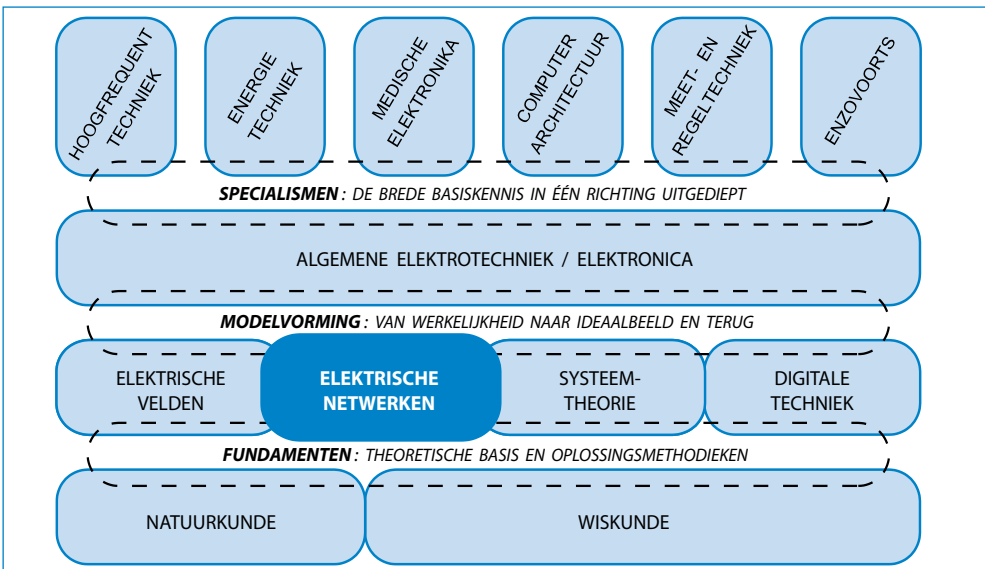


Deel I

De basis

“Elektrotechniek is geen exact vak”, wordt wel eens beweerd. Daar zit een kern van waarheid in, als wij kijken naar het brede algemene terrein van elektrotechniek en elektronica. In die ‘echte’ wereld werken wij graag met inzicht, vuistregels en meer of minder goede benaderingen; waarom moeilijk doen, als de gebruikte onderdelen een tolerantie hebben van $\pm 10\%$ of meer?!

Die ‘inexacte’ wereld stoelt echter op een harde, exacte ondergrond: natuurkunde en wiskunde. De brug tussen deze twee werelden wordt gevormd door vakken als elektrische velden, netwerken, systeemtheorie en digitale techniek. Aan de theoretische kant sluiten deze vakken aan bij wiskunde en natuurkunde; aan de praktische kant ligt de link tussen de vereenvoudigde, ideale modellen en de werkelijkheid.



De plaats van Elektrische Netwerken binnen de elektrotechniek.

Zo zijn de ideale poorten bij digitale techniek, bijvoorbeeld, te beschrijven op basis van logische functies; anderzijds zijn zij te zien als vereenvoudigde modellen van echte IC's met vertragingstijden, storingsmarges en eindige flanksteilheden.

Velden, Netwerken en Systeemtheorie bestrijken een breed gebied: van ladingen, elektrische en magnetische velden en EMC-problematiek (onder andere bij Velden),

via spanningen en stromen, discrete ideale componenten en daaruit samengestelde deelschakelingen (Netwerken) tot het gedrag van 'Black box'-systemen, al dan niet teruggekoppeld (Systeemtheorie, of Regeltechniek).

Binnen dit geheel kunnen wij Elektrische netwerken nu globaal positioneren. Enerzijds sluit dit vak aan op de wiskundige en natuurkundige basis: het verwijst naar de fundamentele wetten, bewijsvoeringen en oplossingsmethoden die binnen die vakken behandeld worden. De theorie wordt dankbaar binnengehaald en gebruikt, maar wij hoeven geen wijdlopende excursies over de grens te maken.

