiaal	ρ in Ωm bij 15°C
zilver	0,016.10 ⁻⁶	nikkel	0,44.10 ⁻⁶
koper	0,0172.10 ⁻⁶	tin	0,445.10 ⁻⁶
aluminium	0,026.10 ⁻⁶	Manganine ¹	0,43.10 ⁻⁶
messing	0,075.10 ⁻⁶	Constantaan ²	0,49.10 ⁻⁶
ijzer	0,10.10 ⁻⁶	lood	0,21.10 ⁻⁶

In Tabel 3.3-1 wordt niet voor niets de temperatuur van 15°C genoemd. In het begin van deze sub-paragraaf is al gezegd dat weerstand en dus ook specifieke weerstand temperatuurafhankelijk is. Bij praktisch alle metalen wordt de soortelijke weerstand hoger bij hogere temperatuur. Constantaan heet niet voor niets zo: de afhankelijkheid van temperatuur van de soortelijke weerstand is over een groot bereik vrijwel 0. Constantaan wordt onder meer gebruikt in ijkweerstand.

Koolstof dat geen metaal is, maar wel een geleider (behalve als het diamant is), heeft een tegengesteld temperatuurgedrag. Als de temperatuur ervan stijgt, daalt de soortelijke weerstand. Voor de praktijk van de zendamateur zijn temperatuureffecten op weerstand zelden van groot belang.

De weerstand van een draad; een rekenvoorbeeld

Een stuk ijzerdraad heeft een doorsnede van 1 mm² en een lengte van 10 meter. Hoe groot is de weerstand?

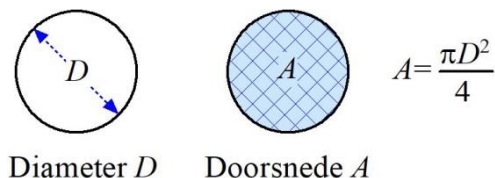
Eerst moeten we de doorsnede omrekenen naar m². 1 mm is 10⁻³ m. 1 mm² is dan (10⁻³)² m², is 10⁻⁶ m². De soortelijke of specifieke weerstand van ijzer is volgens Tabel 3.3-1 gelijk aan 0,1.10⁻⁶ Ωm = 1.10⁻⁷ Ωm . Dan is de weerstand (10 m/10⁻⁶ m²). 10⁻⁷ Ωm = 10⁷.10⁻⁷ Ω = 1 Ω .

¹ Handelsnaam van een mengsel (legering) van 82-84% koper, 12-15% mangaan en 2-4% nikkel

² Een mengsel (legering) van 54% koper, 45% nikkel en 1% mangaan

Je kunt deze uitkomst omrekenen in Ω per meter draad, ofwel Ω/m . De draad was 10 m lang. Delen van 1 Ω door 10 m levert 0,1 Ω/m . **Let op: Ω/m is niet hetzelfde als Ωm !**

Een valkuil bij de berekening van de weerstand van een stuk ronde draad kun je tegenkomen als niet de doorsnede A maar de diameter D wordt gegeven (Figuur 3.3-6).



Figuur 3.3-6. Verschil tussen diameter D en doorsnede A en hoe je A uit D berekent.

Je kunt er als volgt de doorsnede uit berekenen:

$$r = \frac{D}{2} \text{ en dan: } A = \pi r^2 \text{ of zoals in de figuur: } A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (3.3-5)$$

Dan vergelijking (3.3-4) toepassen en klaar is Kees.

3.4 Opgaven

3.4.1 Aanwijzingen

Deze paragraaf bevat meerkeuzevragen over de tot nu toe in dit hoofdstuk behandelde stof. Om bij de uitwerking te komen, klik je op de pijl die er zo uit ziet:

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking 

Bij de uitwerking is het juiste antwoord vet gedrukt, maar belangrijker is vaak de uitwerking zelf. Na de uitwerking vind je een pijl die je terugbrengt naar de opgave. Die ziet er zo uit:



Terug naar de opgave

Wil je met de volgende opgave aan de slag, dan klik je op deze pijl:

Naar de volgende opgave 

Bij de uitwerking van de laatste opgave van een paragraaf ontbreekt deze laatste pijl en is er alleen de rode pijl die je terugbrengt naar de opgave. Voor de volgende bladzijde cursusstof klik je door naar ... inderdaad, de volgende bladzijde.

3.4.2 Opgave 3-1

Spanning is

- A. Verplaatsing van elektronen
- B. Elektrische lading
- C. Energie
- D. Alleen meetbaar ten opzichte van een ander punt in dezelfde schakeling

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking



3.4.3 Opgave 3-2

Stroom is

- A. Verplaatsing van elektrische lading
- B. Elektrische lading
- C. Energie
- D. Alleen meetbaar ten opzichte van een ander punt

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking



3.4.4 Opgave 3-3

Lading is

- A. Verplaatsing van elektronen
- B. Positief of negatief
- C. Energie
- D. Alleen meetbaar ten opzichte van een ander punt

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking



3.4.5 Opgave 3-4

Rubber is

- A. Een goede geleider
- B. Een isolator
- C. Een stof die bij lage temperatuur geleidt
- D. Een stof die bij hoge temperatuur geleidt

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking 

3.4.6 Opgave 3-5

De wet van Ohm luidt:

- A. $I = R/U$
- B. $R = U/I$
- C. $U = I/R$
- D. $R = I \cdot U$

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking 

3.4.7 Opgave 3-6

Over een weerstand van $5\ \Omega$ staat een spanning van 10 V. De stroom door de weerstand bedraagt

- A. 2A
- B. 0,5A
- C. 50 A
- D. 5 A

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking 

3.4.8 Opgave 3-7

Over een weerstand van $1\ \text{k}\Omega$ staat 10 V. De stroom door de weerstand bedraagt

- A. 10 mA
- B. 10 A
- C. 100 mA
- D. 1 mA

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking



3.4.9 Opgave 3-8

Door een weerstand van 100Ω loopt een stroom van 100 mA. De spanning over de weerstand bedraagt

- A. 100 V
- B. 1 V
- C. 10 V
- D. 0,1 V

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking



3.4.10 Opgave 3-9

Een stuk koperen installatiedraad heeft een lengte van 10 m en een doorsnede van 2 mm^2 . De soortelijke weerstand van koper is $0,017 \cdot 10^{-6} \Omega\text{m}$. De weerstand van de draad bedraagt

- A. $1,7\Omega$
- B. $0,034\Omega$
- C. $0,085\Omega$
- D. $8,5\Omega$

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking



3.4.11 Opgave 3-10

Door een draad loopt gedurende 10 s een stroom van 2 A. De hoeveelheid lading die door de draad is gestroomd, bedraagt

- A. 5 C
- B. 0,2 C
- C. 20 V
- D. 20 C

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking

**3.4.12 Opgave 3-11**

Welke draad heeft de grootste weerstand?

- A. Draad lang 1 m, $\varnothing 1 \text{ mm}^2$
- B. Draad lang 1 m, $\varnothing 0,5 \text{ mm}^2$
- C. Draad lang 0,5 m, $\varnothing 1 \text{ mm}^2$
- D. Draad lang 0,5 m, $\varnothing 0,5 \text{ mm}^2$

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking



3.5 Meten van spanning, stroom en weerstand

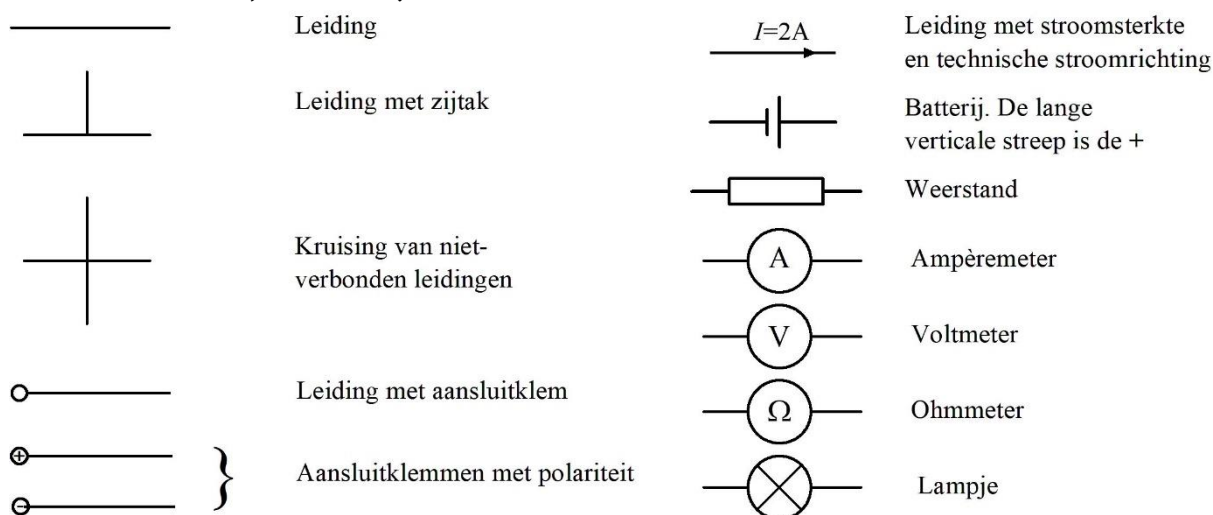
3.5.1 Inleiding

Elektronen zijn onzichtbaar. Elektriciteit dus ook. Met meetinstrumenten is elektriciteit aan te tonen en te meten. We behandelen hier (nog) niet de ins en outs van meetinstrumenten. Het gaat nu om wat basiskennis van het meten van spanning, stroom en weerstand.

Omdat we in deze paragraaf en later schema's en schemasymbolen nodig hebben, beginnen we daarmee. We beperken ons hoofdzakelijk tot wat we in deze paragraaf nodig hebben. In de loop van de cursus zullen er symbolen bijkomen.

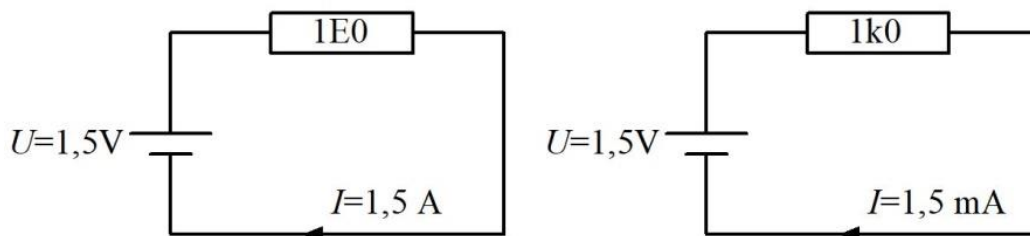
3.5.2 Schema's en schemasymbolen

Een elektronische schakeling geven we weer in een schakelschema, bijna altijd kortweg *schema* genoemd. Uit een schema is af te leiden, wat er in de schakeling gebeurt. Elk soort onderdeel heeft zijn schemasymbool.



Figuur 3.5-1. Enkele schemasymbolen.

In theorie zijn dit ideale onderdelen die precies doen wat ze horen te doen. De dagelijkse werkelijkheid lijkt daar sterk op. Soms moet je daar rekening mee houden, vaak ook niet,



Figuur 3.5-2. Schakeling met batterij en weerstand. De waarde van de weerstanden is in het symbool zelf opgenomen, maar mag er ook naast. In plaats van de komma staat er een letter. De letter E betekent dat de weerstandswaarde in Ω geen voorvoegsel heeft. 1E0 betekent dus 1,0 Ω . 1k0 betekent 1,0 k Ω . Soms is de k een hoofdletter: 1K0. Dat is niet consequent, maar het gebeurt.

Een eenvoudige schakeling met een batterij en een weerstand zien we in Figuur 3.5-2. Uit de spanning en de weerstand in het schema kun je met behulp van de wet van Ohm en vergelijking (3.3-3), de stroom I berekenen. Links is dat 1,5 A, rechts 1,5 mA, want de weerstand links is 1000 keer zo klein als rechts. Het aangeven van de stroomsterkte in een schema gebeurt weinig en voor het begrijpen van een schakeling is het ook zelden nodig. In Figuur 3.5-2 is de pijl opgenomen om de *technische stroomrichting* te benadrukken, al blijkt die ook uit de polariteit van de batterij.

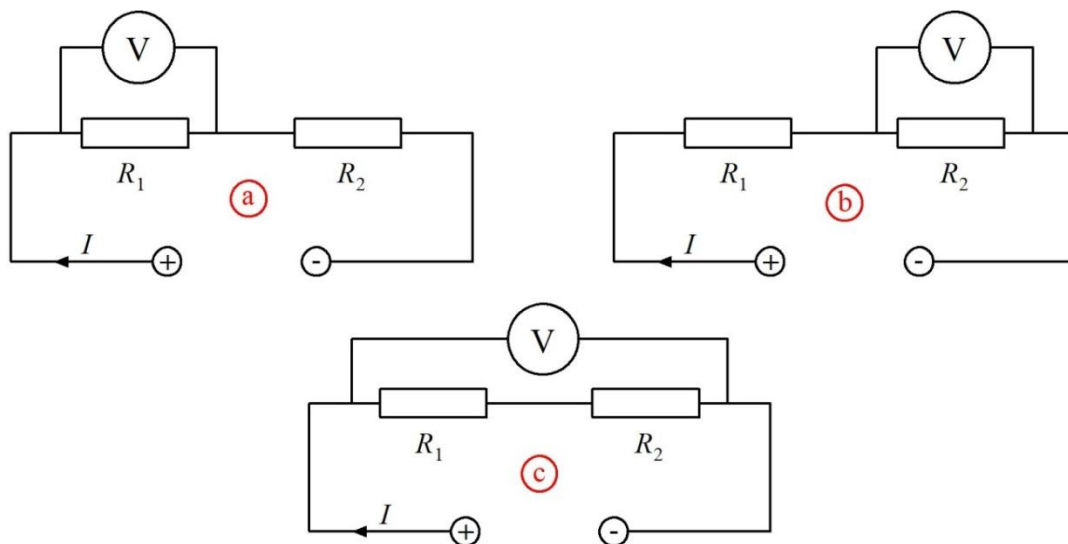
In het bijschrift van Figuur 3.5-2 wordt gesproken over de 'E' in de weerstand van het linkerschema. Er zijn nog andere manieren om waarden van enkele Ω of waarden kleiner dan 1Ω aan te duiden. 1E2 of 1R2 betekenen bijvoorbeeld allebei $1,2\Omega$. Gebruik van het symbool Ω mag natuurlijk altijd. E39 of R39 betekenen $0,39\Omega$. 1K5 betekent 1500Ω . Vaak wordt dat ook als 'één ka vijf' uitgesproken.

3.5.3 Het meten van spanning

Basisprincipe van een goede meting is dat de invloed van de meting op wat we meten minimaal is. Een natuurwet zegt dat nul invloed niet kan, maar we kunnen zorgen dat die invloed zo klein is dat het meetresultaat voor het doel nauwkeurig genoeg is.

Spanning meet je tussen twee punten, zoals de aansluitpunten van een of ander onderdeel. Een spanningsmeter wordt meestal *voltmeter* genoemd.

In Figuur 3.5-3 zien we het schema van een spanningsmeting in een eenvoudige schakeling met twee weerstanden waardoorheen een stroom I loopt. In a) wordt de spanning over weerstand R_1 gemeten, in b) die over R_2 en in c) die over beide weerstanden.

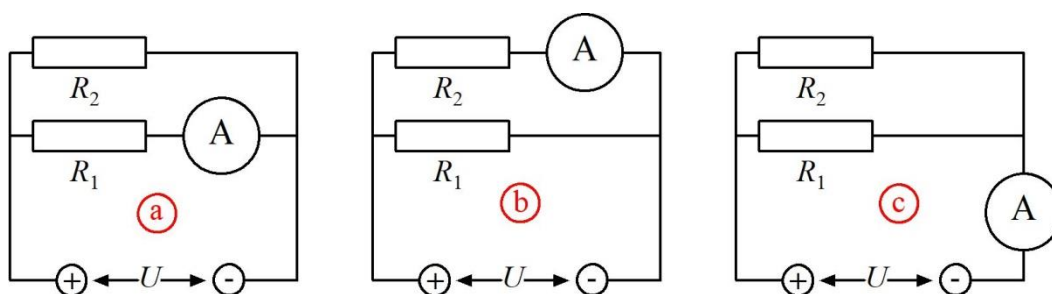


Figuur 3.5-3. Spanningsmeting. a) Spanning over R_1 ; b) Spanning over R_2 ; c) Spanning over beide weerstanden.

De weerstand van een ideale voltmeter is oneindig. Die van een echte meter is hoog, maar niet oneindig. Daarom wordt bij elke meting de weerstand van de voltmeter onderdeel van de schakeling. De schakeling verandert dus door de meting. We meten zo aan een andere schakeling dan we eigenlijk willen. Als de weerstand van de voltmeter heel veel groter is dan die van R_1 en R_2 , is die invloed klein en kunnen we toch een voldoende nauwkeurige meting doen. Dat *heel veel* en *voldoende nauwkeurig* hangen dus met elkaar samen. De eis die je moet stellen aan de weerstand van je voltmeter hangt daarmee direct samen met de gevraagde nauwkeurigheid van de meting en de weerstand in de schakeling zelf. In praktische situaties is de meterweerstand meestal groot genoeg.

3.5.4 Het meten van stroom

Stroom is, zoals gezegd, verplaatsing van lading. Die meet je niet ten opzichte van een andere verplaatsing. Stroom loopt door een leiding. Dan moet de stroom ook in de leiding worden gemeten. Vergelijk het met de watermeter in de meterkast. Die zit in de leiding, want alle gebruikte water moet door de meter stromen om te kunnen worden gemeten. Bij een ampèremeter gebeurt datzelfde met de stroom. Omdat de meter in de stroomleiding moet zitten, moet de leiding worden onderbroken, zoals in Figuur 3.5-4.



Figuur 3.5-4. Stroommeting. a) Stroom door R_1 ; b) Stroom door R_2 ; c) Stroom door de hele schakeling.

In a) wordt de stroom door R_1 gemeten, in b) die door R_2 en in c) de totale stroom door beide weerstanden. De ampèremeters die steeds aan de rechterkant van de weerstand zijn getekend, mogen ook links staan. Het resultaat is hetzelfde. Omdat een ampèremeter **in** de schakeling staat, voegt hij weerstand aan de schakeling toe. Daarom moet zijn inwendige weerstand heel veel kleiner zijn dan die van de schakeling voor een meting die voldoende nauwkeurig is. Net als bij de voltmeting hangen *heel veel* en *voldoende* samen met de gevraagde meetnauwkeurigheid.

Stroommeting in een schakeling is vaak lastiger dan spanningsmeting, omdat de ampèremeter **in** de schakeling moet worden opgenomen. Een voltmeter staat **over** de schakeling. Als er toevallig een weerstand van bekende waarde in de leiding zit, is de stroomsterkte ook met de wet van Ohm te berekenen na meting van de spanning over de weerstand.

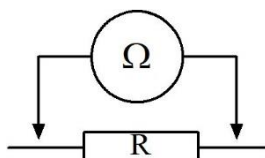
3.5.5 Weerstandsmeting

De meting van weerstanden is meestal een combinatie van een spannings- en een stroommeting. De brug van Wheatstone die we pas in 3.8.6 behandelen, is een degelijke oplossing, maar wordt door zijn omslachtigheid maar weinig gebruikt.

Als in Figuur 3.5-4 $U = 10\text{ V}$ en de stroom I_1 door R_1 is 20 mA , dan is de weerstand R_1 te berekenen met de Wet van Ohm, vergelijking (3.3-3). $R = U/I$, dus in dit geval is $R_1 = 10/(20 \cdot 10^{-3})\ \Omega$ is $500\ \Omega$. Stel dat I_2 door R_2 10 mA bedraagt, dan is $R_2 = 1\text{ k}\Omega$.

Dit vraagt rekenwerk. Gemakkelijker is de zogenoemde *multimeter*. Daarmee kunnen spanning, stroom, weerstand en vaak nog meer worden gemeten. Een multimeter bevat een batterij waarmee een spanning over de weerstand wordt gezet. De stroom wordt dan gemeten. De schaal is zo gemaakt dat je daarop meteen de weerstandswaarde afleest.

