

# 1

## Gelijkstroomtheorie

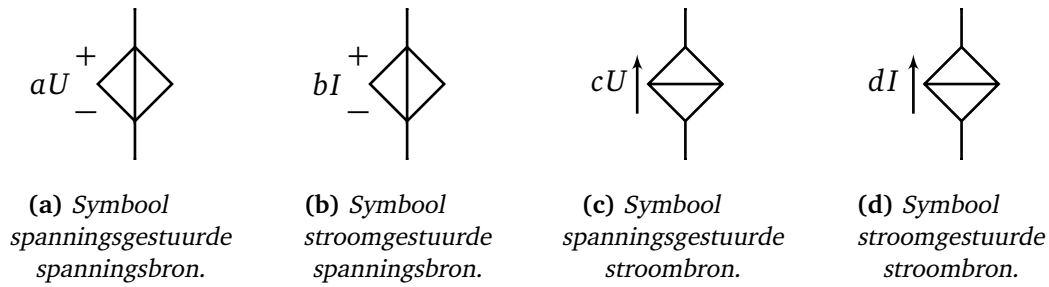
---

### 1.1 Gesteuurde bronnen

Naast onafhankelijke spanningsbron en stroombron kan een netwerk ook *afhankelijke* of *gestuurde* bronnen bevatten. Er zijn vier vormen mogelijk van gestuurde bronnen:

- De spanningsgestuurde spanningsbron (Engels: voltage controlled voltage source, afgekort vcvs). Het netwerksymbool is te zien in figuur 1.1(a). De spanning van deze bron is afhankelijk van een (andere) spanning tussen twee knooppunten in het netwerk. De parameter  $a$  is de versterkingsfactor en is dimensieloos;
- De stroomgestuurde spanningsbron (Engels: current controlled voltage source, afgekort ccvs). Het netwerksymbool is te zien in figuur 1.1(b). De spanning van deze bron is afhankelijk van een stroom in een tak in het netwerk. De parameter  $b$  is de versterkingsfactor en heeft de dimensie  $\Omega$ . Een andere naam voor dit netwerkelement is *transimpedantieversterker*;
- De spanningsgestuurde stroombron (Engels: voltage controlled current source, afgekort vccs). Het netwerksymbool is te zien in figuur 1.1(c). De stroom van deze bron is afhankelijk van een spanning tussen twee knooppunten in het netwerk. De parameter  $c$  is de versterkingsfactor en heeft de dimensie S. Een andere naam voor dit netwerkelement is *transconductantieversterker*;
- De stroomgestuurde stroombron (Engels: current controlled current source, afgekort cccs). Het netwerksymbool is te zien in figuur 1.1(d). De stroom van deze bron is afhankelijk van een (andere) stroom in een tak in het netwerk. De parameter  $d$  is de versterkingsfactor en is dimensieloos.

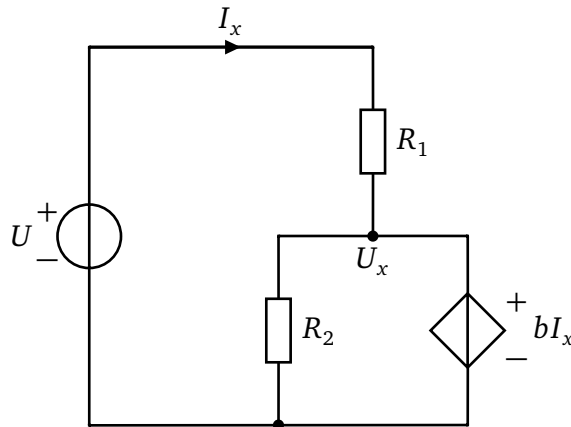
In netwerkberekeningen worden de parameters  $a$ ,  $b$ ,  $c$  en  $d$  als constant beschouwd. Hierdoor gedragen de bronnen zich als lineaire netwerkelementen. Praktische bronnen, zoals transistoren, zijn over het algemeen niet-lineair maar kunnen over een klein gebied rond het *werkpunt* als lineair worden beschouwd.