Anderzijds is er de aansluiting met de 'echte' wereld van de elektrotechniek. Het vertalen van die werkelijkheid naar het netwerkmodel, en terug, maakt essentieel deel uit van het vak Netwerken. Ook hier geldt: kleine uitstapjes over de grens kunnen heel illustratief zijn, maar dan wel als toerist.

Ook tussen Elektrische netwerken en de twee aangrenzende vakken zijn globale grenslijnen aan te geven. 'Elektrische lading' bij een condensator en 'magnetische flux' bij een spoel horen thuis bij Velden; het verband tussen spanning en stroom bij de bijbehorende ideale modellen hoort bij Netwerken. Anderzijds: het verband tussen spanningen en stromen bij een tweepoort, opgevat als 'Black box', past nog binnen Netwerken; als wij naar de bijbehorende 'signaaloverdracht' kijken komen wij op het terrein van Systeemtheorie.

Nu wij ons werkkerrein globaal afgebakend hebben, kunnen wij besluiten hoe dat terrein verkend moet worden.

Dit boek is bedoeld voor het hbo: Hoger Beroeps Onderwijs. Op die basis is een aantal keuzes gemaakt. Het accent ligt steeds op de praktische toepasbaarheid van het vak, als gereedschap: modelvorming, aansluiting bij de praktijk, probleemaanpak en technisch inzicht krijgen beduidend meer aandacht dan formele theoretische bewijsvoering.

Desondanks moeten wij de formele, theoretische aspecten niet onderschatten.

In het eerste hoofdstuk beginnen wij helemaal vooraan, bij spanningen en stromen en de wet van Ohm. "Middelbare-schoolstof," denken veel studenten, "dat heb ik allemaal al gehad". Tot op zekere hoogte klopt dat: weerstanden en batterijtjes zijn al aan de orde geweest. Wij zullen echter ook spanningsbronnen en stroombronnen invoeren, ideale modellen, en dat blijkt toch even iets anders. De ervaring leert dat veel studenten bij hoofdstuk 3 in de problemen komen; problemen die zijn terug te voeren op onvoldoende beheersing van de basistheorie die behandeld is in de eerste twee hoofdstukken.

Vervolgens bespreken wij energie en vermogen (Hoofdstuk 4) en de basisbegrippen en definities voor wisselspanningen en wisselstromen (Hoofdstuk 5). Op basis van deze kennis kunnen wij in Hoofdstukken 6 en 7 twee nieuwe netwerkelementen bespreken, de spoel en condensator. Hierbij gaat het ons, zoals hierboven gezegd, om het verband tussen spanning en stroom bij onze ideale netwerkmodellen.

Dit alles zal in Deel II verder uitgediept worden, en in Hoofdstuk 8 blikken we daar kort op vooruit.

Hoofdstuk 1

Basisbegrippen en basiswetten

- Spanning en stroom
- De wetten van Kirchhoff
- Weerstand; wet van Ohm
- Netwerkschema als model

1.1 Elektrische spanning en stroom

Binnen het vak Elektrische netwerken houden wij ons uitsluitend bezig met de *verbanden* tussen spanningen en stromen. Wat spanningen en stromen zijn en waarom er bepaalde relaties optreden, hoort thuis bij het vak velden.

Een spanning (of ‘potentiaalverschil’) staat tussen twee punten. Als er tussen deze twee punten een geleidende verbinding is, dan loopt een stroom door deze geleider. De waarschuwing: “Pas op! Daar staat stroom op!” is dus technisch onzinnig.

De woorden stroom en spanning hebben in het dagelijks leven ongeveer dezelfde betekenis. Denk maar eens aan een situatie met twee naburige voetbalvelden. Op het ene veld speelt Nueneen tegen Son een vriendschappelijke wedstrijd; op veld B gaat het tussen PSV en Ajax om het kampioenschap. De *spanning* bij de tweede wedstrijd zal groter zijn, waardoor een flinke *stroom* publiek van veld A naar veld B zal stromen.

Als wij het heel zuiver bekijken, is het elektrische begrip ‘spanning’ net iets anders gedefinieerd. Zoals boven gezegd: spanning staat tussen twee punten – en niet ‘op een punt’. Op een punt staat een elektrisch ‘potentiaal’, en het verschil tussen de potentialen op twee punten (het *potentiaalverschil*) is de elektrische spanning.