In een schakeling gemonteerde weerstanden kun je niet zomaar meten. Als je bijvoorbeeld over R_1 in Figuur 3.5-4 een weerstandsmeter aansluit, loopt er ook stroom uit de meter door R_2 . De door de schakeling opgenomen stroom wordt dus bepaald door R_1 en R_2 samen. Je meet dan de zogenoemde *vervangingsweerstand* van R_1 en R_2 . Vervangingsweerstand komen in 3.8.3 en daarna aan de orde. In het voorbeeld van Figuur 3.5-4 is er maar één oplossing: de weerstand uit de schakeling halen, meten (Figuur 3.5-5) en weer terugmonteren.



Figuur 3.5-5. Weerstandsmeting

3.5.6 Verschillen tussen spannings-, stroom- en weerstandstroommeting

De verschillen tussen spannings- en stroommeting zijn samengevat in Tabel 3.5-1.

Tabel 3.5-1. Verschillen tussen spannings-, stroom- en weerstandsmeting

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

3.6 Energie en arbeid, vermogen en dissipatie

Een weerstand waar stroom doorheen loopt, wordt warm. Soms onmerkbaar weinig en soms kun je er je vingers aan branden. Warmte is energie. Een weerstand zet elektrische energie om in warmte. Als je van de drie grootheden stroom, spanning en weerstand twee



kent, kun je de hoeveelheid energie berekenen die per tijd wordt omgezet in warmte. Energie per tijd heet *vermogen*. Voor we daarmee verder gaan, eerst iets over energie, arbeid en vermogen.

De natuurkundige begrippen energie en arbeid betekenen hetzelfde. Je kunt ze dus door elkaar gebruiken. Het symbool is W (van het Engelse *work*). De SI-eenheid is de joule, afgekort J en genoemd naar de Engelsman Joule (spreek uit: *zjoel* of *zjoul*).

Wie Hoofdstuk 2 heeft gelezen, heeft gezien dat 1 joule de arbeid is waarmee je bij aardse zwaartekracht een massa van 1 kg 10,2 cm optilt. In warmte uitgedrukt is het de energie waarmee je 1 gram vloeibaar water 0,24 K opwarmt. Leer deze getallen niet uit je hoofd. Ze zijn alleen bedoeld om je een idee te geven waarvoor de eenheid joule staat.

De eenheid van vermogen is de watt, afgekort W. Verwar die rechtopstaande W niet met de cursief gedrukte W van energie. De Watt is genoemd naar de Schot James Watt die in de 18^e eeuw de stoommachine energiezuiniger maakte en daarna doorontwikkelde, zodat deze een draaiende beweging kon produceren (https://nl.wikipedia.org/wiki/James_Watt).

De grootte vermogen heeft meestal het symbool P (van *power*). Het verband tussen W en P is

$$W = Pt \quad (3.6-1)$$

Voor de eenheden geldt (let op de rechtopstaande symbolen voor de eenheden:

$$1\text{J} = 1\text{Ws} \quad \text{en} \quad 1\text{W} = 1\frac{\text{J}}{\text{s}} \quad (3.6-2)$$

Voorbeeld 1: Hoeveel J verbruikt een lamp van 100 W die 1 uur brandt?

$$P=100\text{ W} = 100\text{ J/s.}$$

$$\text{Een uur is } 60 \cdot 60 \text{ s} = 3600 \text{ s. } W = Pt = (100\text{ J/s}) \cdot (3600 \text{ s}) = 3,6 \cdot 10^5 \text{ J} = 360 \text{ kJ.}$$

Voorbeeld 2: Hoeveel joule is een kWh (kilowattuur)?

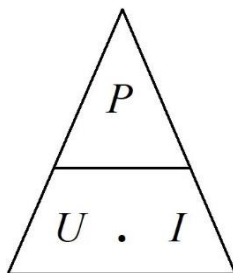
$$1\text{ kW} = 1000\text{ W}; 1\text{ kWh} \text{ is } 1000\text{ Wh, Een uur (h) is } 3600\text{ s, dus het antwoord is } 3,6\text{ MJ.}$$

Met deze uitkomsten ligt het voor de hand dat de J een eenheid is die je meestal met een voorvoegsel k, M of zelfs G zult tegenkomen.

We gaan nu naar spanning en stroom. $1\text{W} = 1\text{VA}$. Door een weerstand van 1Ω loopt 1A als over die weerstand 1 V staat. Omdat $1\text{V} \cdot 1\text{A} = 1\text{W}$, is $P = 1\text{W}$. Wordt de stroom 2A, dan moet er over diezelfde weerstand 2V staan en wordt $P = 4\text{ W}$. In vergelijkingvorm:

$$P = UI \quad (3.6-3)$$

Vergelijking (3.6-3) is weer een vergelijking waarin een grootte, in dit geval P , het product is van twee andere, namelijk U en I . We kunnen dus weer de driehoekstruc van Figuur 3.3-2 en Figuur 3.3-3 toepassen (Figuur 3.6-1).



Figuur 3.6-1. Hulpje bij vergelijking (3.6-3).

Voor de energieomzetting in meestal nutteloze warmte in een weerstand wordt vaak de term *dissipatie* gebruikt. Het woord komt uit het Latijn en betekent letterlijk *verstrooiing*. De term wordt gebruikt voor allerlei processen in apparatuur waarbij elektrische energie verloren gaat als warmte. We zeggen dat een weerstand een aantal watt *dissipeert*. Je mag voor *dissiperen* ook de term *verbruiken* toepassen. Het is aan te raden, ze allebei te kennen.

De wet van Ohm beschrijft de relatie tussen U , I en R . In vergelijking (3.6-3) komen U en I voor. Dat betekent dat we van (3.6-3) met behulp van de wet van Ohm ook een vergelijking kunnen maken met R erin. Dat gaat zo:

$$U = IR \text{ en } P = UI \rightarrow P = IR \cdot I = I^2 R \quad (3.6-4)$$

En

$$I = \frac{U}{R} \text{ en } P = UI \rightarrow P = U \cdot \frac{U}{R} = \frac{U^2}{R} \quad (3.6-5)$$

Voorbeeld 1. Door een weerstand van 1Ω loopt 2A. Hoeveel W wordt er in de weerstand gedissipeerd? Antwoord: $P=2 \cdot 2 \cdot 1 \text{ W} = 4 \text{ W}$.

Voorbeeld 2: Over een weerstand van 2Ω staat 3V. Hoeveel W wordt er in de weerstand verbruikt? Antwoord: $P=3^2/2 \text{ W} = 4,5 \text{ W}$.

Onthoud:

$$P = I^2 R \text{ en } P = \frac{U^2}{R} \quad (3.6-6)$$

3.7 Uitvoeringsvormen en kleurcode van weerstanden

3.7.1 Vaste weerstanden

Vaste weerstanden zijn weerstanden die één waarde hebben. Ze kunnen eruitzien als op Foto 3.7-1.

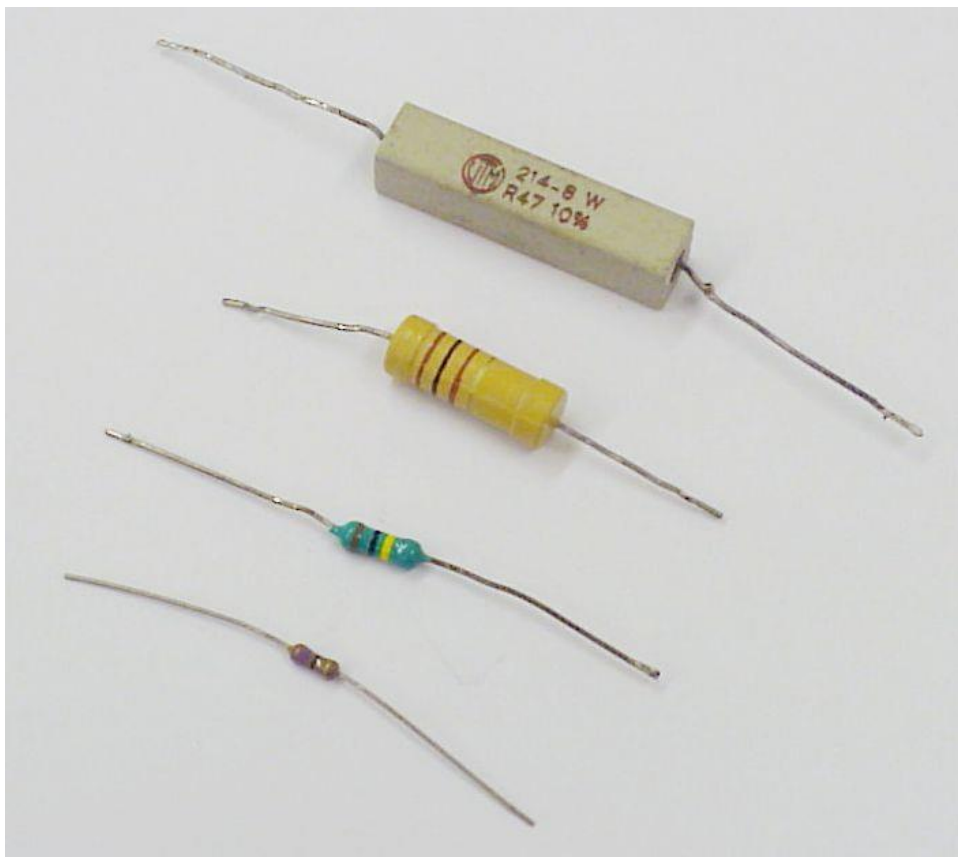


Foto 3.7-1. Voorbeelden van vaste weerstanden.

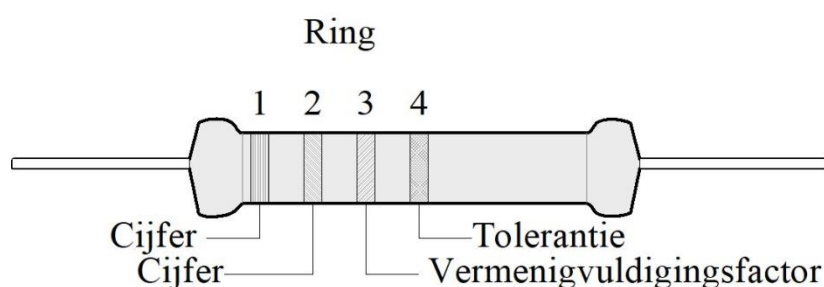
Weerstanden kunnen zijn gemaakt van dun metaaldraad, zogenoemde *draadgewonden weerstanden*. Als je een geleider maar dun genoeg maakt, kun je toch een hoge weerstand bereiken. Een metaallegering met een relatief hoge soortelijke weerstand als Manganine helpt ook en wordt vaak toegepast. Draadgewonden weerstanden zitten meestal op een isolerend keramisch lichaam en zijn bedoeld voor vrij hoge vermogens omdat ze flink heet mogen worden. De bovenste weerstand op Foto 3.7-1 is er een. Er staat op dat de weerstand 8 W 'kan hebben', dat de weerstand 0,47 Ω is en dat de *tolerantie* 10% is. Dat laatste betekent dat de werkelijke waarde 10% mag afwijken van de aangegeven waarde. Dat houdt in dit geval een waarde tussen 0,42 en 0,52 Ω in.

De andere drie weerstanden op de foto zijn koolweerstanden. Koolweerstanden bestaan meestal uit een cylindertje van keramisch materiaal of glasvezel. Daarop is een dun geleidend laagje koolstof aangebracht. Hun maximaal te dissiperen vermogen hangt af van hun grootte. De grootste op de foto is vermoedelijk voor 1 W (staat er niet op), de kleintjes voor (veel) minder.

Op de drie koolweerstanden zien we gekleurde ringen. Die geven de weerstandswaarde in de zogenoemde kleurcode. Deze manier van aanduiden heeft twee voordelen: 1) de cijfers worden niet onleesbaar klein en 2) hoe de stand van een weerstand in een schakeling ook is, de weerstandswaarde is altijd af te lezen. Wel moet je de kleurcode kennen. Die stond tot 2008 in de exameneisen. Tegenwoordig zwijgen ze erover (zie de [exameneisen voor het F-examen](#) of [die voor het N-examen](#)). Toch worden er op het examen af en toe vragen over gesteld. Daarom wijden we er een stukje tekst aan.

Kleurcode van vaste weerstanden

We beperken ons tot de code met vier ringen, zoals op Foto 3.7-1. Die komt vooral voor op koolweerstanden. De 4 ringen zijn weergegeven in Figuur 3.7-1.



Figuur 3.7-1. De vier ringen van de kleurcode voor weerstanden.

De eerste twee ringen zijn voor cijfers. De derde ring geeft de vermenigvuldigingsfactor (exponent van 10) en de vierde de tolerantie. De kleuren lopen voor een groot deel in de volgorde van de kleuren van de regenboog. Het beproefde ezelsbruggetje is “**z**ij **b**rengt **r**ozen op **G**errits **g**raf bij **v**ies **g**rijs **w**eer”. Tabel 3.7-1 geeft de kleurcode.

Tabel 3.7-1. 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	-	±1%	±2%	-	-	±0,5%	-	-	-	-	±10%	±5%

Voorbeeld: we hebben een weerstand met ringen in de kleurvolgorde bruin, grijs, rood, zilver. De bruine ring is een 1, de grijze een 8, de rode staat voor 10^2 , is twee nullen. De zilveren ring staat voor een tolerantie van ±10%. We hebben dan 1800Ω en de weerstandswaarde mag tot 180Ω naar boven en naar beneden afwijken.

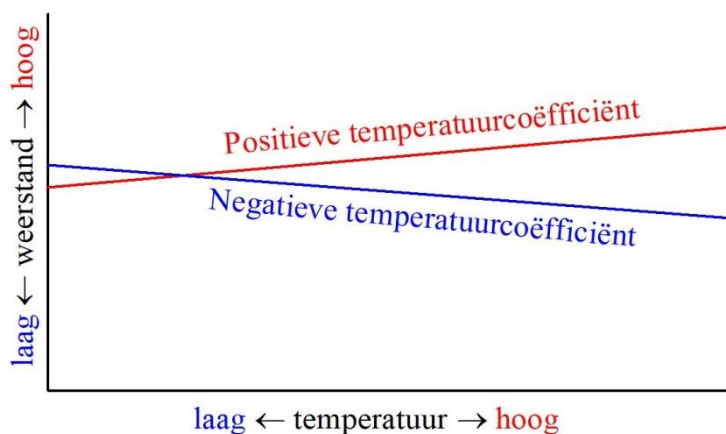
¹ Als ring 4 ontbreekt, is de tolerantie 20%.

Voor nauwkeuriger weerstanden worden voor de cijfers meestal drie ringen gebruikt. Ring 3 en 4 van het vier-ringen-systeem worden dan ring 4 en 5. De eerste ring ligt in beginsel het dichtst bij een uiteinde. Bij weerstanden met heel kleine afmetingen wil dat wel eens onduidelijk zijn. Raden hoeft meestal niet. Zoek een zilver- of goudkleurige ring. Die moet ring 3 of 4 zijn. Anders gewoon controleren met handelswaarden. Handelswaarden van weerstanden (en condensatoren) komen praktisch altijd uit een standaardreeks. Die vind je bijvoorbeeld op <https://nl.wikipedia.org/wiki/E-reeks>. De kleurcode vind je op: https://nl.wikipedia.org/wiki/Kleurcodering_voor_elektronica.

Behalve draadgewonden- en koolweerstanden zijn er ook metaalfilmweerstanden. De constructie is dezelfde als bij koolweerstanden, alleen is de koolstof vervangen door een metaal, meestal een legering van nikkel en chroom. Metaalfilmweerstanden hebben vrijwel altijd een kleinere tolerantie dan koolfilmweerstanden. Bij een goede koolweerstand is die vaak 5%, bij metaalfilmweerstanden vaak 1%. De geleidende film ligt net als bij koolweerstanden meestal als een spiraal om het weerstandslichaam. Dat is vaak slecht te zien door de isolerende omhulling. Met de spiraal kan men de geleidende baan lang en smal maken, waardoor hogere weerstanden te maken zijn.

Temperatuurafhankelijkheid van een weerstand

Weerstanden in schakelingen worden meestal voldoende weinig door temperatuur beïnvloed om goed te blijven werken. Metaalfilmweerstanden hebben de neiging, met hogere temperatuur een iets hogere weerstand te krijgen. Dat heet een *positieve temperatuurcoëfficiënt*. Bij koolweerstanden is het andersom: hogere temperatuur, lagere weerstand. Die hebben dus een *negatieve temperatuurcoëfficiënt*. Het verschil is weergegeven in Figuur 3.7-2.



Figuur 3.7-2. Weerstand, temperatuur en temperatuurcoëfficiënt

Er zijn weerstanden die met opzet een hoge positieve of negatieve temperatuurcoëfficiënt hebben gekregen. Ze staan bekend onder de naam *thermistor*, een samentrekking van de Engelse woorden *thermal* en *resistor*. Thermistors met een Positieve Temperatuur Coëfficiënt worden aangeduid met de afkorting PTC, die met een Negatieve Temperatuur

Coëfficiënt met NTC. De rode lijn in Figuur 3.7-2 geeft een PTC weer, de blauwe een NTC. PTC's en NTC's worden in sommige schakelingen toegepast als beveiliging tegen te hoge stromen. Het hangt van de soort schakeling af of een PTC of NTC wordt toegepast. Beide soorten kunnen ook worden gebruikt om temperatuur te meten. In het kadertje staat iets meer over de temperatuurcoëfficiënt.

Voor de liefhebbers, géén examenstof!

De temperatuurcoëfficiënt α (alfa) is een getal dat aangeeft, hoeveel een weerstand R verandert bij een temperatuurverandering van 1K (=1 °C) ten opzichte van een begintemperatuur T_0 , waarbij de weerstand R_0 bedraagt. In vergelijkingvorm:

$$R_T = R_0(1 + \alpha(T - T_0)) \quad (3.7-1)$$

R_0 is de weerstand bij de begintemperatuur T_0 , R_T de weerstand bij temperatuur T . Voor grote temperatuurverschillen wordt de relatie ingewikkelder dan in (3.7-1)

3.7.2 Variabele weerstanden

Meestal gaat het om weerstanden met een aftakking die tussen de aansluitpunten heen en weer kan schuiven. Die heet dan ook *schuifcontact*. Dit soort weerstanden staat bekend onder de naam *potentiometer*, in het spraakgebruik vaak *potmeter*. Ze worden het meest gebruikt om in een schakeling een spanning in te stellen. Hoe, zien we in paragraaf 3.8.

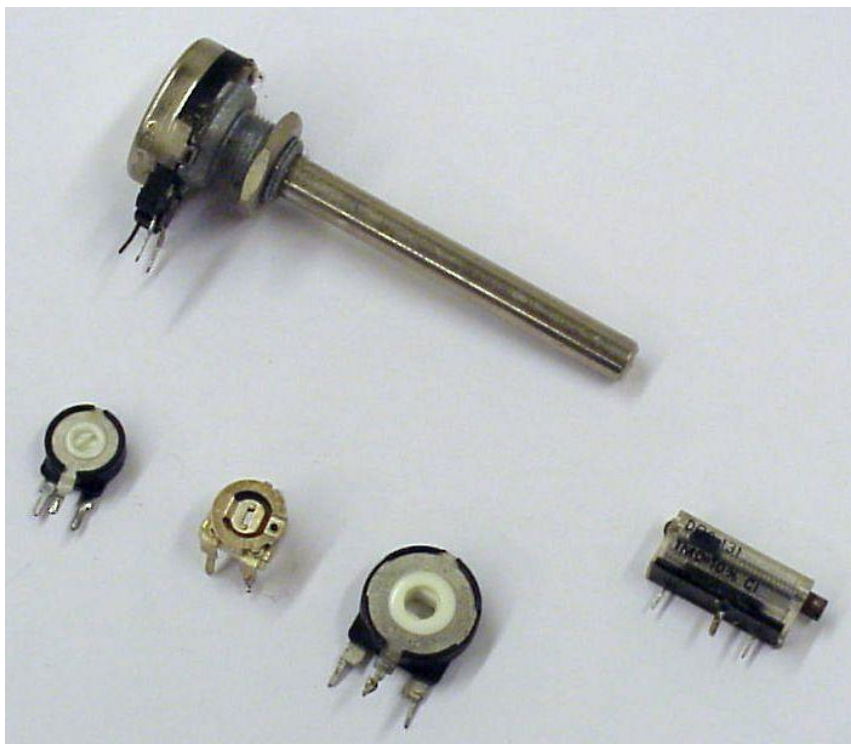
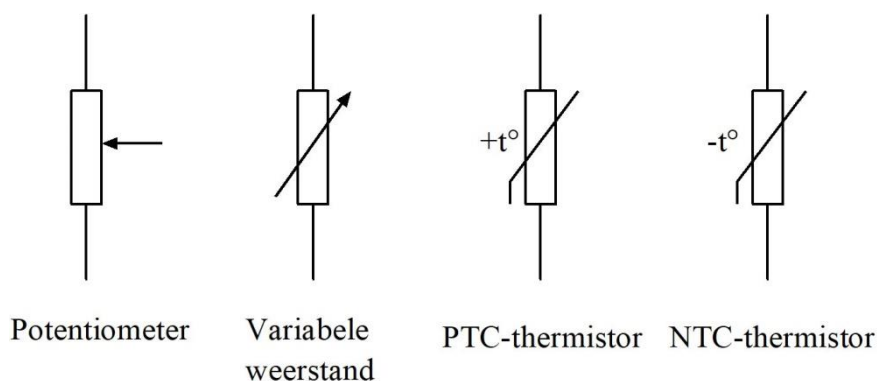


Foto 3.7-2. Voorbeelden van potentiometers. Merk op dat ze allemaal drie contacten hebben: de twee uiteinden en de aftakking. De vier kleintjes zijn bedoeld voor éénmalige instelling met behulp van een schroevendraaier, de grote om een blijvende instelmogelijkheid van een schakeling te hebben, bijvoorbeeld als volumeregelaar van een audioversterker.

Je kunt ze ook gebruiken als variabele weerstand door één uiteinde en het schuifcontact te gebruiken of door één uiteinde met het schuifcontact te verbinden. Dat komt op hetzelfde neer. Figuur 3.7-3 geeft schemasymbolen voor potentiometer, variabele weerstand, PTC- en NTC-thermistors.



Figuur 3.7-3. Schemasymbolen voor potentiometer, variabele weerstand en thermistors. Bij de potentiometer is de lijn met de pijl het schuifcontact.

Potentiometers zijn er in twee hoofd uitvoeringen: draadgewonden en koolpotentiometers. De draadgewonden types zijn meestal bedoeld voor wat grotere vermogens en/of grote precisie. Ze kunnen als draaipotentiometer zijn uitgevoerd, waarbij via een centrale as de stand van het schuifcontact kan worden veranderd, zoals de potmeter op Foto 3.7-2. Soms zit er een vertraging op, zodat de as meerdere malen, vaak 10x, moet worden gedraaid om het schuifcontact van het ene naar het andere eind te krijgen. Die zijn bedoeld voor precisiewerk. Er bestaan ook schuifpotmeters, waarbij het schuifcontact in rechte lijn wordt verschoven, zoals op mengpanelen van geluidssystemen.

Instelbare of variabele draadgewonden weerstanden zijn een gewone draadgewonden weerstand waarop een aftakclip is aangebracht. Deze aftakclip kan over de draadwikkeling worden verschoven en erop vastgeklemd. Zo kan men kiezen, welk deel van de weerstand men wil gebruiken. Ze worden meestal gebruikt om éénmalig een stand in te stellen.

3.8 Schakelingen van weerstanden

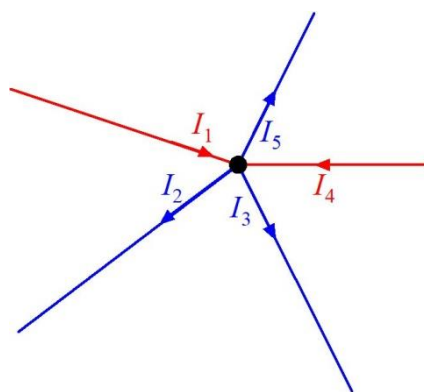
3.8.1 Inleiding

Weerstanden en andere onderdelen zijn vaak op allerlei manieren tezamen geschakeld. We kennen *serieschakeling*, *parallelschakeling* en combinaties van beide. Omdat de Wet van Ohm rekening houdt met maar één weerstand, is het zaak, een schakeling met meer dan één weerstand terug te brengen tot het eenvoudigste schema met die ene weerstand. Pas dan kunnen we rekenen aan de hele schakeling, als dat nog nodig mocht zijn. Die ene weerstand heet de *vervangingsweerstand*, de weerstand waarbij door de vereenvoudigde schakeling bij dezelfde spanning dezelfde stroom loopt als door de oorspronkelijke schakeling. Dat mag op het eerste gezicht een onnodig ingewikkeld gedoe lijken (waarom bouw je die schakeling dan niet meteen zo simpel?), maar de werkelijkheid is anders.

3.8.2 Behoudswetten: de wetten van Kirchhoff

Voor we verder gaan met het schakelen van weerstanden, hebben we nog één onmisbaar natuurkundig beginsel nodig. Dat zijn behoudswetten. Ze komen steeds op hetzelfde neer, maar het gaat per tak van de natuurkunde om een andere naam en andere grootheden. Die van energie hebben we al gehad in hoofdstuk 2. In de elektriciteitsleer hebben we te maken met twee wetten van Kirchhoff. Gustav Robert Kirchhoff was in de 19^e eeuw een Duits natuurkundige die zich met een aantal takken van de natuurkunde bezighield. Een daarvan was de elektriciteitsleer. Zijn elektriciteitswetten formuleerde hij al als student.

De eerste wet van Kirchhoff houdt in dat lading bij stroming door een schakeling niet verloren gaat, maar dat er ook niets bij komt. Hetzelfde hebben we gezien tegen het eind van Hoofdstuk 2, toen het over energie ging. In de eenvoudigste vorm betekent dit dat stroom die een weerstand inloopt, er aan de andere kant onveranderd uitkomt. In de weerstand komt er niets bij en er gaat niets af. Datzelfde geldt voor ingewikkelder gevallen, zoals een knooppunt van twee of meer weerstanden, draden of andere componenten (onderdelen).



Figuur 3.8-1. Stroomknooppunt met vijf takken. De stromen naar het knooppunt zijn rood, die van het knooppunt af zijn blauw.

In Figuur 3.8-1 is een knooppunt met vijf takken weergegeven. De rode geven een stroom aan naar het knooppunt, de blauwe één van het knooppunt af. Het is gebruikelijk om stromen naar een knooppunt positief die die vanuit het knooppunt negatief te noemen. In theorie mag andersom ook, maar praktisch niemand doet dat. De eerste wet van Kirchhoff zegt:

$$I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 = 0 \quad (3.8-1)$$

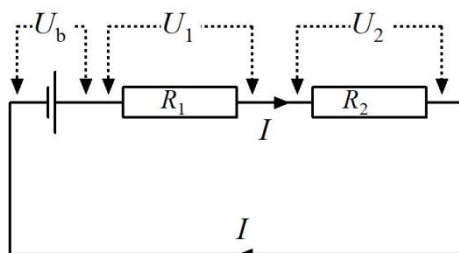
En voor een knooppunt met n takken

$$I_1 + \dots + I_n = 0 \quad (3.8-2)$$

In hoofdstuk 2 bij de opgaven van paragraaf 2.5 over optellen en aftrekken hebben we eigenlijk de eerste wet van Kirchhoff al toegepast, maar dan op verkeersstromen op kruispunten. Er is wiskundig gezien geen verschil.

De eerste wet van Kirchhoff wordt ook wel de *stroomwet* van Kirchhoff genoemd. Dat doet vermoeden dat er ook een spanningswet is. Die is er.

De spanningswet is **de tweede wet van Kirchhoff**. Deze tweede wet volgt voor een belangrijk deel uit de eerste. Hij gaat niet over een knooppunt, maar over een kring, dat wil zeggen één of meer spanningsbronnen van waaruit een stroom door een schakeling van een aantal onderdelen loopt. Een eenvoudig voorbeeld zien we in Figuur 3.8-2.



Figuur 3.8-2. Kring met batterij en twee weerstanden.

De tweede wet van Kirchhoff stelt dat de som van de spanningen in de kring 0 is. Over de batterij staat de spanning U_b . De stroom I doorloopt de batterij en de weerstanden R_1 en R_2 . Op de linkeraansluiting van R_1 is de spanning $+U_b$. Op de rechteraansluiting van R_1 en de linker van R_2 is de spanning $U_b - U_1$. Op de rechteraansluiting van R_2 is de spanning $U_b - U_1 - U_2 = 0$. Dat is precies wat de tweede wet van Kirchhoff zegt. Het bewijs kan iets formeler als we de wet van behoud van energie of vermogen (hoofdstuk 2) erbij halen. Dat is voor de liefhebbers uitgewerkt in het kadertje. De uitwerking is geen examenstof.

Voor de liefhebbers, géén examenstof!

Het vermogen P_b dat in de batterij van Figuur 3.8-2 wordt opgewekt, moet gelijk, maar tegengesteld zijn aan de som van de vermogens P_{R1} en P_{R2} die in de weerstanden worden gedissipeerd. Dus:

$$P_b = -(P_{R1} + P_{R2}) \quad (3.8-3)$$

Omdat $P=IU$ en I overall dezelfde waarde heeft is, kunnen we (3.8-3) schrijven als

$$IU_b = -(IU_1 + IU_2) = -I(U_1 + U_2) \quad (3.8-4)$$

Als we in (3.8-4) aan beide kanten van het = teken delen door I , krijgen we

$$U_b = -(U_1 + U_2) \quad (3.8-5)$$

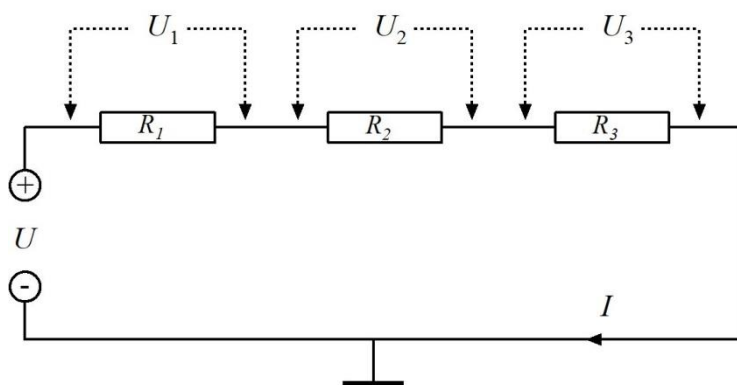
En dus:

$$U_b + U_1 + U_2 = 0 \quad (3.8-6)$$

En dat is precies wat de tweede wet van Kirchhoff zegt. Die tweede wet is dus een combinatie van zijn eerste wet en de wet van behoud van energie of vermogen.

3.8.3 Serieschakeling van weerstanden

Wanneer weerstanden met elkaar zijn verbonden als in Figuur 3.8-3, zijn ze in serie geschakeld. Kop-staart dus. Bij de wetten van Kirchhoff zagen we dat door elke weerstand dezelfde stroom I loopt. De som van spanningen over de weerstanden is gelijk, maar tegengesteld is aan de spanning die over de hele kring staat. De som van alle spanningen is dus 0.



Figuur 3.8-3. Serieschakeling van drie weerstanden.

De drie weerstanden in Figuur 3.8-3 kun je vervangen door een enkele weerstand, waardoor bij de gegeven spanning U dezelfde stroom I loopt. Met de wet van Ohm is die *vervangingsweerstand* altijd te berekenen uit U en I . De vraag is nu, of we die vervangingsweerstand ook kunnen berekenen uit de weerstanden R_1 , R_2 en R_3 en hoe dat dan moet. Omdat dezelfde stroom alle weerstanden moet passeren, kun je bijna ‘op je klompen’ aanvoelen dat de vervangingsweerstand R_{tot} (‘tot’ staat voor ‘totaal’) kan worden berekend volgens

$$R_{tot} = R_1 + R_2 + R_3 \quad (3.8-7)$$

De vervangingsweerstand is dus altijd groter dan de grootste van de weerstanden in de serieschakeling.

Het kan wiskundig allemaal wat ‘netter’ dan we het hier hebben gedaan. Dat is geen examenstof. Vandaar dat er hieronder weer een kadertje ‘Voor de liefhebbers’ is. Daarin is het eindresultaat inderdaad vergelijking (3.8-7).

Voor de liefhebbers, géén examenstof!

Uit de tweede wet van Kirchhoff weten we dat de som van de spanningen over de weerstanden gelijk is aan $-U$, want met zijn drieën en de spanning op de aansluiting moeten ze 0 opleveren. Gemakshalve vergeten we het minteken. Dat is alleen van belang voor de stroomrichting, niet voor de stroomsterkte. Dus:

$$U = U_1 + U_2 + U_3 \quad (3.8-8)$$

Volgens de wet van Ohm is $U=IR$. Dat geldt voor de spanningen over alle weerstanden, dus

$$U = IR_1 + IR_2 + IR_3 \quad (3.8-9)$$

Dat is hetzelfde als

$$U = I(R_1 + R_2 + R_3) \quad (3.8-10)$$

Dan moet de vervangingsweerstand R_{tot} ('tot' is de afkorting van 'totaal') gelijk zijn aan de som van R_1 , R_2 en R_3 , dus

$$\frac{U}{I} = R_{tot} = R_1 + R_2 + R_3 \quad (3.8-7)$$

Te onthouden:

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

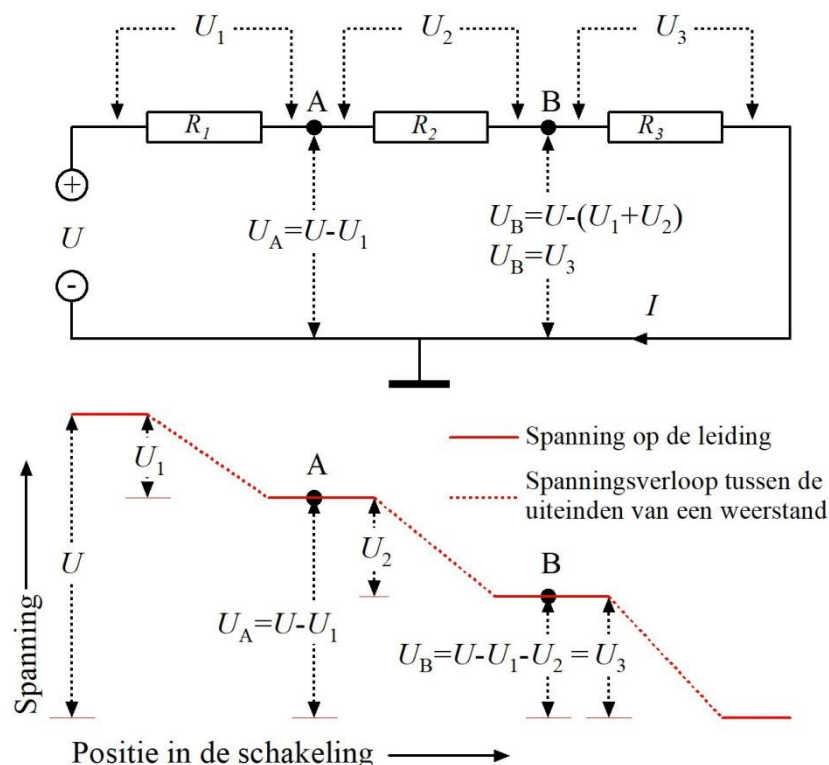
En uit de wet van Ohm volgt:

De spanningen over de afzonderlijke weerstanden zijn evenredig met de grootte van die weerstanden. Over de grootste weerstand staat de grootste spanning, over de kleinste weerstand de kleinste spanning.

Die tweede 'te onthouden' is van belang bij zogenoemde *spanningsdelers*. De tot nu toe opgedane kennis is genoeg om die te begrijpen. Die behandelen we dus meteen. Daarna gaan we naar de parallelschakeling van weerstanden, want daar gaat het er iets anders aan toe dan bij serieschakeling. Maar nu eerst

3.8.4 Spanningsdelers

Een spanningsdeler bestaat uit twee of meer in serie geschakelde weerstanden. De werking van een spanningsdeler volgt direct uit de tweede wet van Kirchhoff. Op elk knooppunt tussen twee weerstanden is de spanning lager dan de spanning die over de hele serieschakeling staat. Om duidelijk te maken dat het ook met meer dan twee weerstanden kan, bekijken we de schakeling met drie stuks in Figuur 3.8-4.



Figuur 3.8-4. Spanningsdeler, gebaseerd op Figuur 3.8-3. Boven de schakeling en onder de **rode grafiek** van de spanning tegen de positie in de schakeling. De delen van de grafiek die binnen een weerstand vallen, zijn gestippeld. De knooppunten A en B staan in het schema en op de overeenkomstige plek in de grafiek.

Links in het schema, boven de rode grafiek, is een spanning U aangesloten. De aansluiting wordt gevolgd door drie weerstanden R_1 , R_2 en R_3 . Tussen de weerstanden zijn de knooppunten A en B aangegeven. De vraag is, hoe je de spanningen op A en B berekent. We kijken eerst wat er precies gebeurt. Daarvoor dient de grafiek (**in rood**) onder het schema. Op de verticale as (zwart) staat de spanning, op de horizontale as de plek in het schema die daar precies loodrecht boven staat. In elke weerstand daalt de spanning (gestippelde rode lijn). In de leidingen blijft deze gelijk (getrokken rode lijn). Helemaal rechts 'landt' de spanning op het nulniveau, zodat aan de tweede wet van Kirchhoff is voldaan.

Hoe bereken je nu de spanningen op A en B? Er zijn twee manieren.

Manier 1. Bereken eerst de stroom I uit de spanning U en de som van R_1 t/m R_3 . Bereken nu U_1 t/m U_3 uit I en R_1 t/m R_3 . Dan is $U_A = U - U_1$ en $U_B = U_3$ of $U_B = U - U_1 - U_2$. De beide laatste komen op hetzelfde neer. De eerste van de twee is meestal het gemakkelijkst.

Manier 2. Gebruik vergelijkingen. Eerst in woorden: **De spanning op een punt van een spanningsdeler is gelijk aan de spanning over de hele deler, vermenigvuldigd met de som van de weerstanden die de stroom nog moet passeren en gedeeld door de som van alle weerstanden in de spanningsdeler.**



Voor punt A wordt dat

$$U_A = \frac{U(R_2 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (3.8-11)$$

En voor punt B

$$U_B = \frac{UR_3}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (3.8-12)$$

Een getallenvoorbeeld.

Stel $U = 12 \text{ V}$, $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 2 \text{ k}\Omega$ en $R_3 = 3 \text{ k}\Omega$.

Manier 1. Bereken I . Daarvoor hebben we de vervangingsweerstand R_{tot} van de drie weerstanden in serie nodig.

$$R_{tot} = R_1 + R_2 + R_3 = 6 \text{ k}\Omega$$

$$I = \frac{12 \text{ V}}{6 \text{ k}\Omega} = 2 \text{ mA.}$$

Dan is U_A te berekenen uit U en U_1 :

$$U_1 = 1 \text{ k}\Omega \cdot 2 \text{ mA} = 2 \text{ V}$$

$$U_A = 12 \text{ V} - 2 \text{ V} = 10 \text{ V}$$

En U_B is gelijk aan U_3 : $U_B = U_3 = IR_3 = 2 \text{ mA} \cdot 3 \text{ k}\Omega = 6 \text{ V}$

U_B kan ook worden berekend met U_2 erbij:

$$U_2 = IR_2 = 2 \text{ mA} \cdot 2 \text{ k}\Omega = 4 \text{ V}$$

We vinden dezelfde uitkomst als hiervoor (en zo hoort het ook):

$$U_B = U - U_1 - U_2 = 12 \text{ V} - 2 \text{ V} - 4 \text{ V} = 6 \text{ V}$$

Manier 2.

$$U_A = \frac{U(R_2 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{12 \text{ V}(2 \text{ k}\Omega + 3 \text{ k}\Omega)}{1 \text{ k}\Omega + 2 \text{ k}\Omega + 3 \text{ k}\Omega} = \frac{12 \text{ V} \cdot 5}{6} = 10 \text{ V}$$

En

$$U_B = \frac{UR_3}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{12 \text{ V} \cdot 3 \text{ k}\Omega}{1 \text{ k}\Omega + 2 \text{ k}\Omega + 3 \text{ k}\Omega} = \frac{12 \text{ V} \cdot 3}{6} = 6 \text{ V}$$

Dus dezelfde uitkomsten als bij Manier 1. Zo hoort het te zijn. De vergelijkingen leiden we hieronder af in een kadertje, dus dat is geen examenkost.