Toch zeggen wij vaak, enigszins slordig, “op dat punt in het schema staat 50 volt”. Wij bedoelen dan eigenlijk “tussen dat punt en het 0 volt referentiepunt”, of ook wel “ten opzichte van massa”. In schema’s hoort immers een 0 volt referentie aangegeven te zijn, ‘massa’ voor de betreffende schakeling. Deze lokale massa is lang niet altijd gelijk aan ‘aardpotentiaal’, zeg maar de grond onder onze voeten. In de praktijk is dit vaak een belangrijk onderscheid.

De ‘nul’ van het elektriciteitsnet is meestal ongeveer gelijk aan ‘aardpotentiaal’, vandaar dat wij een flinke schok krijgen als wij slechts één draad aanraken: wij vormen dan een geleidende verbinding tussen die draad en ‘aarde’. Op hoogspanningsleidingen ‘staat’ een spanning van duizenden volt, maar toch kan een vogeltje daar rustig op zitten – mits hij maar niet met zijn andere pootje op de grond komt.

1.2 Polariteit en stroomrichting

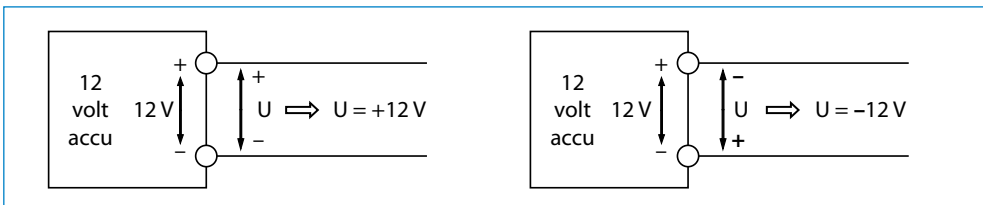
Een spanning staat tussen twee punten, en veroorzaakt een stroom tussen die punten als er een geleidende verbinding is. Aangezien de stroom van het ene naar het andere punt gaat, is niet alleen de grootte maar ook de richting van belang. Die stroomrichting wordt ook bepaald door de spanning: de stroom loopt van het punt met het hoogste potentiaal naar het punt met het laagste potentiaal.

Om dit alles eenduidig in een schema aan te kunnen geven, zijn bepaalde tekenafspraken gemaakt. In beide betekenissen van het woord: er zijn afspraken ten aanzien van de plus- en mintekens, en ten aanzien van de aanduidingen in een netwerkschema, de tekenwijze.

Voor spanning

Voor elektrische spanning (potentiaalverschil) gebruiken we het lettersymbool U ; de grootte wordt uitgedrukt in volt (V). Het punt met het hogere potentiaal krijgt een plusteken, het andere punt een minteken. Dit noemen we de *polariteit* van de spanning. Voor de duidelijkheid kan daarbij een dubbele pijl staan, om aan te geven tussen welke punten de spanning staat.

Let op: ook van een (nog) onbekende spanning U kan de *referentiepolariteit* aangegeven worden. Mocht later blijken dat de 'echte' spanning net andersom staat dan krijgt 'U' een minteken, bijvoorbeeld ' $U = -12 \text{ V}$ ' :

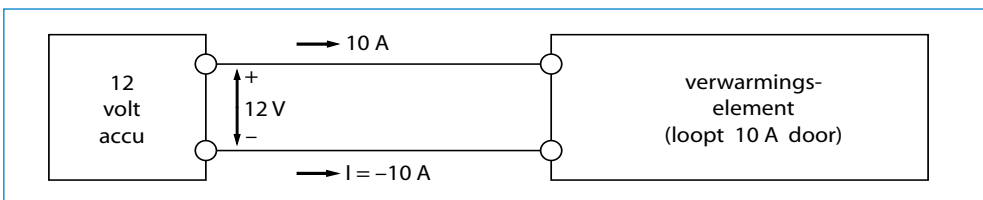


Figuur 1.1 De polariteit van een spanning wordt aangegeven met + en – tekens.