Merk op dat we hierboven het trucje van Opgave 3-7 en Opgave 3-8 hebben toegepast: gebruik $\text{k}\Omega$, mA en V in de wet van Ohm en hij werkt nog steeds.

Voor de liefhebbers, géén examenstof!

Over de stroom I in Figuur 3.8-4 weten we uit de wet van Ohm dat

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (3.8-13)$$

Over U_A valt op grond van de tweede wet van Kirchhof en de wet van Ohm te zeggen dat

$$U_A = U - U_1 \quad \text{en} \quad U_1 = IR_1 \quad (3.8-14)$$

Voegen we de twee vergelijkingen in (3.8-14) samen en vervangen we I in (3.8-14) door het rechterlid van (3.8-13), dan krijgen we

$$U_A = U - \frac{UR_1}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (3.8-15)$$

Dat is te herschrijven als

$$U_A = U \left(1 - \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} \right) \quad (3.8-16)$$

1 is te schrijven als $(R_1 + R_2 + R_3)/(R_1 + R_2 + R_3)$ (elk getal en elke grootheid gedeeld door zichzelf is 1), dus

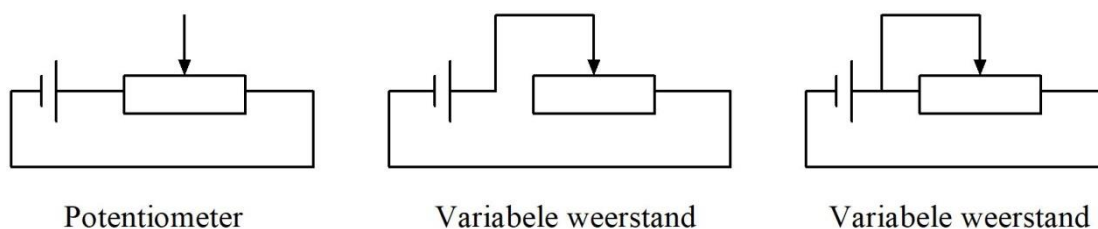
$$U_A = U \left(\frac{R_1 + R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3} - \frac{R_1}{R_1 + R_2 + R_3} \right) \quad (3.8-17)$$

Een dat is hetzelfde als

$$U_A = U \frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (3.8-18)$$

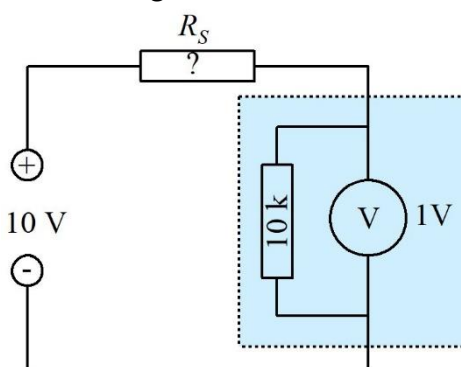
Voor U_B gaat het net zo, met dit verschil dat in (3.8-14) U_1 wordt vervangen door $U_1 + U_2$ en IR_1 door $I(R_1 + R_2)$. Het vervolg van de afleiding wordt daaraan aangepast.

Een variabele spanningsdeler (Figuur 3.8-5 links) is de potentiometer. Het schuifcontact is het knooppunt. Door de positie te veranderen, is de spanning op het knooppunt in te stellen. De rechter twee in Figuur 3.8-5 zijn potentiometers, geschakeld als variabele weerstand. De middelste schakeling lijkt af te wijken van de meest rechtse, maar dat is schijn. In de rechter schakeling is het linkerdeel van de potentiometer weliswaar aangesloten, maar kortgesloten door de verbinding tussen schuifcontact en linker aansluiting. Het speelt dus geen rol.



Figuur 3.8-5. Potentiometer (links) en 2x een variabele weerstand, gemaakt van een potentiometer.

Een toepassing van een spanningsdeler is het vergroten van het bereik van een voltmeter. Stel we hebben een voltmeter met een bereik van 1 V. Met meer dan 1 V over de meter zitten we buiten het meetbereik. We willen spanningen tot 10 V meten. De weerstand van de voltmeter bedraagt 10 k Ω . Gevraagd: welke weerstand R_s moeten we in serie met de voltmeter zetten om 1 V over de meter te hebben bij een spanning van 10 V? Het schema staat in Figuur 3.8-6. De weerstand van 10 K is de weerstand van de meter, maar is er voor de duidelijkheid mee in serie getekend in het blauwe vlak binnen de stippellijn.

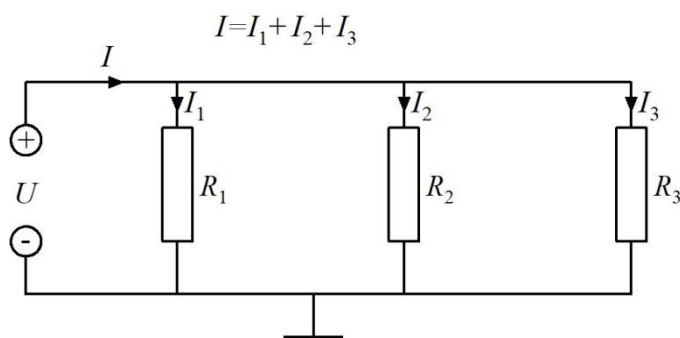


Figuur 3.8-6. Voltmeter met te berekenen serieweerstand R_s die het bereik van de voltmeter van 1 V op 10 V moet brengen. De inwendige weerstand (10 K) van de voltmeter is als parallelle 'buitenboordweerstand' getekend, maar in het blauwe vlak om aan te geven dat hij deel van de meter is. Het oorspronkelijke bereik van de voltmeter is 1 V, zoals aangegeven.

Over de meterweerstand van 10 k (het ohmteken laten we weg, zoals in schema's vrij gebruikelijk is) moet 1 V staan. Door R_s en de meter loopt dezelfde stroom. Over R_s moet 9 V staan, want de som van de spanningen over beide weerstanden moet gelijk zijn aan de 10 V op de aansluitklemmen. Dan is R_s 9x zo groot als 10 k, dat is 90 k. Probleem opgelost.

3.8.5 Parallelschakeling van weerstanden

Wanneer weerstanden met elkaar zijn verbonden als in Figuur 3.8-7, zijn ze parallel geschakeld. Bij serieschakeling (Figuur 3.8-3) loopt door alle weerstanden dezelfde stroom. Bij parallelschakeling zoals in Figuur 3.8-7 staat over alle weerstanden dezelfde spanning.



Figuur 3.8-7. Parallelschakeling van drie weerstanden.

De stroom door elke weerstand wordt volgens de wet van Ohm bepaald door de spanning en de weerstandswaarde. De vraag is nu, hoe je de vervangingsweerstand van parallel geschakelde weerstanden berekent. De stroom I in de figuur heeft drie routes: via R_1 , via R_2 en via R_3 . De stroom door de schakeling ondervindt daarom minder weerstand dan wanneer maar één van die weerstanden zou zijn aangesloten. De vervangingsweerstand is daardoor kleiner dan de kleinste weerstand in de schakeling. De bijbehorende vergelijking is

$$\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (3.8-19)$$

In woorden: **De omgekeerde waarde van de vervangingsweerstand is gelijk aan de som van de omgekeerde waarden van de parallel geschakelde weerstanden.**

Voor twee parallelle weerstanden R_1 en R_2 kun je (3.8-19) vereenvoudigen tot

$$R_{tot} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.8-20)$$

Met andere woorden: **bij twee parallel geschakelde weerstanden is de vervangingsweerstand gelijk aan het product van beide weerstanden gedeeld door hun som.** Voor de liefhebbers volgt weer een kadertje waarin we de vergelijkingen (3.8-19) en (3.8-20) op een formeel juiste manier afleiden.

Voor de liefhebbers, géén examenstof!

Volgens de eerste wet van Kirchhoff is I van/naar de aansluitklemmen gelijk aan de som van de stromen door de weerstanden, dus

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \quad (3.8-21)$$

Elke I kan worden geschreven als U/R ; I als U/R_{tot} , I_1 als U/R_1 , enzovoort. Dus:

$$\frac{U}{R_{tot}} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} \quad (3.8-22)$$

Links en rechts van het = teken delen door U levert het eindresultaat dat we al zagen

$$\frac{1}{R_{tot}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad (3.8-19)$$

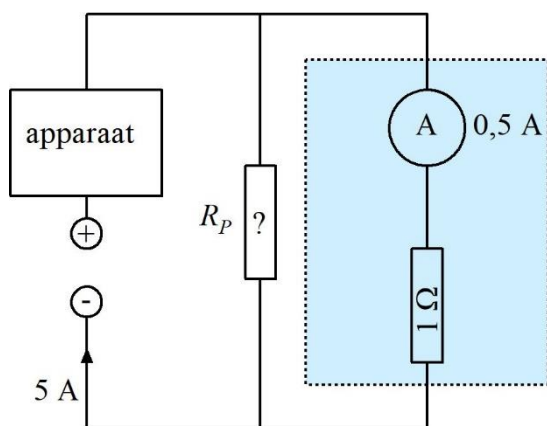
De vergelijking voor twee parallelle weerstanden ontstaat als volgt

$$R_{tot} = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad (3.8-23)$$

Boven en onder de deelstreep vermenigvuldigen met $R_1 R_2$ levert de al getoonde vergelijking

$$R_{tot} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (3.8-20)$$

Een toepassing is het vergroten van het meetbereik van een ampèremeter, zoals we hiervoor het meetbereik van een voltmeter hebben vergroot. Als voorbeeld nemen we een ampèremeter met een bereik van 0,5 A en een inwendige weerstand van 1Ω . Die willen we geschikt maken voor een meetbereik van 5A. Dat betekent dat 4,5 A van de 5A buiten de meter om moet lopen via een parallelweerstand R_p (Figuur 3.8-8).



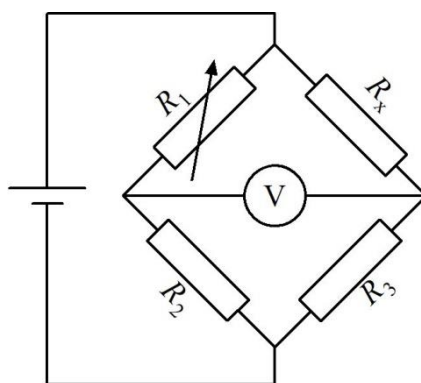
Figuur 3.8-8. Ampèremeter met te berekenen parallelweerstand R_p . De inwendige weerstand (1Ω) van de ampèremeter is ook hier als 'buitenboordweerstand' getekend, maar in het blauwe vlak in de stippellijn, om aan te geven dat hij deel is van de meter. Het bereik van de ampèremeter is aangegeven als 0,5 A.

We zien in de figuur weer het metersymbool, nu met de afkorting A van ampère en de inwendige weerstand net als in Figuur 3.8-6 ‘buitenboord’ getekend. Van de 5 A moet 0,5 A door de meter lopen en 4,5 A buitenom via parallelweerstand R_p . R_p moet daarom $4,5/0,5$ is 9x zo klein zijn als de weerstand van de meter. Dat is $1\Omega/9$, ofwel (afgerond) $0,11\Omega$.

Een parallelweerstand als in Figuur 3.8-8 wordt meestal *shuntweerstand* of kortweg *shunt* genoemd

3.8.6 Toepassing van spanningsdelers bij weerstandsmeting: Brug van Wheatstone

De brug van Wheatstone dient voor het meten van weerstanden. Hij zit in elkaar als weergegeven in Figuur 3.8-9.



Figuur 3.8-9. Brug van Wheatstone

De brug bestaat uit twee spanningsdelers: R_1 en R_2 (links) en R_x en R_3 (rechts). Tussen de beide knooppunten zit een volt- of ampèremeter. Een batterij of andere spanningsbron voedt het geheel. Over beide spanningsdelers staat dus exact dezelfde spanning.

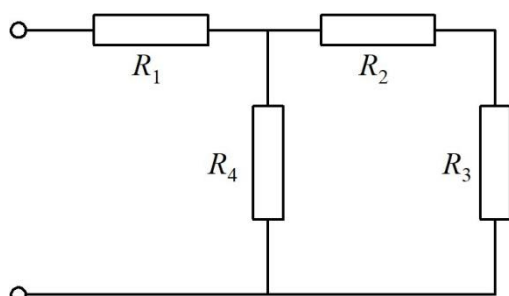
De onbekende weerstand is R_x , zoals de aanduiding doet vermoeden. Met de variabele weerstand R_1 wordt de spanning op het knooppunt van R_1 en R_2 gelijk gemaakt aan die op het knooppunt van R_x en R_3 . Dan zijn de verhoudingen van R_1 en R_2 enerzijds en R_x en R_3 anderzijds, gelijk. In vergelijkingvorm:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_x}{R_3} \quad (3.8-24)$$

De meter wijst dan 0V aan. Met een goed gekalibreerde (geijkte) schaal op de bedieningsknop van R_1 is dan R_x af te lezen. Het meetbereik wordt naar boven beperkt door de hoogste waarde van R_1 . De meetnauwkeurigheid hangt verder af van de nauwkeurigheid van R_2 en R_3 . De batterijspanning hoeft alleen maar voldoende te zijn om een zichtbare uitslag op de meter te krijgen, zolang aan vergelijking (3.3-1) niet wordt voldaan. Ook mag de spanning niet zo groot zijn dat de weerstanden merkbaar warm worden. In plaats van de voltmeter kan ook een milli- of micro-ampèremeter worden gebruikt, zolang de stroom door de meter niet te groot kan worden.

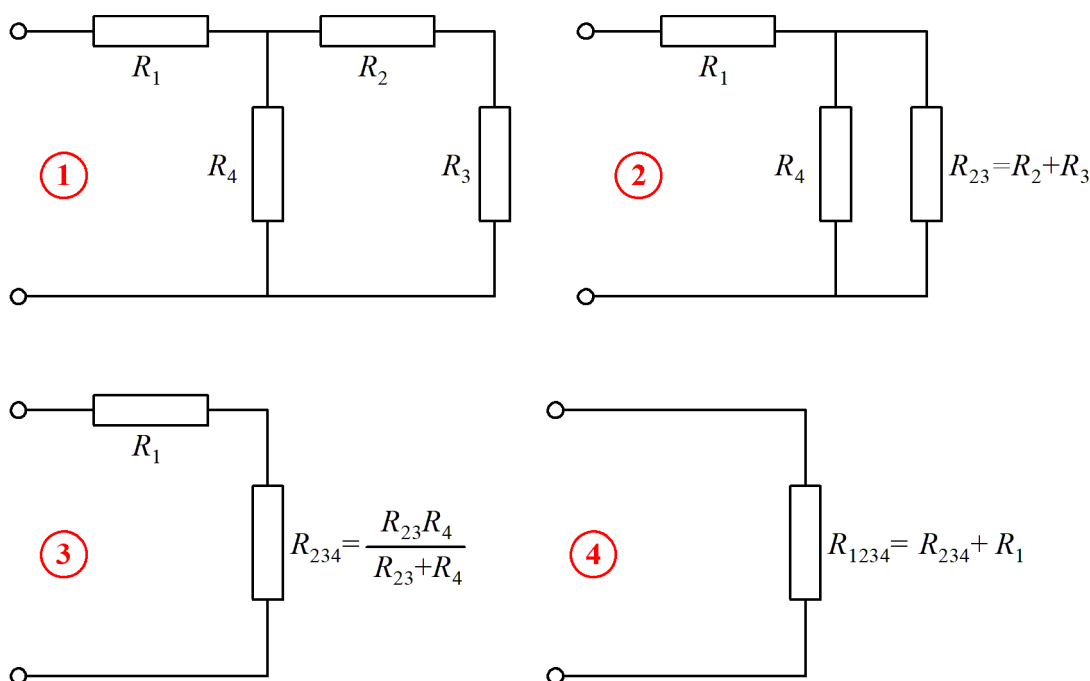
3.8.7 Combinaties van serie- en parallelgeschakelde weerstanden

Een voorbeeld van serie- en parallelgeschakelde weerstanden zien we in Figuur 3.8-10.



Figuur 3.8-10. Parallel- en seriegeschakelde weerstanden in één schakeling.

Als je een spanning over de aansluitklemmen zet, loopt er een stroom door de schakeling. Hoe bereken je de bijbehorende vervangingsweerstand? Dat los je stap voor stap en van achteren naar voren op (Figuur 3.8-11). Deze aanpak, van achter naar de aansluitpunten toe werken, in dit geval van rechts naar links, werkt bijna altijd.



Figuur 3.8-11. Stapsgewijs vinden van de vervangingsweerstand van de schakeling in Figuur 3.8-10.

R_2 en R_3 staan in serie, dus die zijn volgens vergelijking (3.8-7) te vervangen door een enkele weerstand R_{23} , gelijk aan $R_2 + R_3$. Die staat parallel aan R_4 . Daarvoor is weer een vervangingsweerstand R_{234} te berekenen met vergelijking (3.8-20). Het resultaat staat in serie met R_1 . Tel die op bij R_{234} en we vinden de vervangingsweerstand R_{1234} voor alle weerstanden. Zo 'rol je het probleem op'. De gang van zaken is als een opeenvolging van vervangingsschema's weergegeven in Figuur 3.8-11. Hieronder nog een keer de stappen.

Stap 1 is gelijk aan Figuur 3.8-10.

Stap 2. R_2 en R_3 staan in serie. Ze worden samengevoegd tot R_{23} , dus $R_{23} = R_2 + R_3$.

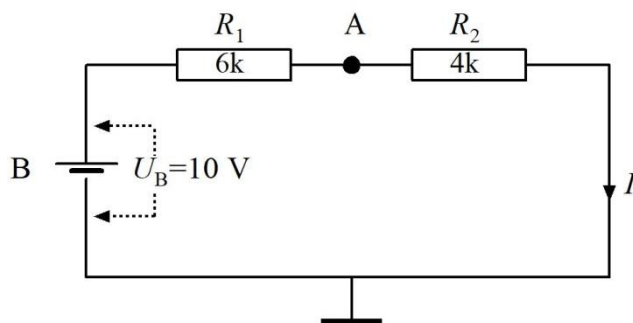
Stap 3. R_{23} staat parallel aan R_4 . Die twee kunnen met behulp van vergelijking (3.8-20), zie figuur, worden samengevoegd tot R_{234} .

Stap 4. R_{234} staat in serie met R_1 . Die twee kunnen we dus optellen tot R_{1234} –zie figuur- en het vraagstuk is opgelost.

Met getallen: stel dat alle weerstanden gelijk zijn aan 100Ω zijn. Dan is $R_{23}=200\Omega$, $R_{234}=200\Omega \cdot 100\Omega / 300\Omega = 67\Omega$ en $R_{1234}=100\Omega + 67\Omega = 167\Omega$.

Tot zover de combinatie van parallel- en seriegeschakelde weerstanden. Maar we zijn nog niet klaar. Het mag misschien gek klinken, maar ook een spanningsdeler is tegelijkertijd te zien als een serie- en een parallelschakeling. Wat het is, hangt af vanaf welk punt je de schakeling bekijkt. Dat gaan we dus doen.

Het begin is Figuur 3.8-12. Een batterij B van 10 V, twee weerstanden R_1 en R_2 van resp. 6k en 4k ($6k\Omega$ en $4k\Omega$). Daartussen een knooppunt A op de leiding tussen R_1 en R_2 . We gaan met A iets doen, vandaar de markering. Eerst berekenen we de vervangingsweerstand van R_1 en R_2 om de stroom I te kunnen berekenen.



Figuur 3.8-12. Serieschakeling van twee weerstanden, tevens spanningsdeler.

Voor R_1 en R_2 in serie geldt vergelijking (3.8-7): $R_{\text{tot}} = R_1 + R_2 = 4k\Omega + 6k\Omega = 10k\Omega$. Een spanning van 10V over een weerstand van $10k\Omega$ geeft volgens de wet van Ohm 1 mA.

Merk op dat we het in Opgave 3-7 en Opgave 3-8 aangegeven handigheidje toepassen: gebruik $k\Omega$ in plaats van Ω in combinatie met V in de wet van Ohm. Dat leidt tot stroom in mA in plaats van in A.

Over R_2 staat een spanning van 4V, want die is gelijk aan $(4k\Omega) \cdot (1\text{ mA}) = 4V$. Het kan ook met vergelijking (3.8-20):

$$U_A = U_B \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{4}{10} U_B = 4V$$

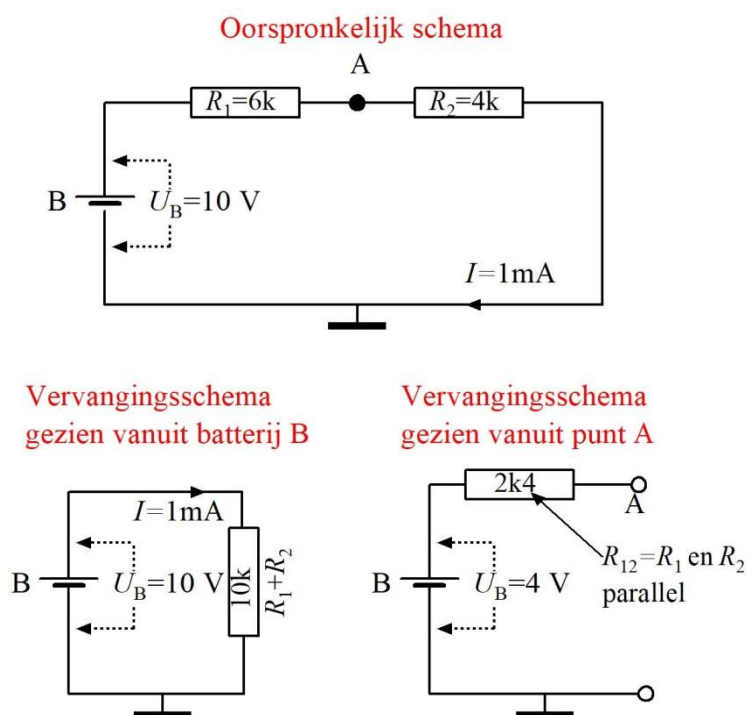
De spanning op punt A is dus 4 V. Maar als we iets aansluiten op A dat stroom gebruikt, blijft de spanning daar dan 4 V? Het antwoord is **nee**. De oorzaak is dat de extra stroom een spanningsverandering op punt A veroorzaakt. Hoe bereken je die verandering?

Om te beginnen moeten we weten hoe groot de weerstand is die een op A aangesloten apparaat 'ziet'. Kijk nog eens goed naar Figuur 3.8-12. Punt A is via R_2 verbonden met massa. De andere verbinding loopt via R_1 , maar met een spanningssprong via batterij B. Die bepaalt de spanning, maar doet niets met de weerstand, zolang de weerstand binnenin B verwaarloosbaar klein is, dus praktisch $0\ \Omega$. Van dit laatste gaan we gemakshalve uit.

Dan zijn vanuit punt A gezien R_1 en R_2 allebei verbonden met massa, ook al zit er achter R_1 een spanningssprong. Ze staan vanuit A gezien parallel en niet in serie. De parallelle waarde van de R_1 en R_2 die we R_{12} noemen, is te berekenen met vergelijking (3.8-20):

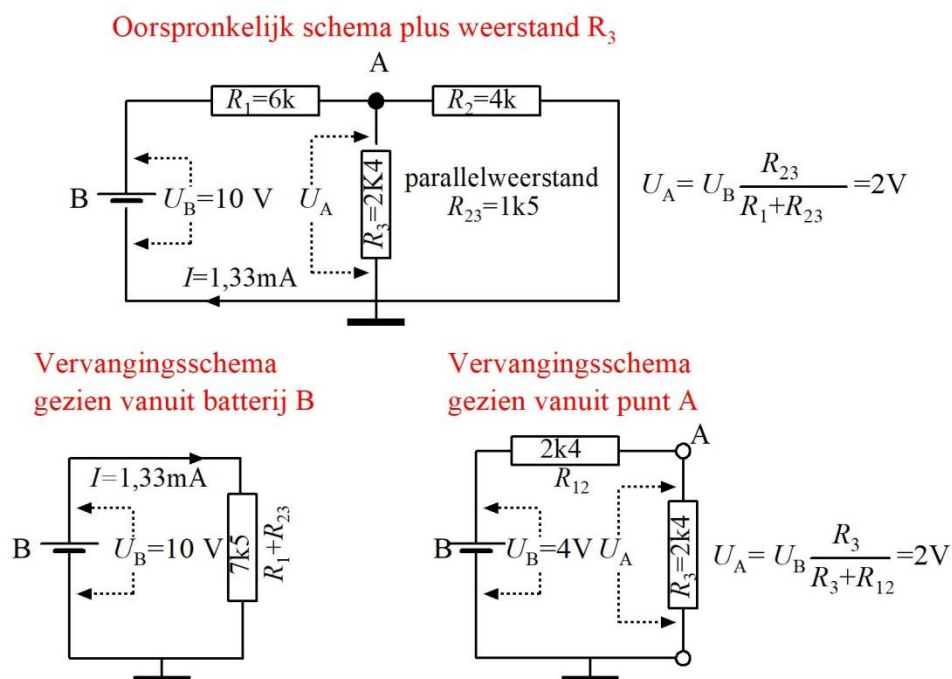
$$R_{12} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = \frac{6\text{k}\Omega \cdot 4\text{k}\Omega}{10\text{k}\Omega} = 2,4\text{k}\Omega$$

Doordat de weerstanden van $6\text{k}\Omega$ en $4\text{k}\Omega$ vanuit punt A gezien parallel en niet in serie staan zoals vanuit de batterij gezien, vinden we dus geen $10\text{k}\Omega$, maar $2,4\text{k}\Omega$. Punt A is dan op te vatten als een batterij van 4V in serie met een weerstand van $2,4\text{k}\Omega$. Figuur 3.8-13 toont het oorspronkelijke schema van Figuur 3.8-12 en beide vervangingsschema's.



Figuur 3.8-13. Serieschakeling en spanningsdeler van Figuur 3.8-12 met vervangingsschema's op basis van serieschakeling (vanuit de batterij) en parallelschakeling (vanuit knooppunt A).

Als we op punt A een tweede weerstand van $2,4\text{k}\Omega$ aansluiten, moet de spanning op punt A halveren naar 2V . Als alles klopt, moeten we die 2V ook vinden voor het oorspronkelijke schema. Dat controleren we natuurlijk.



Figuur 3.8-14. Serieschakeling en spanningsdeler van Figuur 3.8-13 met toegevoegde weerstand R_3 van 2,4 k Ω (2K4) en vervangingsschema's op basis van serieschakeling (vanuit B) en parallelschakeling (vanuit A).

In Figuur 3.8-14 is in de schakeling van Figuur 3.8-12 een weerstand van 2K4 als R_3 toegevoegd. De vraag is nu of we in het oorspronkelijke schema en in het vervangingsschema vanuit punt A die 2 V op punt A vinden.

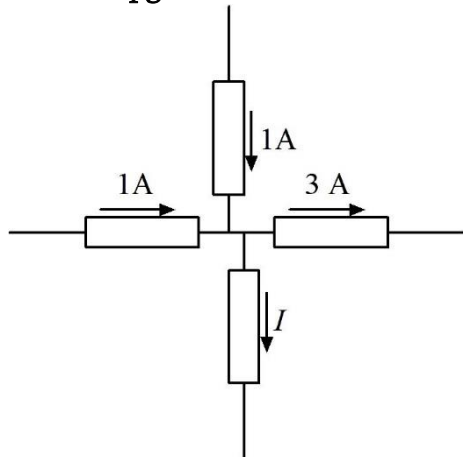
We beginnen met de stroom. Door de toevoeging van R_3 is die veranderd. R_2 en R_3 staan gezien vanuit punt A parallel. Hun vervangingsweerstand R_{23} is $4k \cdot 2k4 / (4k + 2k4) = 1k5$, ofwel 1,5 k Ω .

Vanuit de 10V-batterij gezien is de weerstand van de hele schakeling daardoor 6k en 1k5 in serie, dus samen 7k5 en is de stroom toegenomen tot $10V / 7k5$, dus (afgerond) 1,33 mA. Dan is de spanning op punt A 10V verminderd met de spanning over R_1 . Die laatste is 8V ($1,33mA \cdot 6K = 8V$), dus de spanning op A is $10V - 8V = 2V$. Dat is als verwacht, dus de verwachting was juist.

Bij het vervangingsschema vanuit punt A vinden we dus inderdaad 2 V, zoals beredeneerd vanuit de oorspronkelijke situatie (Figuur 3.8-12).

3.9 Opgaven

3.9.1 Opgave 3-12



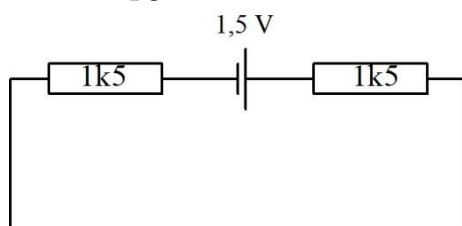
De stroom I

- A. Bedraagt 1A en de pijl voor de stroomrichting staat de juiste kant op
- B. Bedraagt 1A en de pijl voor de stroomrichting staat de verkeerde kant op
- C. Bedraagt 2A en de pijl voor de stroomrichting staat de juiste kant op
- D. Bedraagt 2A en de pijl voor de stroomrichting staat de verkeerde kant op

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking



3.9.2 Opgave 3-13



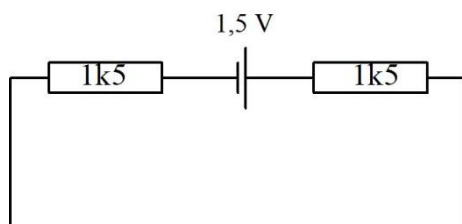
De spanning over elke weerstand bedraagt

- A. 0,75V
- B. 1,5V
- C. 0,5V
- D. 2V

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking



3.9.3 Opgave 3-14

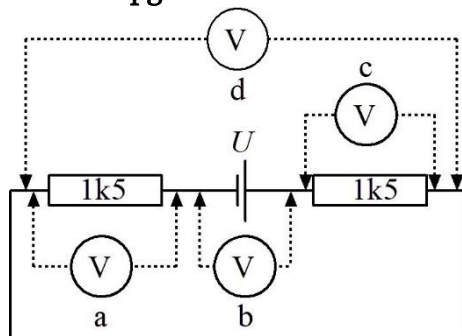


De stroomsterkte in dit schema bedraagt

- A. 1 mA per weerstand
- B. 0,5 mA
- C. 2 mA
- D. 1A

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking 

3.9.4 Opgave 3-15



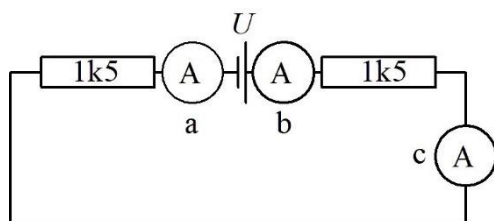
De juiste meterpositie om de hoogste spanning in de hele kring te meten is

- A. a
- B. b
- C. c
- D. d

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking 

3.9.5 Opgave 3-16

Welke meterpositie is het meest geschikt om de stroom door de kring te meten

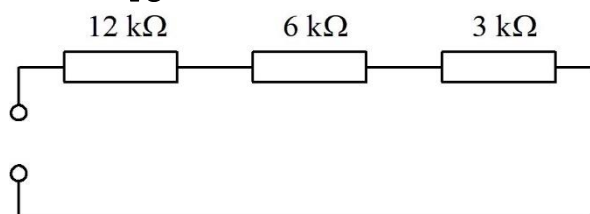


- A. a
- B. b
- C. c
- D. a, b en c

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking



3.9.6 Opgave 3-17

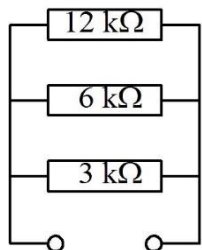


De vervangingsweerstand is

- A. 6 kΩ
- B. 15 kΩ
- C. 21 kΩ
- D. 1700 Ω

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking

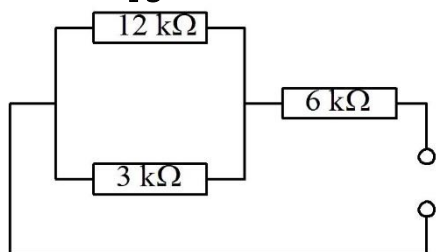


3.9.7 Opgave 3-18

De vervangingsweerstand is ongeveer

- A. 6 kΩ
- B. 15 kΩ
- C. 21 kΩ
- D. 1700 Ω

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking

**3.9.8 Opgave 3-19**

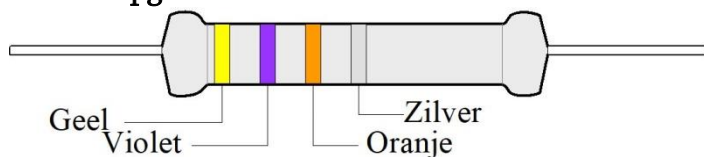
De vervangingsweerstand is ongeveer

- A. 21 kΩ
- B. 15 kΩ
- C. 8,4 kΩ
- D. 4,8 kΩ

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking



3.9.9 Opgave 3-20



Waarde en tolerantie van de afgebeelde weerstand zijn

- A. 47000 Ω , 5%
- B. 74 k Ω , 10%
- C. 4,7 k Ω , 10%
- D. 47 k Ω , 10%

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking



3.9.10 Opgave 3-21

Een lampje wordt gevoed uit een batterij van 4,5 V. Het verbruikt 0,1 A. De weerstand van het lampje bedraagt ongeveer

- A. 0,022 Ω
- B. 45 Ω
- C. 4,5 Ω
- D. 0,45 Ω

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking

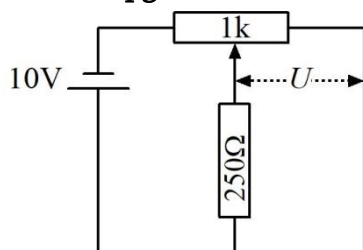


3.9.11 Opgave 3-22

Een apparaat moet worden gevoed met een spanning van 6 V en gebruikt 0,1 A. Er is alleen een spanning van 10 V beschikbaar bij ruim voldoende stroom. Om de spanning omlaag te brengen naar 6 V wordt een weerstand tussen spanningsbron en apparaat opgenomen. Die weerstand moet een waarde hebben van

- A. 40 Ω
- B. 0,25 Ω
- C. 0,4 Ω
- D. 25 Ω

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking

**3.9.12 Opgave 3-23**

Het schuifcontact van de potentiometer staat precies in het midden van de weerstandsbaan. De weerstandsbaan in de potentiometer is overal even dik en breed en bestaat overal uit hetzelfde materiaal. De spanning U bedraagt

- A. 10 V
- B. 5 V
- C. 2,5 V
- D. 2 V

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking

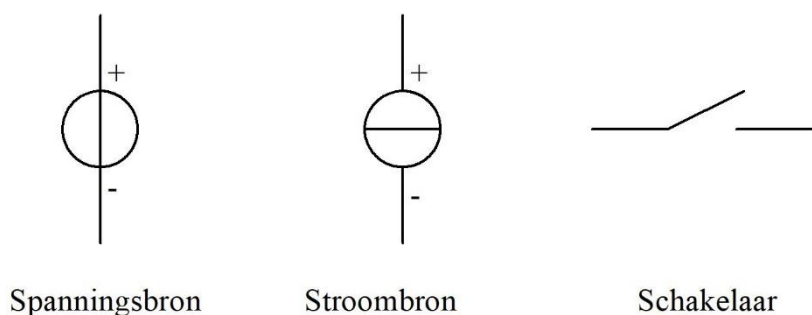


3.10 Spannings- en stroombronnen, afzonderlijk en geschakeld

3.10.1 Schemasymbolen voor spannings- en stroombronnen en eenvoudige schakelaars

We zijn tot nu toe wat losjes omgesprongen met stroom- en spanningsbronnen. In deze paragraaf zullen we dat onderwerp strikter aanpakken. Die striktheid hebben we nodig voor allerlei zaken die hierna nog aan de orde moeten komen en dus ook voor het examen. We maken kennis met ideale en werkelijke spannings- en stroombronnen en hoe we die inpassen in schakelingen.

Daarbij gebruiken we twee nieuwe schemasymbolen voor de ideale spanningsbron en de ideale stroombron. Ze staan in Figuur 3.10-1. Daarin staat ook het symbool voor schakelaar. Die komen we in dit hoofdstuk nog weinig tegen, in volgende hoofdstukken met enige regelmaat.



Figuur 3.10-1. Schemasymbolen voor de ideale spanningsbron en de ideale stroombron en de aan/uit schakelaar.

Als een schakelaar *open* is, wil dat zeggen dat er geen verbinding is. Is een schakelaar *gesloten*, dan wil dat zeggen dat de contacten zijn verbonden. Dat is ongeveer even verwarrend als een brug. Als de brug 'dicht' is, is hij dan dicht voor de scheepvaart of voor het wegverkeer?

3.10.2 Spanningsbronnen, EMK

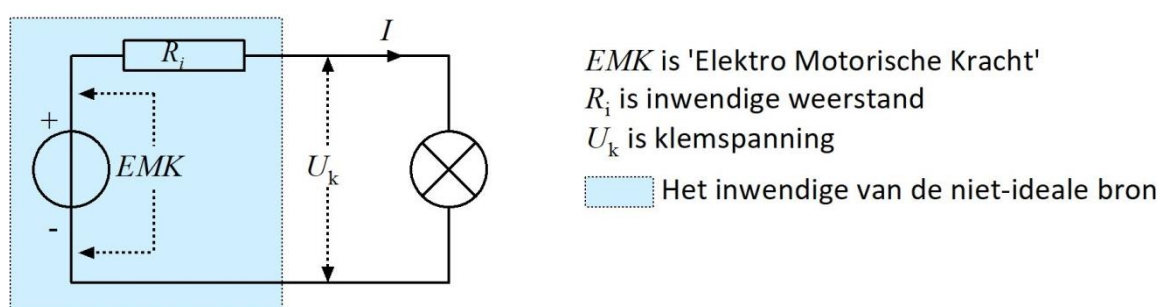
Een ideale spanningsbron heeft een inwendige weerstand van $0\ \Omega$. In tegenstelling tot bijvoorbeeld de spanning op punt A in Figuur 3.8-14 verandert de bronspanning niet als er stroom aan wordt onttrokken. Als de bron wordt kortgesloten, is de stroom oneindig.

Dat laatste maakt al duidelijk dat de ideale spanningsbron niet bestaat. Toch kan dit idee nuttig zijn om de werking van schakelingen duidelijk te maken. Als we praten over de inwendige weerstand van een batterij of andere reële spanningsbron, beschouwen we die batterij of spanningsbron eigenlijk als ideale bron in serie met een weerstand. En zo mag je elke batterij of andersoortige voeding in de werkelijke wereld zien.

Stel dat we een batterij van 4,5 V hebben met een inwendige weerstand van $1\ \Omega$. Als we geen stroom afnemen, is de spanning 4,5 V. Dat heet ook wel de EMK. EMK is een afkorting van ElektroMotorische Kracht. EMK is de spanning van een niet-ideale spanningsbron die geen stroom levert, of in elektrotechnische termen, niet wordt belast.

EMK heeft zijn naam te danken aan de gedachte dat het een kracht is die lading een geleider in duwt. Natuurkundig gezien is het geen kracht, maar een potentiaal. Potentiaal is energie per lading, zoals in 3.3.3 al is gezegd. EMK is dus een wat ongelukkige term, maar hij is ingeburgerd. **De term EMK en zijn betekenis zijn examenstof.** Een andere term voor EMK is *bronspanning*. Die term dekt de lading aanzienlijk beter, zoals te zien is in Figuur 3.10-2, maar is minder gebruikelijk.

Als we onze batterij met bijvoorbeeld 0,5A belasten, dat is 0,5 A laten leveren, meten we op de aansluiting geen 4,5 V, maar minder. Hoeveel minder? Dat is $0,5A \cdot 1\Omega = 0,5V$ minder, dus 4 V. We volgen hier dus Manier 1 uit 3.8.4. Die 4V heet de *klemspanning* van de batterij. In schemavorm ziet dat eruit als in Figuur 3.10-2



Figuur 3.10-2. Niet-ideale spanningsbron, dus met inwendige weerstand, EMK en klemspanning U_k en met belasting in de vorm van een lampje.