Voor stroom

Voor stroom gebruiken we de letter I ; de grootte wordt uitgedrukt in ampère (A). De *referentierichting* van de stroom wordt aangeduid met een enkele pijl.

Let op: als de 'echte' stroom tegen de gekozen referentierichting van de stroom ' I ' (zoals aangegeven met deze pijl) in blijkt te lopen, dan krijgt I een minteken:



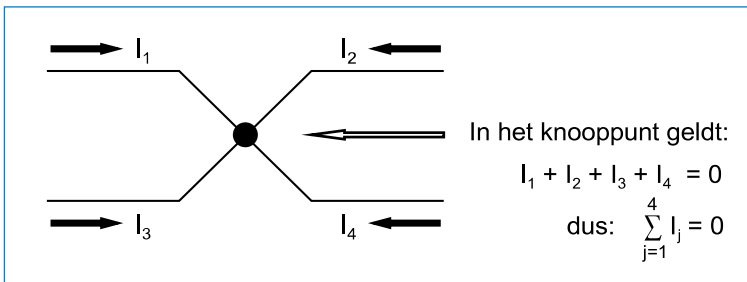
Figuur 1.2 Stroomrichting wordt aangegeven met een pijl.

1.3 De wetten van Kirchhoff

De wetten van Kirchhoff zijn twee fundamentele natuurkundige wetten: de stroomwet en de spanningswet. Deze staan aan de basis van de hele elektrotechniek; ze moeten dus 'vanzelfsprekend' zijn!

De **stroomwet** zegt dat bij een knooppunt (elk punt waar meerdere geleiders met elkaar verbonden zijn) de som van alle stromen naar (of: van) het knooppunt nul is.

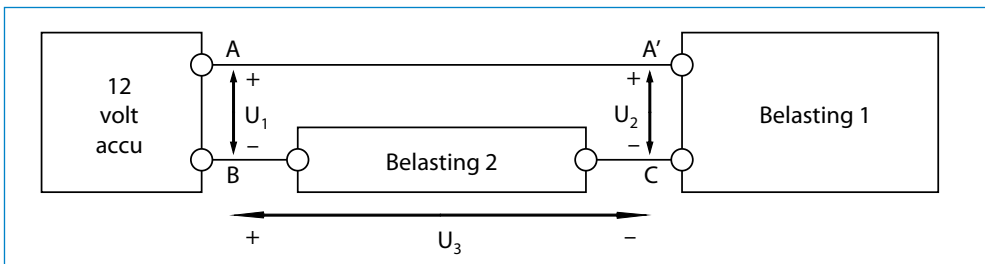
Anders gezegd: de totale stroom die naar een knooppunt toevloeit is gelijk aan de totale stroom die er van wegvloeit. Er verdwijnt dus geen lading in een knooppunt, en er wordt geen lading toegevoegd.



Figuur 1.3 De stroomwet van Kirchhoff.
Stel $I_1 = I_2 = I_3 = 5 \text{ A}$. Uit de stroomwet volgt in dat geval: $I_4 = -15 \text{ A}$. Let op het minteken!

De **spanningswet** zegt dat voor een gesloten kring in een elektrische schakeling, de som van de spanningen nul is.

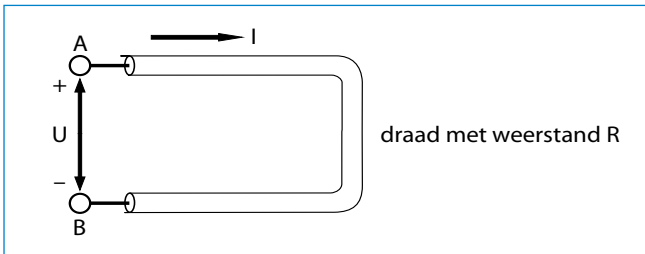
Anders gezegd: begin op een willekeurig punt in de kring, en tel van daaruit alle spanningen op (met inachtneming van de tekens!). Bij het beginpunt teruggekomen, moet het resultaat 0 V zijn. Zo'n gesloten kring noemen we voortaan een 'maas'.