Bij een ideale spanningsbron is de klemspanning onder alle omstandigheden gelijk aan de EMK. Bij een niet-ideale (reële) spanningsbron, zoals in Figuur 3.10-2, zijn EMK en klemspanning alleen aan elkaar gelijk als de stroom 0 is.

Als een niet-ideale bron wordt kortgesloten, wordt de stroom alleen beperkt door de inwendige weerstand. Dan hebben we te maken met de *kortsluitstroom*. In het hiervoor genoemde voorbeeld zou dat neerkomen op een ideale bron die met een weerstand van 1Ω wordt belast. Dat levert een stroom van ongeveer 4,5A op en een dissipatie van ruim 20W (ga dit na!!), waardoor de batterij snel flink heet wordt en ongelukken niet denkbeeldig zijn. **Probeer het niet zelf**, maar Google bijvoorbeeld 'batterij kortsluiten'.

De ideale spanningsbron kan met behulp van elektronica vergaand worden benaderd. Dan hebben we het over *gestabiliseerde voedingen*. Ze worden besproken in hoofdstuk 10.

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

Over het vermogen dat een **ideale spanningsbron** levert, kunnen we kort zijn. Hoe kleiner de belastingsweerstand R , des te groter is het vermogen P dat buiten de bron beschikbaar komt. Vergelijking (3.6-5) geeft het antwoord in vergelijkingvorm:

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (3.6-5)$$

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

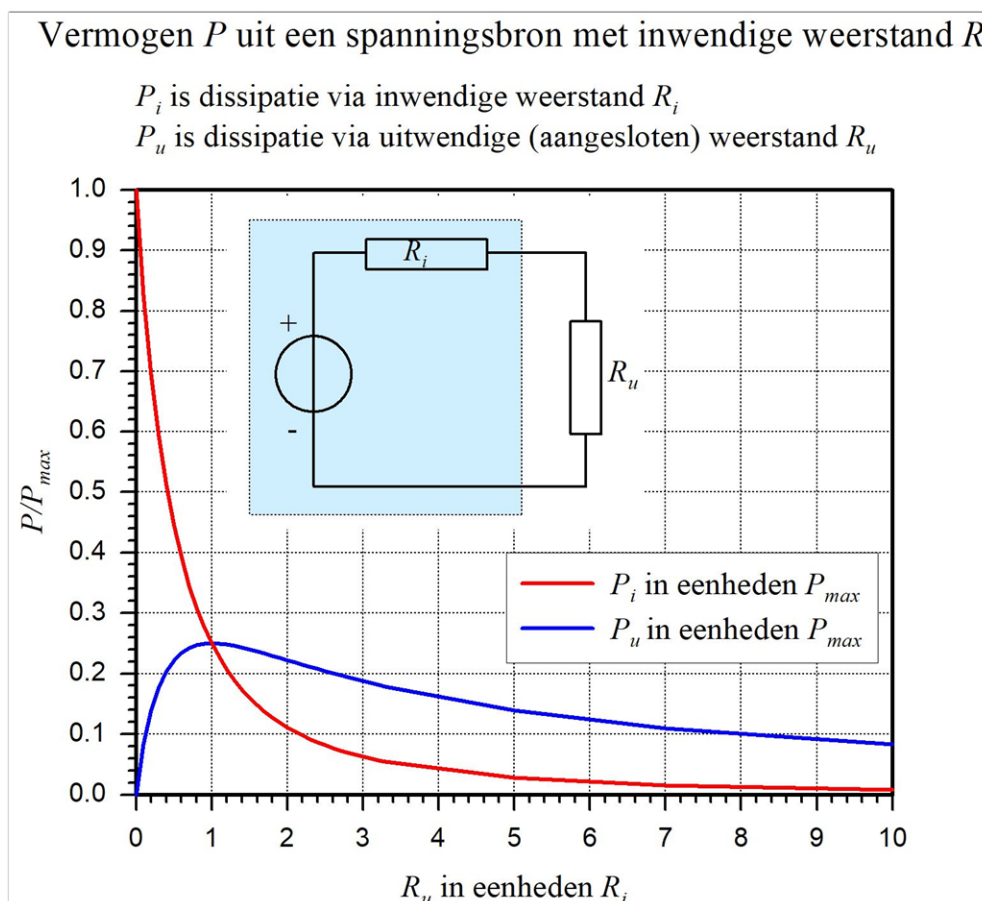
Bij een **niet-ideale bron** verbruikt (dissipeert) de inwendige weerstand een deel van het vermogen. Een batterij bijvoorbeeld wordt merkbaar warm als je er een tijdje een flinke stroom aan onttrekt.

Bij een zekere EMK bepalen de inwendige weerstand R_i en de aangesloten (uitwendige) weerstand R_u de stroom. De totale weerstand R van de stroomkring is gelijk aan $R_i + R_u$, want die twee staan in serie. Voor twee extreme situaties valt eenvoudig te bedenken wat er gebeurt:

Situatie 1: R_u is 0 (kortsluiting). Het vermogen wordt volledig verbruikt door R_i . Dit is vergelijking (3.6-5) 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, beginnen we in situatie 1 en eindigen in situatie 2. We stellen ons daarbij de vraag, bij welke waarde van R_u de dissipatie van R_u maximaal is. We doen dat in twee stappen en aan de hand van Figuur 3.10-3.



Figuur 3.10-3. 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 .

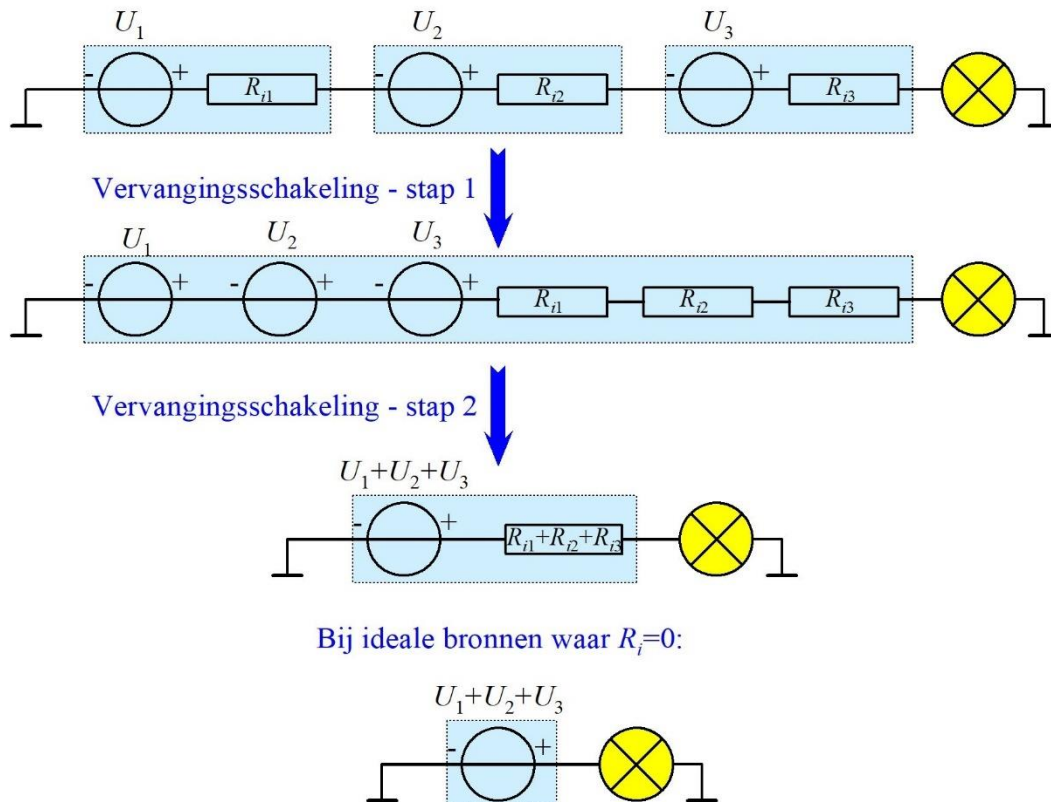
Stap 1. We laten R_u toenemen van 0 naar R_i . Dat is de waarde 1 op de horizontale schaal, want die staat in eenheden R_i . De totale weerstand R in de kring is dan gelijk aan $R_i + R_u$. R neemt toe omdat R_u toeneemt. Met R_i gebeurt niets. Als de totale weerstand R in de stroomkring toeneemt, neemt het totale vermogen af volgens vergelijking (3.6-5). 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 ten opzichte van P bij $R_u=0$. 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 steeds verder af, want R wordt groter. R_i blijft gelijk. Zo neemt het aandeel van P_i in P steeds verder af. Doordat het totale vermogen P met toenemende R_u steeds kleiner wordt, doet P_u 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. Hoe dat precies gaat, zien we later in deze cursus.

3.10.4 Schakelen van spanningsbronnen



Figuur 3.10-4. Serieschakeling van niet-ideale spanningsbronnen en vervangingsschakelingen met brandend lampje (vandaar de kleur) als belasting.



Net als weerstanden kun je spanningsbronnen in serie of parallel schakelen. Bij in serie geschakelde spanningsbronnen moet je de spanningen van de afzonderlijke bronnen optellen om de totale spanning te berekenen. De meesten van ons kennen dat wel van bijvoorbeeld zaklantaarns of afstandsbedieningen van de TV, waar meer dan één batterijtje in moet. Een serieschakeling van drie niet-ideale spanningsbronnen staat in Figuur 3.10-4.

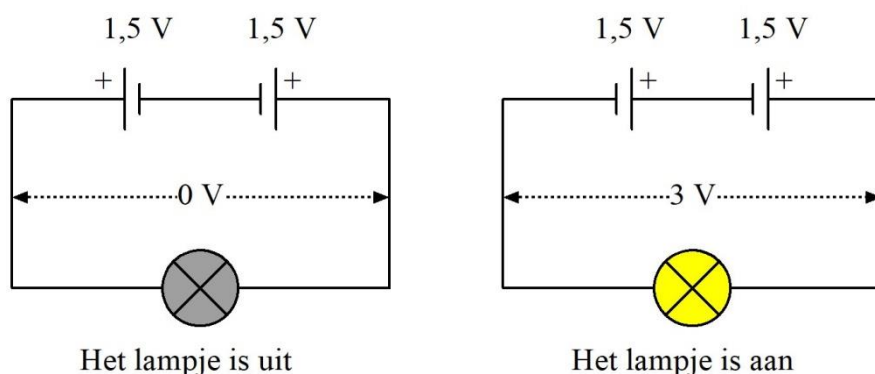
Stap 1 in Figuur 3.10-4. Alle drie de bronnen zijn weergegeven als ideale bron in serie met hun inwendige weerstand R_i . Als de lamp stroom afneemt, loopt door elke bron en elke inwendige weerstand dezelfde stroom (1^e Wet van Kirchhoff). Volgens de tweede wet van Kirchhoff is de som van alle spanningen over bronnen, weerstanden en de belasting (de lamp) 0. Het is een optelsom van positieve waarden over de bronnen en negatieve over weerstanden en lamp (of andersom). In een optelsom maakt de volgorde van de termen niets uit. We mogen dan ook zonder bezwaar de bronnen en de weerstanden bij elkaar zetten. (stap 1).

Stap 2 in Figuur 3.10-4. Drie in serie geschakelde ideale bronnen mogen volgens dezelfde tweede wet van Kirchhoff worden gezien als één bron met de som van alle drie de spanningen. Drie in serie geschakelde weerstanden mogen om dezelfde reden worden vervangen door één, waarvan de weerstand gelijk is aan de som van de drie (serieschakeling van weerstanden in 3.8.3).

Ideale bronnen hebben geen inwendige weerstand. Bij een ideale bron houden we één bron over zonder weerstanden (onderin Figuur 3.10-4).

Een serieschakeling van spanningsbronnen kunnen we vereenvoudigen tot een enkele bron met een EMK gelijk aan de som van de EMK's van de afzonderlijke bronnen en een inwendige weerstand gelijk aan de som van de afzonderlijke inwendige weerstanden.

Bij het in serie schakelen van batterijen of andere spanningsbronnen moet op de polariteit worden gelet. Als twee batterijen 'tegen elkaar in' staan, zoals in Figuur 3.10-5, werken ze elkaar tegen. De spanningen zijn tegengesteld en het resultaat is het verschil tussen beide spanningen (eigenlijk de som van een positieve en een negatieve spanning). Als de spanningen even groot zijn, is het verschil 0 en wordt er geen stroom geleverd (Figuur 3.10-5 links). Als beide spanningen in dezelfde richting staan, gebeurt dat wel (Figuur 3.10-5 rechts).



Figuur 3.10-5. Als batterijen tegengesteld zijn geschakeld, is het resultaat het spanningsverschil, in dit geval 0 V. Staan ze in dezelfde richting, dan is het resultaat de som van beide spanningen.

Waarschuwing voor het verkeerd om aansluiten van in serie geschakelde batterijen. Als de totale spanning niet 0 is omdat bijvoorbeeld twee batterijen wel in de juiste richting staan, loopt er bij levering van stroom vanuit de schakeling door de verkeerd aangesloten batterij een stroom in de verkeerde richting. In het beste geval wordt die batterij warm of heet en in het slechtste geval gaat hij een agressieve chemische substantie lekken of knalt hij uit elkaar. Oppassen dus.

In theorie kunnen spanningsbronnen, bijvoorbeeld batterijen, ook parallel worden geschakeld. De geleverde spanning blijft dan dezelfde, de inwendige weerstand van het geheel is die van de parallel geschakelde inwendige weerstanden en de stroom is de som van de stromen van de afzonderlijke bronnen. Het addertje onder het gras is dat de bronnen volkomen identiek moeten zijn. Heeft de één een iets grotere spanning dan de ander, dan is er van gelijke verdeling van de stroom over de afzonderlijke bronnen geen sprake meer. Hetzelfde geldt in wat mindere mate voor de inwendige weerstanden. Parallelschakelingen van batterijen en andere niet-ideale bronnen zul je dan ook vrijwel nooit tegenkomen, of er moet een stukje elektronica zijn toegepast om de nadelen op te heffen.

Als batterijen parallel worden geschakeld, moeten ze volledig identiek zijn. Dat laatste is zelden het geval.

Het overzicht voor serie- en parallel geschakelde niet-ideale spanningsbronnen staat in Tabel 3.10-1.

Tabel 3.10-1. 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



3.10.5 Schakelen van stroombronnen

Schakelen van stroombronnen is geen formele examenstof. Daarom lopen we er snel doorheen.

Stroombronnen kun je eigenlijk alleen parallel schakelen. Zouden ze in serie geschakeld worden, dan zou stroombron 1 zijn stroom aan nummer 2 moeten opleggen, enz. Een eigenschap van ideale stroombronnen is nu juist dat ze een stroom leveren, ongeacht de omstandigheden in de schakeling. Serieschakelen van ideale stroombronnen is dus in tegenspraak met zichzelf. Met niet-ideale stroombronnen is in theorie nog wel iets te beginnen, maar ook dat is geen exameneis.

Resteert de parallelschakeling van ideale stroombronnen. Die is eenvoudig: tel de stromen bij elkaar op en klaar is Kees.

Bij ideale stroombronnen is de inwendige weerstand oneindig, bij niet-ideale stroombronnen eindig. De inwendige weerstand kun je je voorstellen als parallel aan de stroombron. Bij parallel geschakelde niet-ideale stroombronnen staan alle inwendige weerstanden ook parallel. Hoe meer stroombronnen, hoe meer stroom en hoe lager de R van de totale schakeling.

3.10.6 Praktische bronnen

We hebben het al over batterijen gehad, maar daarmee hebben we lang niet alle soorten reële of praktische bronnen besproken. ‘Batterij’ is een verzamelnaam. Een batterij is eigenlijk een schakeling van meerdere spanning leverende elementen. Een 9-V-blokje bestaat uit 6 elementen van 1,5 V, die ook wel *cellen* heten. Tegenwoordig noemen we een los verkrijgbare cel meestal ook *batterij*. Die term hebben we er ook steeds voor gebruikt.

Batterijen zijn gebaseerd op een elektrochemisch proces waarbij vrijwel altijd een metaal en een zuur zijn betrokken. Hoe dat in zijn werk gaat, is geen exameneis meer. De webpagina [https://nl.wikipedia.org/wiki/Batterij_\(elektrisch\)](https://nl.wikipedia.org/wiki/Batterij_(elektrisch)) geeft informatie voor de liefhebbers. De wetenschappelijke benaming is *galvanisch* element, naar de Italiaanse geleerde [Luigi Galvani](#), hoewel galvanische elementen eigenlijk door Galvani's landgenoot [Alessandro Volta](#), naar wie de volt is genoemd, zijn ontdekt.

Een batterij die een schakeling voedt, raakt na verloop van tijd uitgeput. Bij sommige types is dat proces omkeerbaar. Met een tegengestelde stroom kan de oorspronkelijke situatie weer (nagenoeg) worden hersteld. Zulke batterijen worden *oplaadbaar* genoemd. Meer informatie vind je op https://nl.wikipedia.org/wiki/Opladbare_batterij. Een voorbeeld is de auto-accu. Die bestaat uit in serie geschakelde cellen (lood met zwavelzuur) van elk 2 V. Voor een 12V-accu zijn dus 6 cellen nodig.

In al deze gevallen wordt chemische energie omgezet in elektrische en bij de oplaadbare types ook omgekeerd. Ook bewegingsenergie kan worden omgezet in elektrische energie. Voorbeelden zijn dynamo's en generatoren. Omzetting van lichtenergie in elektrische

energie is al lang bekend, maar neemt in de laatste decennia een steeds grotere vlucht in de vorm van zonnepanelen.

Een overzicht staat in Tabel 3.10-2.

Tabel 3.10-2. Voorbeelden van elektrische energiebronnen (spanningsbronnen).

Brontype	Principe
Galvanische elementen	Scheikundige energie wordt omgezet in elektrische energie
Accu	Idem
Dynamo of generator	Mechanische energie wordt omgezet in elektrische energie
Zonnecel	Licht (fotonen) wordt omgezet in elektrische energie

3.10.7 De capaciteit van een batterij of accu

Eerder is opgemerkt dat een batterij na verloop van tijd uitgeput raakt. Het is van belang om te weten wanneer dat gebeurt. Daarvoor hebben we de grootte *batterij- of accucapaciteit*¹. Die wordt uitgedrukt in Ah, ampèreuur. Die kennen we al van hoofdstuk 2, toen het ging om het vermenigvuldigen van grootheden en van eenheden. Een batterij van 1 Ah kan gedurende 1 uur 1 A leveren, gedurende 2 uur $\frac{1}{2}$ A of gedurende $\frac{1}{2}$ uur 2 A, zolang het product van de stroomsterkte en het aantal uren maar 1 Ah oplevert.

In werkelijkheid is dat niet helemaal zo, omdat in de praktijk bij een hogere stroom de capaciteit wat terugloopt. Hoeveel, hangt onder meer af van het soort batterij. Bij een ideale batterij is dat natuurlijk niet zo, maar die bestaan voornamelijk in examens.

De capaciteit van een batterij (of accu, waaronder we hier hetzelfde verstaan) is de hoeveelheid lading die een batterij kan leveren. Stroom is lading per tijd. 1 A is één C/s, zagen we in paragraaf 3.3. En dan is (C/s).s hetzelfde als C. 1Ah is dan 3600 s maal 1 C/s en dat is 3600 C.

Capaciteit van een batterij is niet hetzelfde als energie. Een voorbeeld: Twee gelijke batterijen in serie hebben dezelfde capaciteit, maar de hoeveelheid energie is ten opzichte van de enkele batterij verdubbeld. Oorzaak: de spanning is 2x zo groot. Dat laatste geldt niet voor twee parallel geschakelde batterijen (die wel identiek moeten zijn!). Doordat ze

¹ In hoofdstuk 4 zullen we een ander soort capaciteit tegenkomen, die van de condensator. Maak je nu geen zorgen over het verschil. Dat blijkt wel uit de bijbehorende tekst of het bijbehorende schema.

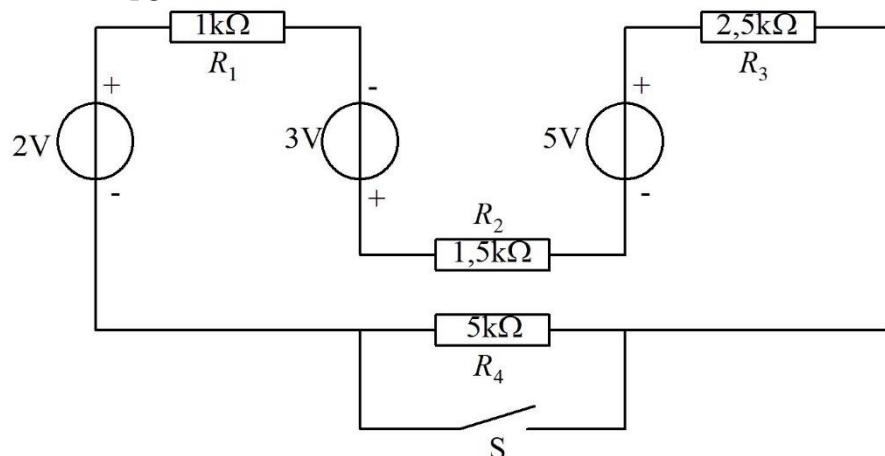


samen een 2x zo grote stroom leveren, is hun capaciteit verdubbeld, in hun geval net als de leverbare hoeveelheid energie.

De capaciteit van een accu zegt dus alleen iets over de leverbare hoeveelheid energie (of arbeid) als ook de spanning bekend is. Immers, $W=Pt$ en $P=UI$, dus $W=UIt$.

3.11 Opgaven

3.11.1 Opgave 3-24



In de figuur zijn de drie spanningsbronnen met de weerstanden R_1 t/m R_3 op te vatten als

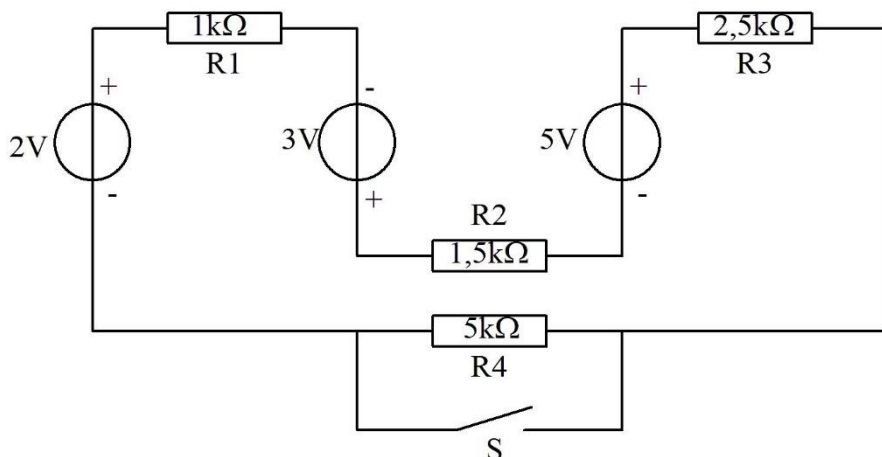
- A. Eén niet-ideale spanningsbron met een EMK van 4V
- B. Eén niet-ideale spanningsbron met een EMK van 10 V en een inwendige weerstand van 5 kΩ
- C. Eén niet-ideale spanningsbron met een EMK van 10 V en een inwendige weerstand van 10 kΩ
- D. Drie in serie geplaatste spanningsbronnen met een totale inwendige weerstand van ongeveer 485 Ω.

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking



3.11.2 Opgave 3-25

In Opgave 3-24 zagen we dat de drie bronnen met weerstanden R_1 t/m R_3 te beschouwen zijn als één niet-ideale spanningsbron met een EMK van 10 V en een inwendige weerstand van 5 k Ω .



Bij geopende schakelaar S (de schakelaar geleidt dan dus niet) en gesloten schakelaar S is de stroom door R_2 ongeveer gelijk aan

- A. 6,7 mA bij S open en 13,4 mA bij S dicht
- B. 2 mA bij S open en 1 mA bij S dicht
- C. 1 mA bij S open en 2 mA bij S dicht
- D. 0,5 mA bij S open en 1 mA bij S dicht

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking

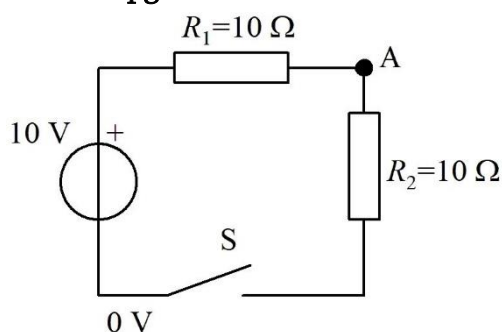


3.11.3 Opgave 3-26

Een batterij heeft een bronspanning van 10 volt en een inwendige weerstand van 1 ohm. De batterij wordt per ongeluk kortgesloten. In de batterij wordt een vermogen gedissipeerd van

- A. 0,1 W
- B. 1 W
- C. 10 W
- D. 100 W

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking

**3.11.4 Opgave 3-27**

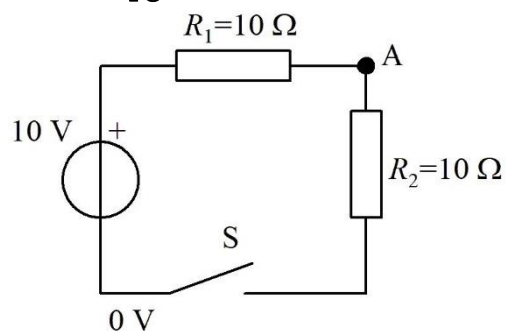
De spanning op punt A bedraagt

- A. 5 V bij geopende schakelaar S
- B. 5 V bij gesloten schakelaar S
- C. 10 V bij gesloten schakelaar S
- D. 0 V bij geopende schakelaar S

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking



3.11.5 Opgave 3-28



In de figuur bij Opgave 3-27 is de dissipatie door R_1

- A. 0 W bij gesloten schakelaar S
- B. 10 W bij gesloten schakelaar S
- C. 10 W bij geopende schakelaar S
- D. 2,5 W bij gesloten schakelaar S

Antwoord gevonden? Naar de uitwerking



3.12 Uitwerkingen van de opgaven

3.12.1 Inleiding

Elke uitwerking staat op een eigen bladzijde. Dat voorkomt dat je ongewild gelijktijdig de uitwerking van een volgende opgave te zien krijgt. Wil je nog een keer terug naar de opgave, dan kun je aan het eind van de uitwerking op deze pijl klikken:



Terug naar de opgave

En deze pijl brengt je naar de volgende opgave als die er is:

Naar de volgende opgave



3.12.2 Uitwerking van Opgave 3-1

Spanning is

- A. Verplaatsing van elektronen
- B. Elektrische lading
- C. Energie
- D. Alleen meetbaar ten opzichte van een ander punt in dezelfde schakeling**

Uitwerking

Hier staat vooral wat spanning niet is. Geen verplaatsing van elektronen, geen lading, geen energie. Blijft over: antwoord D.

Een belangrijke eigenschap van spanning is dat je nooit de spanning van één punt kunt meten. Spanning is potentiaalverschil met een streep onder verschil. Het is altijd de spanning *tussen* twee punten. Soms lees je de term *spanningsverschil*. Eigenlijk is dat onzin, omdat spanning zelf een al verschil is.



Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave





3.12.3 Uitwerking van Opgave 3-2

Stroom is

- A. Verplaatsing van elektrische lading
- B. Elektrische lading
- C. Energie
- D. Alleen meetbaar ten opzichte van een ander punt

Uitwerking

Stroom is geen lading, geen energie en in tegenstelling tot spanning niet meetbaar ten opzichte van een ander punt. Stroom wordt gemeten **in** de geleider en is verplaatsing van elektrische lading. Dat is antwoord A.



Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave





3.12.4 Uitwerking van Opgave 3-3

Lading is

- A. Verplaatsing van elektronen
- B. Positief of negatief**
- C. Energie
- D. Alleen meetbaar ten opzichte van een ander punt

Uitwerking

Lading is een overschot of tekort aan elektronen, geen verplaatsing. Een overschot aan elektronen is een negatieve lading, een tekort positief. Vreemd, maar ontstaan in een tijd waarin men de aard van elektriciteit nog niet goed begreep. Het goede antwoord is dan ook B.



Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave





3.12.5 Uitwerking van Opgave 3-4

Rubber is

- A. Een goede geleider
- B. Een isolator**
- C. Een stof die bij lage temperatuur geleidt
- D. Een stof die bij hoge temperatuur geleidt

Uitwerking

Rubber is een isolator. De stof geleidt niet bij wat voor temperatuur ook. Antwoord B is het juiste antwoord.



Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



3.12.6 Uitwerking van Opgave 3-5

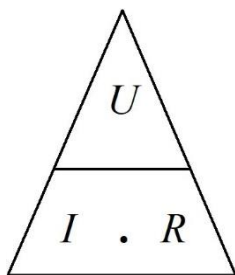
De wet van Ohm luidt:

- A. $I = R/U$
- B. $R = U/I$
- C. $U = I/R$
- D. $R = I \cdot U$

Uitwerking

We kennen de wet van Ohm meestal als $U = IR$. Aan beide kanten van het “=”-teken delen door I levert $U/I = R$. En dat is hetzelfde als $R = U/I$, antwoord B.

Het kan ook zonder rekenwerk met de driehoek van Figuur 3.3-3:



Daaruit blijkt hetzelfde, zoals het hoort (!)



Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



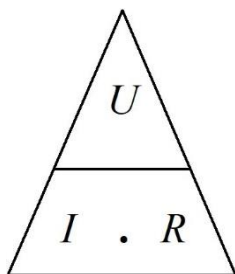
3.12.7 Uitwerking van Opgave 3-6

Over een weerstand van $5\ \Omega$ staat een spanning van 10 V . De stroom door de weerstand bedraagt

- A. 2 A
- B. $0,5\text{ A}$
- C. 50 A
- D. 5 A

Uitwerking

Er staat 10 V over de weerstand van $5\ \Omega$. We hebben dus een spanning $U = 10\text{ V}$ en een weerstand $R_1 = 5\ \Omega$. Gevraagd: de stroom I . Een gevalletje voor de wet van Ohm:



Uit de driehoek blijkt dat $I = U/R$. Invullen van 10 V voor U en $5\ \Omega$ voor R levert 2 A . Dat is antwoord A.



Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



3.12.8 Uitwerking van Opgave 3-7

Over een weerstand van $1\text{ k}\Omega$ staat 10 V . De stroom door de weerstand bedraagt

- A. 10 mA
- B. 10 A
- C. 100 mA
- D. 1 mA

Uitwerking

Ook dit is weer een toepassing van de wet van Ohm. R is $1000\ \Omega$, de spanning 10 V .

$U = IR$ ofwel $10\text{ V} = I \cdot 1000\ \Omega$. Dan is $I = 10/1000\text{ A}$ is 10 mA . Antwoord A.

Opmerking

Als je R uitdrukt in $\text{k}\Omega$ en U in V , dan is de uitkomst in mA . Controleer: 10 V delen door $1\text{ k}\Omega$ levert getalsmatig gezien 10 , met mA erachter kom je op de zojuist berekende uitkomst. Dit handigheidje kan van pas komen, omdat bij opgaven met $\text{k}\Omega$ en spanning in V bijna altijd iets in mA hoort. Ook geldt: als weerstand in $\text{k}\Omega$ en stroom in mA zijn gegeven, kun je meteen volts uitrekenen.



Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



3.12.9 Uitwerking van Opgave 3-8

Door een weerstand van 100Ω loopt een stroom van 100 mA. De spanning over de weerstand bedraagt

- A. 100 V
- B. 1 V
- C. 10 V**
- D. 0,1 V

Uitwerking

We kunnen hier het trucje met $k\Omega$ en mA van de vorige opgave meteen toepassen.
 $100\Omega = 0,1\text{ k}\Omega$.

$0,1\text{ k}\Omega \cdot 100\text{ mA} = 10\text{ V}$. Antwoord C



Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave





3.12.10 Uitwerking van Opgave 3-9

Een stuk koperen installatiedraad heeft een lengte van 10 m en een doorsnede van 2 mm². De soortelijke weerstand van koper is 0,017·10⁻⁶ Ωm. De weerstand van de draad bedraagt

- A. 1,7Ω
- B. 0,034 Ω
- C. **0,085 Ω**
- D. 8,5 Ω

Uitwerking

Voor we met vergelijkingen gaan werken: het kan ook wel met een beetje begrip. Hoe langer een draad is, des te groter is de weerstand. Een twee keer zo lange draad heeft een twee keer zo grote weerstand, Conclusie: om de weerstand van de draad te vinden, moet de soortelijke weerstand in elk geval worden vermenigvuldigd met de lengte. Nu nog de doorsnede.

Hoe groter de doorsnede van een draad, des te gemakkelijker gaat de stroom erdoorheen. Twee keer zo grote doorsnede → twee keer zo kleine weerstand.

Conclusie: je vindt de weerstand van de draad door de soortelijke weerstand te vermenigvuldigen met de lengte en te delen door de doorsnede (niet te verwarren met de diameter!).

Nu is de doorsnede niet in m², maar in mm² gegeven.

1 mm is 10⁻³ m. Dus is 1 mm² gelijk aan 10⁻⁶ m² en is de weerstand van de draad gelijk aan

$$\frac{10 * 0,017 * 10^{-6}}{2 * 10^{-6}} \Omega = 0,085 \Omega$$

En dat is antwoord C. Merk op dat het sterretje * hier als vermenigvuldigteken is gebruikt.



Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



**3.12.11 Uitwerking van Opgave 3-10**

Door een draad loopt gedurende 10 s een stroom van 2 A. De hoeveelheid lading die door de draad is gestroomd, bedraagt

- A. 5 C
- B. 0,2 C
- C. 20 V
- D. 20 C

Uitwerking

1 A is hetzelfde als 1 coulomb per seconde, ander geschreven: 1 Cs^{-1} . Dan is 2 A gelijk aan 2 Cs^{-1} . Als dat 10 seconden doorgaat, heeft zich door de draad $10 * 2 \text{ C} = 20 \text{ C}$ verplaatst.

Dat is antwoord D (en niet antwoord C!)



Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave





3.12.12 Uitwerking van Opgave 3-11

Welke draad heeft de grootste weerstand?

- A. Draad lang 1 m, $\varnothing 1 \text{ mm}^2$
- B. Draad lang 1 m, $\varnothing 0,5 \text{ mm}^2$**
- C. Draad lang 0,5 m, $\varnothing 1 \text{ mm}^2$
- D. Draad lang 0,5 m, $\varnothing 0,5 \text{ mm}^2$

Uitwerking

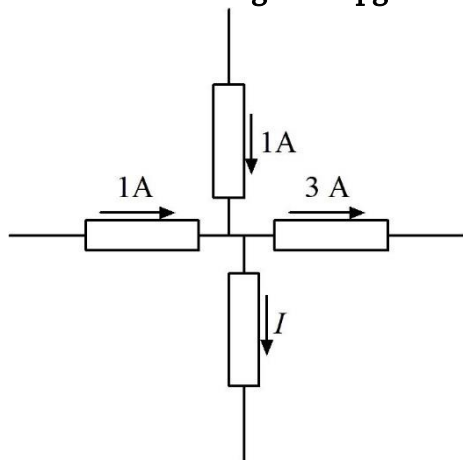
Blijkbaar gaat het om draad van eenzelfde materiaal, want over het materiaal en zijn eigenschappen wordt niets gezegd.

We moeten blijkbaar uitgaan van de afmetingen. Het teken $\varnothing$ staat voor doorsnede. Zoek de combinatie van langste draad en de kleinste doorsnede. Dat is die van antwoord B.



Terug naar de opgave

3.12.13 Uitwerking van Opgave 3-12



De stroom I

- A. Bedraagt 1A en de pijl voor de stroomrichting staat de juiste kant op
- B. Bedraagt 1A en de pijl voor de stroomrichting staat de verkeerde kant op**
- C. Bedraagt 2A en de pijl voor de stroomrichting staat de juiste kant op
- D. Bedraagt 2A en de pijl voor de stroomrichting staat de verkeerde kant op

Uitwerking

Op het knooppunt komt 1A van links en van boven binnen. Er gaat naar rechts 3A uit. Er is een “tekort” van 1A. Dat moet volgens Kirchhoff van onderen worden aangevuld. Er moet daarom van beneden naar boven 1 A naar het knooppunt toe lopen, maar de pijl staat de andere kant op. Dat betekent dat antwoord B goed is.

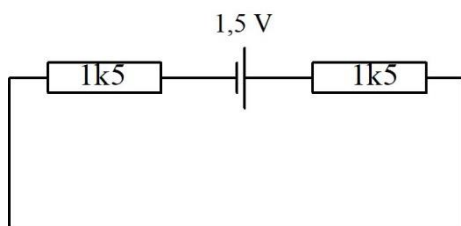


Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



3.12.14 Uitwerking van Opgave 3-13



De spanning over elke weerstand bedraagt

- A. 0,75V
- B. 1,5V
- C. 0,5V
- D. 2V

Uitwerking

De weerstanden zijn gelijk en er loopt dezelfde stroom door. Dan moet de spanning over beide weerstanden dezelfde zijn. De batterij levert 1,5 V. Volgens de tweede wet van Kirchhoff moeten de spanningen over de weerstanden samen 1,5 V zijn. Conclusie: dan is over elke weerstand de spanning de helft van 1,5 V is 0,75 V. Antwoord A.

Opmerking

We hebben ons niet bekommerd om de polariteit van de spanning, maar dat is bij dit soort opgaven pas nodig als er meerdere spanningsbronnen zijn die niet allemaal in dezelfde richting zijn aangesloten.

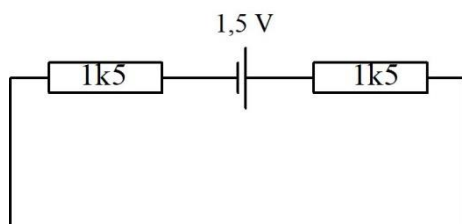


Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



3.12.15 Uitwerking van Opgave 3-14



De stroomsterkte in dit schema bedraagt

- A. 1 mA per weerstand
- B. 0,5 mA**
- C. 2 mA
- D. 1A

Uitwerking

De beide weerstanden van $1,5\text{ k}\Omega$ staan in serie. Door beide weerstanden loopt dezelfde stroom. Om te stroomsterkte te berekenen, is de vervangingsweerstand van de twee weerstanden nodig. Die is de som van beide weerstanden, dus $1,5\text{ k}\Omega + 1,5\text{ k}\Omega = 3\text{ k}\Omega$. $1,5\text{ V}$ over $3\text{ k}\Omega$ of over 3 k , zoals sommigen zeggen, betekent $0,5\text{ mA}$. Dat is antwoord B.

Opmerking

Ook hier is bij gebruik van volts en kilo-ohms het resultaat milli-ampères, zonder dat er iets hoeft te worden omgerekend.

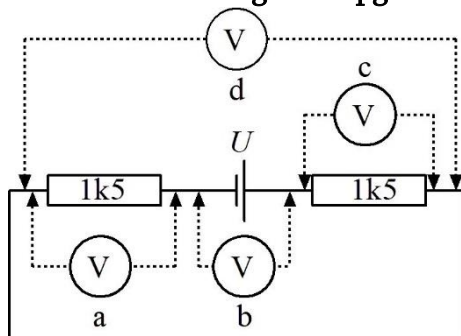


Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



3.12.16 Uitwerking van Opgave 3-15



De juiste meterpositie om de hoogste spanning in de hele kring te meten is

- A. a
- B. b
- C. c
- D. d

Uitwerking

De hoogste spanning in de kring is tussen de polen van de batterij, zoals altijd, wanneer er maar één spanningsbron in het spel is. Dat betekent dat voltmeter b de hoogste spanning meet. Dat is antwoord B.

Opmerking

Voltmeter d meet 0 V, omdat beide aansluitingen halverwege de stroomkring zitten. Ten opzichte van de minpool van de batterij staan ze wel allebei op de halve batterijspanning, maar dan zou één van de meteraansluitingen naar de minpool van de batterij moeten lopen. Hetzelfde geldt voor de pluspool.