Figuur 1.4 De spanningswet van Kirchhoff.
Als wij de kring volgen vanuit B, via A, A' en C terug naar B, dan geldt: $U_1 - U_2 + U_3 = 0$.
Stel $U_2 = 6 \text{ V}$, dan wordt dit: $+12 - 6 + U_3 = 0$. In dit geval is U_3 dus -6 V . Let op het minteken!

1.4 De wet van Ohm

Eerder is al gezegd: een spanning staat tussen twee punten, en veroorzaakt een stroom tussen die punten als er een geleidende verbinding is. Zolang de spanning constant blijft, zal de stroom ook niet veranderen.



Figuur 1.5 Een constante spanning U , tussen punten A en B, veroorzaakt een constante stroom I door een draad met weerstand R .

Als de spanning verdubbeld wordt, zal de stroom ook twee keer zo groot worden. De verhouding tussen spanning en stroom heeft voor dat stuk draad een constante waarde. Deze waarde is de weerstand 'R' van de draad, uitgedrukt in ohm (Ω):

$$\frac{U}{I} = R \quad \text{of, anders geschreven:} \quad U = I \times R$$

Dit is de **wet van Ohm**:

De verhouding tussen de spanning over een ideale weerstand en de stroom die er doorheen loopt is constant; deze evenredigheidsfactor R noemen wij de elektrische weerstand van het materiaal.

Feitelijk is dit geen 'wet' maar een definitieformule: het is de definitie van een volkomen ideale, lineaire weerstand – een van de ideale componenten die wij binnen het vak Netwerken kennen. Hier komen wij in de volgende paragraaf op terug.

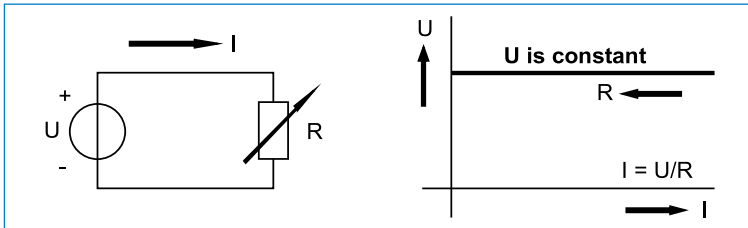
Van deze ideale weerstanden is de waarde R constant, onafhankelijk van stroom en spanning. In de praktijk is dat lang niet altijd het geval. Een weerstand kan bijvoorbeeld spanningsafhankelijk zijn (gloeilampen!); toch spreken wij dan, punt voor punt, over 'de weerstand van de lamp' – en daarmee bedoelen wij toch weer de verhouding tussen spanning over en stroom door die lamp. Ook spreken wij van de 'ingangsweerstand' van een schakeling; daarmee bedoelen wij de verhouding tussen de ingangsspanning U_{in} en de ingangsstroom I_{in} , dus $R_{in} = U_{in} / I_{in}$.

1.5 Ideale componenten

Theoretisch rekenen wij met ideale componenten, die altijd precies doen wat wij afspreken: zij bepalen een vast verband tussen spanning en stroom, uit te drukken in formulevorm. *Praktisch* werken wij met echte componenten, die gelukkig meestal op te vatten zijn als samenstellingen van ideale netwerkcomponenten.

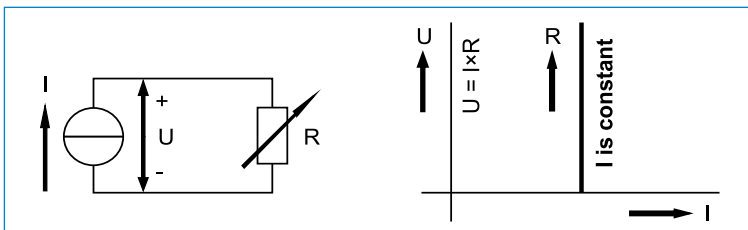
Voorlopig beperken wij ons tot drie ideale componenten: de spanningsbron, de stroombron en de weerstand.

Een **ideale spanningsbron** bepaalt de spanning tussen twee punten, onafhankelijk van de te leveren stroom, $U = \text{constant}$ (ongeacht I):



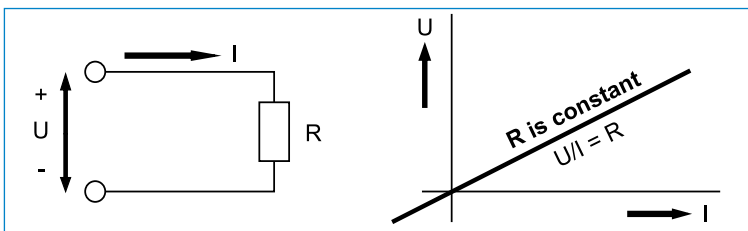
Figuur 1.6 De definitie van een ideale gelijkspanningsbron: U is constant (en de stroom volgt uit $I = U/R$).

Een **ideale stroombron** bepaalt de stroom door een geleider, onafhankelijk van de optredende spanning, $I = \text{constant}$ (ongeacht U):



Figuur 1.7 De definitie van een ideale gelijkstroombron: $I = \text{constant}$ (en de spanning volgt uit $U = I \times R$).

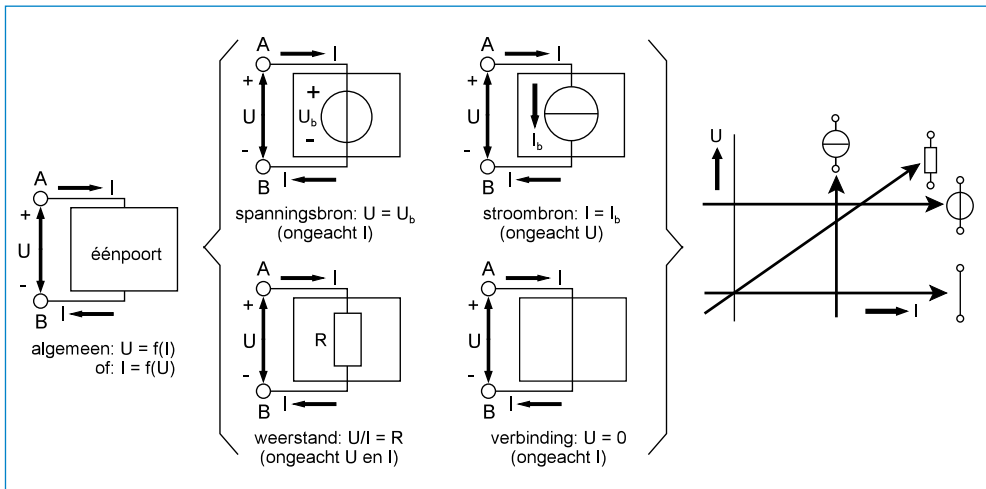
Een **ideale weerstand** bepaalt de verhouding tussen spanning en stroom, onafhankelijk van die spanning en stroom, exact volgens de wet van Ohm:



Figuur 1.8 De definitie van een weerstand: de verhouding tussen de spanning U over de weerstand en stroom I door de weerstand is constant ($U/I = R$).

Ook verbindingen veronderstellen wij ideaal. Alle lijntjes zijn dus op te vatten als 'weerstand van 0Ω ': er is geen spanningsverschil tussen de uiteinden, ongeacht de stroom die er doorheen vloeit. Bij een ideale 'open verbinding' geldt het omgekeerde: er loopt geen stroom, ongeacht de spanning die er overheen staat.

Wij kunnen deze definities ook op een andere manier samenvatten. Eerder is al gesteld: 'het verband tussen spanning en stroom bij de ideale modellen hoort bij Netwerken'. In dit geval hebben wij steeds te maken met componenten met twee aansluitklemmen, zogenaamde *tweepolen* of *éénpoorten*; we kunnen ze dus allemaal tekenen als een 'Black Box' met twee aansluitingen.



Figuur 1.9 Drie ideale componenten en een verbinding, voorgesteld als éénpoort.