Ook de meters a en c geven de halve batterijspanning.



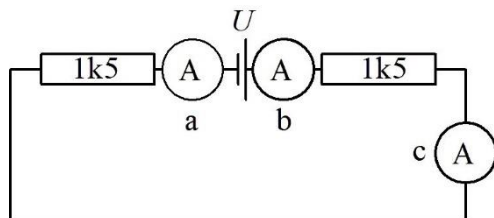
Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



3.12.17 Uitwerking van Opgave 3-16

Welke meterpositie is het meest geschikt om de stroom door de kring te meten



- A. a
- B. b
- C. c
- D. a, b en c

Uitwerking

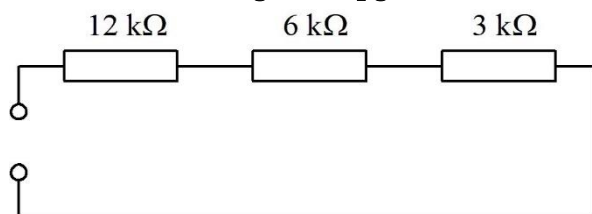
In het schema is er één stroomkring zonder vertakkingen. Gevolg daarvan is dat overal dezelfde stroom loopt. Dan maakt het niet uit, op welke plaats in de kring de stroom wordt gemeten. Antwoord D is daarom het goede antwoord.



Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



3.12.18 Uitwerking van Opgave 3-17

De vervangingsweerstand is

- A. 6 kΩ
- B. 15 kΩ
- C. **21 kΩ**
- D. 1700 Ω

Uitwerking

Bij serieschakeling van weerstanden, zoals hier, is de vervangingsweerstand de som van de weerstanden. De vervangingswaarde **is dus altijd groter dan de grootste weerstand**. Daarmee vallen de antwoorden A en D zonder enig rekenwerk al af.

Optellen van de weerstandswaarden in het schema levert $(12+6+3) \text{ k}\Omega = 21 \text{ k}\Omega$.

Antwoord C.

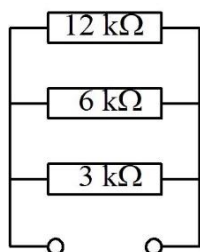


Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



3.12.19 Uitwerking van Opgave 3-18



De vervangingsweerstand is ongeveer

- A. 6 kΩ
- B. 15 kΩ
- C. 21 kΩ
- D. 1700 Ω

Uitwerking

De vervangingsweerstand R_{tot} van drie parallel geschakelde weerstanden bereken je met

$$\frac{1}{R_{\text{tot}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

Dat betekent dat R_{tot} altijd kleiner is dan de kleinste afzonderlijke weerstand van de schakeling. Dat is ook te beredeneren: de meeste stroom gaat door de kleinste weerstand, maar er is altijd nog stroom die via de andere parallelle weerstand(en) loopt. Dan moet het geheel een kleinere weerstand hebben dan de kleinste weerstand.

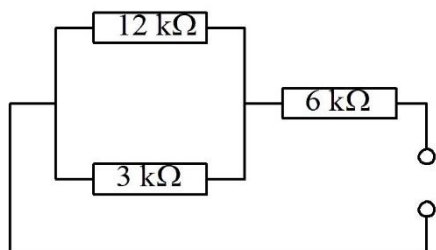
De kleinste weerstand in de schakeling is 3 kΩ. In het rijtje antwoorden staat maar één weerstand die kleiner is, die van 1700 Ω = 1,7 kΩ (antwoord D). Die moet het dus zijn. Ter controle rekenen we hem uit met de vergelijking. We doen het in kΩ.

$$\frac{1}{R_{\text{tot}}} = \frac{1}{12 \text{ k}\Omega} + \frac{1}{6 \text{ k}\Omega} + \frac{1}{3 \text{ k}\Omega} = \frac{1}{12 \text{ k}\Omega} + \frac{2}{12 \text{ k}\Omega} + \frac{4}{12 \text{ k}\Omega} = \frac{7}{12 \text{ k}\Omega}$$

Dan is $R_{\text{tot}} = 12/7 \text{ k}\Omega \approx 1,71 \text{ k}\Omega$. Afgerond is dat 1,7 kΩ. Antwoord D is dus goed, want in de opgave staat het woordje 'ongeveer'.

[Terug naar de opgave](#)[Naar de volgende opgave](#)

3.12.20 Uitwerking van Opgave 3-19



De vervangingsweerstand is ongeveer

- A. 21 kΩ
- B. 15 kΩ
- C. **8,4 kΩ**
- D. 4,8 kΩ

Uitwerking

Dit is een parallelschakeling in serie met een derde weerstand. We beginnen met de stelregel voor serieschakeling: de uitkomst is groter dan de grootste weerstand. Dan moet de vervangingsweerstand in elk geval groter zijn dan 6 kΩ. Daarmee valt antwoord D af. De vervangingsweerstand van het parallelle deel moet kleiner zijn dan de kleinste, dus minder dan 3 kΩ. Dan moet de vervangingswaarde voor de hele schakeling kleiner zijn dan 9 kΩ. Dat kan alleen nog antwoord C zijn. Deze kan dus zonder rekenen!

Nu met rekenwerk: 3 kΩ parallel aan 12 kΩ is $3 * 12 / (3 + 12) \text{ k}\Omega = 36 / 15 \text{ k}\Omega = 2,4 \text{ k}\Omega$.

6 kΩ + 2,4 kΩ = 8,4 kΩ. Inderdaad antwoord C.

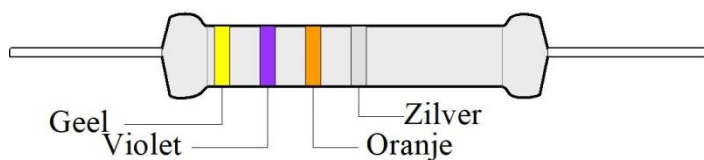


Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



3.12.21 Uitwerking van Opgave 3-20



Waarde en tolerantie van de afgebeelde weerstand zijn

- A. 47000 Ω , 5%
- B. 74 k Ω , 10%
- C. 4,7 k Ω , 10%
- D. 47 k Ω , 10%

Uitwerking

We lezen de ringen van links naar rechts:

Geel is 4. Violet is 7. Oranje is drie nullen. 47000 Ω = 47 k Ω . De zilveren ring betekent een tolerantie van 10%. Antwoord D dus.



Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



3.12.22 Uitwerking van Opgave 3-21

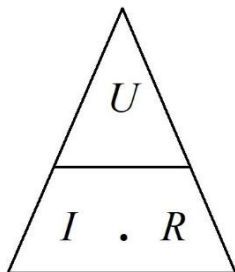
Een lampje wordt gevoed uit een batterij van 4,5 V. Het verbruikt 0,1 A. De weerstand van het lampje bedraagt ongeveer

- A. 0,022 Ω
- B. 45 Ω**
- C. 4,5 Ω
- D. 0,45 Ω

Uitwerking

We hebben te maken met een spanning van 4,5 V die belast is met een weerstand R (in dit geval een lamp) waar 0,1 A doorheen loopt. Gevraagd: de weerstand.

We pakken er de wet van Ohm bij met de bijbehorende driehoek



Die toont dat $R = U/I$. Dat is 4,5 V / 0,1 A = 45 Ω . Antwoord B.

Voor wie liever de vergelijking $U = IR$ hanteert: deel aan beide kanten van het = teken door I , draai de vergelijking om en je vindt $R = U/I$.



Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



3.12.23 Uitwerking van Opgave 3-22

Een apparaat moet worden gevoed met een spanning van 6 V en gebruikt 0,1 A. Er is alleen een spanning van 10 V beschikbaar bij ruim voldoende stroom. Om de spanning omlaag te brengen naar 6 V wordt een weerstand tussen spanningsbron en apparaat opgenomen. Die weerstand moet een waarde hebben van

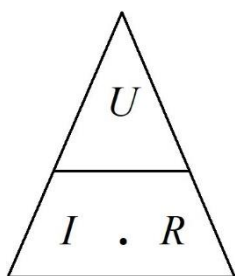
- A. $40\ \Omega$
- B. $0,25\ \Omega$
- C. $0,4\ \Omega$
- D. $25\ \Omega$

Uitwerking

Om 6 V voor het apparaat te krijgen, moet de spanning van 10 V met 4 V omlaag. Als het verbruik 0,1 A is, moet in de schakeling een serieweerstand worden opgenomen die bij een stroom van 0,1 A de spanning 4 V omlaag brengt.

Dat brengt de vraag terug tot: “Bij welke weerstandswaarde combineer je 4 V met 1 mA?”

We halen de driehoek van Ohm weer tevoorschijn. Die geeft $R = U/I$.



Dus $R = 4\text{ V} / 0,1\text{ A} = 40\ \Omega$. Antwoord A.

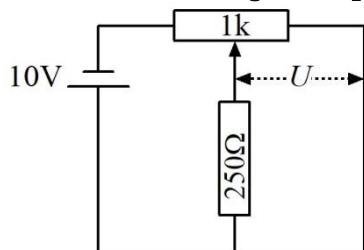


Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



3.12.24 Uitwerking van Opgave 3-23

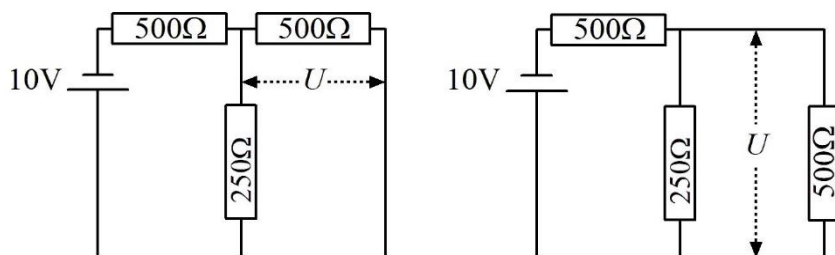


Het schuifcontact van de potentiometer staat precies in het midden van de weerstandsbaan. De weerstandsbaan in de potentiometer is overal even dik en breed en bestaat overal uit hetzelfde materiaal. De spanning U bedraagt

- A. 10 V
- B. 5 V
- C. 2,5 V
- D. 2 V

Uitwerking

De potentiometer vertegenwoordigt in dit geval twee weerstanden van $500\ \Omega$ in serie met de $250\ \Omega$ op de aftakking volgens de figuur hieronder.



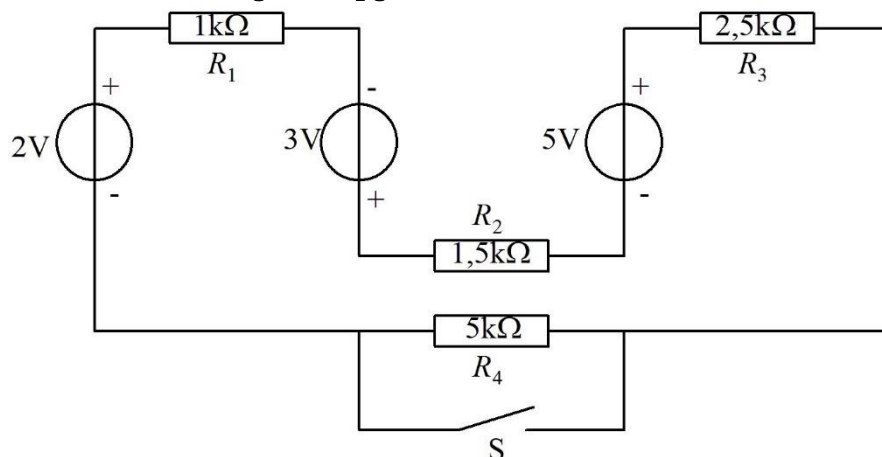
We doen hier hetzelfde als in Figuur 3.8-14. Op het linker plaatje is de potentiometer gesplitst en rechts is de rechterweerstand in het schema anders getekend. Elektrisch is er niets veranderd. We hebben nu een batterij van 10 V, een spanningsdeler van 2 stuks $500\ \Omega$ en een belasting van $250\ \Omega$ op het knooppunt.

Zonder de weerstand van $250\ \Omega$ zou op de aftakking van de potmeter 5 V staan. Op het aftakpunt “ziet” de weerstand van $250\ \Omega$ de twee weerstanden van $500\ \Omega$ parallel. Dat is $250\ \Omega$, maar met een spanning erachter van 5 V. Dan hebben we twee weerstanden van $250\ \Omega$ in serie met op het knooppunt de helft van 5 V is 2,5 V. Antwoord C.



Terug naar de opgave

3.12.25 Uitwerking van Opgave 3-24



In de figuur zijn de drie spanningsbronnen met de weerstanden R_1 t/m R_3 op te vatten als

- A. Eén niet-ideale spanningsbron met een EMK van 4V
- B. Eén niet-ideale spanningsbron met een EMK van 10 V en een inwendige weerstand van 5 kΩ
- C. Eén niet-ideale spanningsbron met een EMK van 10 V en een inwendige weerstand van 10 kΩ
- D. Drie in serie geplaatste spanningsbronnen met een totale inwendige weerstand van ongeveer 485 Ω.

Uitwerking

De EMK is $2\text{ V} + 3\text{ V} + 5\text{ V} = 10\text{ V}$. De inwendige weerstand is de vervangende weerstand van R_1 t/m R_3 in serie. Dat is $1\text{ kΩ} + 1,5\text{ kΩ} + 2,5\text{ kΩ} = 5\text{ kΩ}$. Dat is antwoord B.



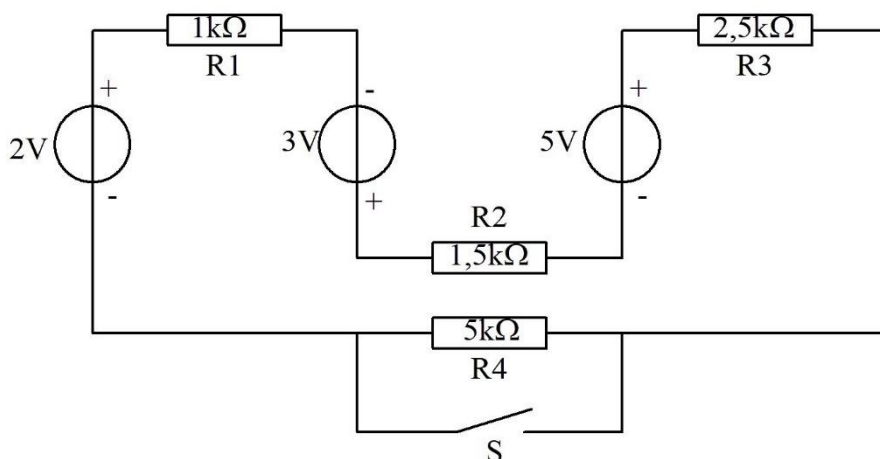
Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



3.12.26 Uitwerking van Opgave 3-25

In Opgave 3-24 zagen we dat de drie bronnen met weerstanden R_1 t/m R_3 te beschouwen zijn als één niet-ideale spanningsbron met een EMK van 10 V en een inwendige weerstand van 5 k Ω .



Bij geopende schakelaar S (de schakelaar geleidt dan dus niet) en gesloten schakelaar S is de stroom door R_2 ongeveer gelijk aan

- A. 6,7 mA bij S open en 13,4 mA bij S dicht
- B. 2 mA bij S open en 1 mA bij S dicht
- C. 1 mA bij S open en 2 mA bij S dicht**
- D. 0,5 mA bij S open en 1 mA bij S dicht

Uitwerking

Bij geopende schakelaar S staat de inwendige weerstand van 5 k Ω in serie met R_4 die ook 5 k Ω is. Samen vertegenwoordigen ze 10 k Ω . 10 V over 10 k Ω betekent 1 mA.

Als S gesloten is, doet R_4 niet meer mee. De totale weerstand is dan 5 k Ω , de bronspanning nog steeds 10 V en de stroom dus 2 mA.

Antwoord C.



Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



3.12.27 Uitwerking van Opgave 3-26

Een batterij heeft een bronspanning van 10 volt en een inwendige weerstand van 1 ohm. De batterij wordt per ongeluk kortgesloten. In de batterij wordt een vermogen gedissipeerd van

- A. 0,1 W
- B. 1 W
- C. 10 W
- D. 100 W

Uitwerking

Bij kortsluiting is de uitwendige weerstand praktisch 0. De enige weerstand is dan de inwendige weerstand R_i . De dissipatie P bereken je dan volgens

$$P = \frac{U^2}{R_i}$$

U bedraagt 10 V, R_i 1 Ω . Dan is

$$P = \frac{100}{1} \text{ W} = 100 \text{ W}$$

Antwoord D.

Opmerking

De uitkomst geeft aan, wat er kan gebeuren als je een batterij kortsluit. Op zijn best hete vingers en op zijn slechtst een bijtende vloeistof uit de batterij, brand of een explosie.

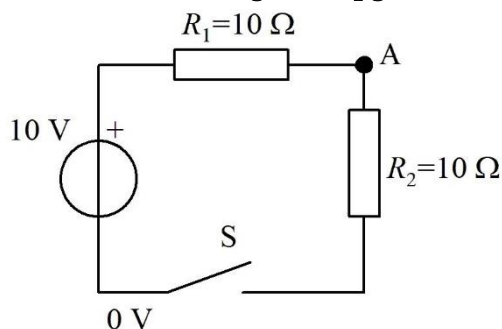


Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



3.12.28 Uitwerking van Opgave 3-27



De spanning op punt A bedraagt

- A. 5 V bij geopende schakelaar S
- B. 5 V bij gesloten schakelaar S**
- C. 10 V bij gesloten schakelaar S
- D. 0 V bij geopende schakelaar S

Uitwerking

Hier wordt eigenlijk iets gevraagd over twee schakelingen, één met S open en één met S gesloten.

Als S open is, is er geen stroom en is de spanning op punt A 10 V. Bij de antwoorden staat er één met 10 V (antwoord C), maar met gesloten in plaats van geopende schakelaar S.

We kijken naar de schakeling met gesloten schakelaar. Dan vormen R_1 en R_2 een spanningsdeler met gelijke weerstanden, beide 10 kΩ. Dan is de spanning op punt A de helft van de bronspanning, 5 V. Dat betekent antwoord B.

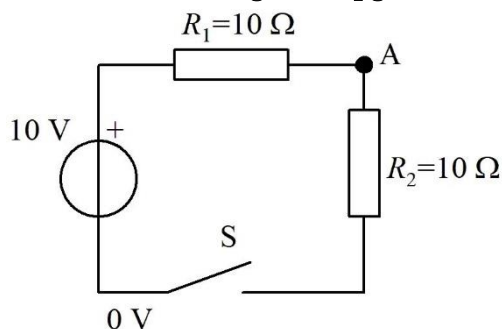


Terug naar de opgave

Naar de volgende opgave



3.12.29 Uitwerking van Opgave 3-28



In de figuur bij Opgave 3-27 is de dissipatie door R_1

- A. 0 W bij gesloten schakelaar S
- B. 10 W bij gesloten schakelaar S
- C. 10 W bij geopende schakelaar S
- D. 2,5 W bij gesloten schakelaar S

Uitwerking

Zonder enig rekenwerk kunnen we vaststellen dat er bij geopende schakelaar geen stroom kan lopen en er dus ook geen dissipatie kan zijn. Daarmee kan antwoord C naar de prullenmand.

Bij gesloten schakelaar hebben we twee manieren van oplossen. De eerste is: bereken de stroom door de schakeling en bereken daaruit en uit de weerstand van R_1 de dissipatie. R_1 en R_2 staan in serie en vormen samen een weerstand van $20\ \Omega$.

Dan is $I = \frac{U}{(R_1 + R_2)} = \frac{10\text{ V}}{20\ \Omega} = 0,5\text{ A}$. De dissipatie in R_1 is dan gelijk aan $I^2 R_1 = 0,25 * 10\text{ W} = 2,5\text{ W}$. Antwoord D.

Nu de tweede manier van oplossen. $R_1 = R_2$ en vormen een spanningsdeler. Op hun knooppunt A staat dan de halve bronspanning, 5 V dus. Over R_1 staat dan $10\text{ V} - 5\text{ V} = 5\text{ V}$. De dissipatie P in R_1 is dan $\frac{5\text{ V} * 5\text{ V}}{10\ \Omega} = \frac{25\text{ W}}{10} = 2,5\text{ W}$. En ook dat is antwoord D.



Terug naar de opgave