Elk van de ideale componenten bepaalt een (ideaal) verband tussen de spanning tussen deze klemmen en de stroom die van de ene naar de andere klem vloeit. Dit verband is grafisch weer te geven (bijvoorbeeld stroom als functie van spanning, zoals in figuur 1.9), of in formulevorm:

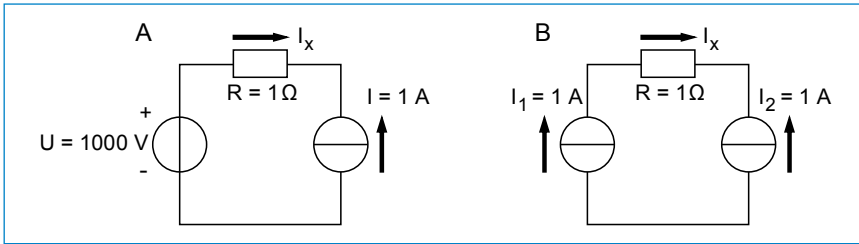
- ideale spanningsbron: $U = \text{constant}$ (ongeacht I);
- ideale stroombron: $I = \text{constant}$ (ongeacht U);
- ideale weerstand: $U/I = \text{constant} = R$;
- ideale verbinding: $U = 0$ (ongeacht I).

Hier kunnen we nog aan toevoegen:

- ideale open verbinding: $I = 0$ (ongeacht U).

Wellicht lijkt bovenstaande toelichting enigszins 'drammerig'. Maar... deze definities hebben soms gevolgen die in eerste instantie 'tegen het gevoel indruisen'.

Wij geven twee voorbeelden. In figuur 1.10 staan twee eenvoudige netwerkjes. De eerste vraag is hierbij: welke daarvan is onzinnig, en *waarom precies*?

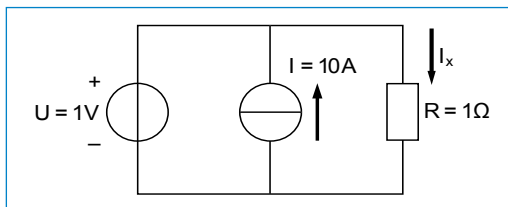


Figuur 1.10 Welke van deze schakelingen is onzin, en waarom precies?

Voor de beantwoording moeten wij slechts twee dingen duidelijk voor ogen houden: de definitie van een ideale stroombron en de stroomwet van Kirchhoff. Bij een (denkbeeldig) knooppunt bovenin is bij netwerk B de som van de stromen *niet* nul – en dat kan niet.

Tweede vraag: hoe groot is I_x door de weerstand in netwerk A? De stroombron bepaalt de stroom *ongeacht de spanning*, per definitie. Er loopt dus -1 A 'linksom', tegen de referentierichting van I_x in, dus $I_x = -1$ A.

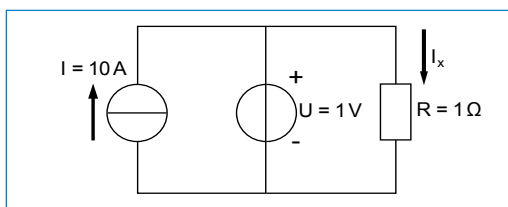
Het tweede voorbeeld stellen wij als meerkeuzevraag. Gevraagd is de stroom I_x door de weerstand. Mogelijke antwoorden: 1 A, 10 A en 11 A.



Figuur 1.11 Hoe groot is de aangegeven stroom I_x door de weerstand?

“Die stroombron staat er veel dichterbij”, zou je zeggen. Sorry, de verbindingen zijn ideaal. De spanningsbron bepaalt de spanning, *ongeacht de stroom*; de stroombron levert zijn stroom, *ongeacht de spanning*. Waar die stroom heenvloeit zal die stroombron een zorg zijn. De weerstand ‘zegt gewoon’: ik bepaal het verband tussen aangelegde spanning (in dit geval U , bepaald door de spanningsbron) en stroom (I_x). Dus: $I_x = U/R = 1$ A.

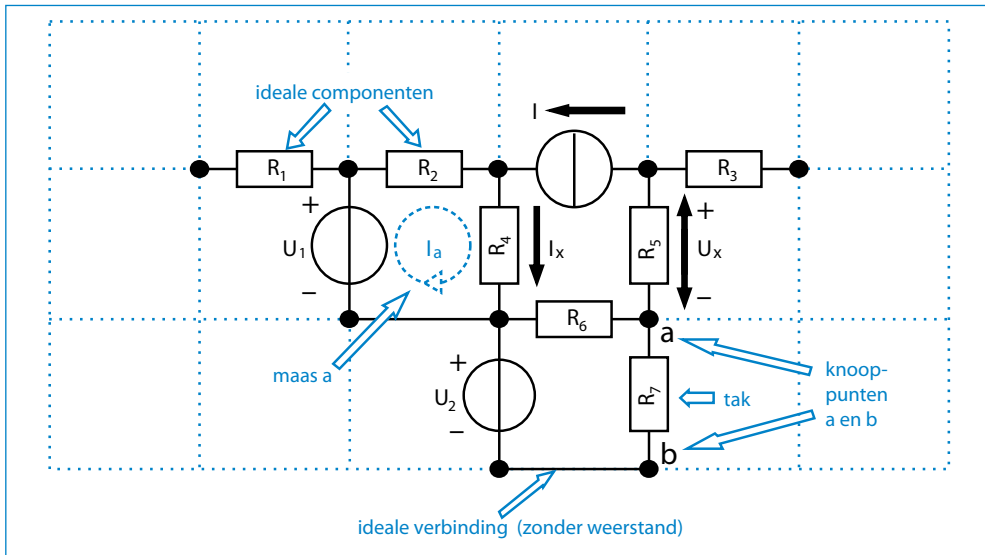
Het is opmerkelijk: als wij precies hetzelfde netwerk anders tekenen, zoals in figuur 1.12, dan heeft vrijwel niemand er moeite mee.



Figuur 1.12 Hetzelfde netwerk als figuur 1.11, maar *nét* iets anders getekend.

1.6 Het netwerkschema

Een netwerkschema bestaat uit een aantal hokjes (bij voorkeur rechthoekig getekend). De componenten en verbindingen worden daarin op de lijnen getekend; dat noemen we de takken. Elk punt waar takken met elkaar verbonden zijn is een knooppunt (de zwarte bolletjes in onderstaande figuur). Iedere gesloten kring in het netwerkschema noemen we een maas; bijvoorbeeld vanuit U_1 via R_2 en R_4 terug door U_1 , maar ook grotere lussen zoals U_1 - R_2 - I - R_5 - R_7 - U_2 - U_1 .



Figuur 1.13 Opbouw van een netwerkschema.

Van spanningen in het schema moet de referentiepolariteit worden aangegeven, met een dubbele pijl en plus- en mintekens (zie U_x , naast R_5). Van stromen wordt de referentierichting aangeduid met een enkele pijl (zie I_x , bij R_4). Later zullen wij ook over 'maasstromen' spreken; voor de referentierichting daarvan gebruiken wij een cirkelvormige pijl binnen de maas (zie I_a). Zoals in §1.1 al gezegd is, kan de 'echte' spanning of stroom best tegen de gekozen referentierichting in staan. In zo'n geval betekent ' $I_x = -1$ A' dat de stroom door R_4 in feite omhoog loopt.

Spanningen kunnen ook anders aangeduid zijn. ' $U_{ab} = 10$ V', bijvoorbeeld, geeft aan dat de spanning tussen knooppunten a en b 10 volt is, waarbij het eerstgenoemde (punt a) positief is ten opzichte van het tweede (punt b). Als de polariteit van de 'echte' (berekende of gemeten) spanning andersom is, dan kan dit aangeduid worden als ' $U_{ab} = -10$ V', maar ook als ' $U_{ba} = +10$ V'.

Een dergelijke letteraanduiding wordt ook bij stromen gebruikt. ' $I_{ab} = 2$ A', bijvoorbeeld, geeft aan dat een stroom van 2 A van a naar b loopt (via de rechtstreekse verbindingstak, in dit geval via R_7).