**Figuur 1.1:** Symbolen voor gestuurde bronnen.

### Voorbeeld 1.1: Netwerk met stroomgestuurde spanningsbron

Gegeven is het netwerk in figuur 1.2. Bepaal de spanning  $U_x$  als functie van  $U$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  en  $b$ . Bepaal  $U_x$  en  $I_x$  voor  $U = 12\text{ V}$ ,  $R_1 = 285\ \Omega$ ,  $R_2 = 120\ \Omega$  en  $b = 400\ \Omega$  (merk op dat  $b$  de dimensie  $\Omega$  heeft).



**Figuur 1.2:** Netwerk met stroomgestuurde spanningsbron.

De spanning  $U_x$  wordt door de stroomgestuurde spanningsbron op een waarde gezet. De spanning over het hele rechterdeel van het netwerk is gelijk aan  $U_x$  en de spanning  $U_{R1}$  over weerstand  $R_1$ . Deze spanning is weer afhankelijk van de stroom door  $R_1$  en de waarde van  $R_1$ . Dus geldt:

$$U_x = bI_x \quad \text{en} \quad U = U_{R1} + U_x \quad \text{en} \quad U_{R1} = I_x R_1 \quad (1.1)$$

De relatie tussen  $U$  en  $I_x$  kan als volgt bepaald worden:

$$U = U_{R1} + U_x = I_x R_1 + bI_x = (R_1 + b)I_x \quad (1.2)$$

Dus voor  $I_x$  geldt:

$$I_x = \frac{U}{R_1 + b} \quad (1.3)$$

Vullen we dit in de vergelijking  $U_x = bI_x$  in, dan krijgen we:

$$U_x = \frac{b}{R_1 + b} U \quad (1.4)$$

Voor de gegeven waarden van de parameters volgt dat:

$$\begin{aligned} U_x &= \frac{400}{285 + 400} \cdot 12 = 7,0 \text{ volt} \\ I_x &= \frac{12}{285 + 400} = 0,01752 = 17,52 \text{ mA} \end{aligned} \quad (1.5)$$

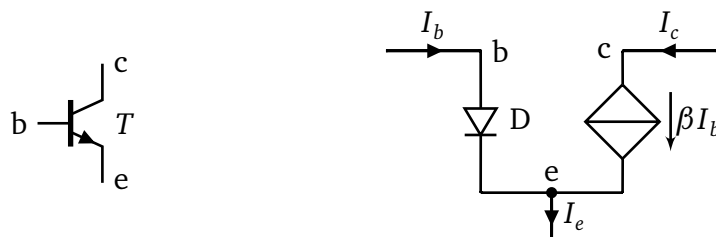
Merk op dat  $R_2$  niet in de formules voorkomt. De waarde van  $R_2$  is voor het berekenen van  $U_x$  en  $I_x$  kennelijk niet van belang, maar  $R_2$  mag geen kortsluiting veroorzaken. We kunnen de stroom door  $R_2$  berekenen:

$$I_2 = \frac{U_x}{R_2} = \frac{7,0}{120} = 0,05839 = 58,39 \text{ mA} \quad (1.6)$$

Deze stroom is de som van  $I_x$  en de stroom die de stroomgestuurde spanningsbron levert. De stroom die de stroomgestuurde spanningsbron levert is dus 40,87 mA.

### Voorbeeld 1.2: De bipolaire transistor als transimpedantieversteker

In dit voorbeeld bespreken we de bipolaire transistor als stroomgestuurde spanningsversteker. We bespreken hier alleen de zogenoemde NPN-transistor. Het symbool en het vereenvoudigde model voor gelijkstroomnetwerken is te zien in figuur 1.3. De transistor heeft drie aansluitpunten: de *basis* (b), de *collector* (c) en de *emitter* (e). Als in de basis een (kleine) stroom wordt gestuurd, dan zal transistor via de collector een grotere stroom leveren. De verhouding tussen de collectorstroom en de basisstroom wordt aangegeven met de parameter  $\beta$  (in de literatuur wordt ook wel  $h_{FE}$  gebruikt). Beide stromen verlaten de transistor via de emitter.



**Figuur 1.3:** Schemasympool en vereenvoudigd model van de bipolaire NPN-transistor.

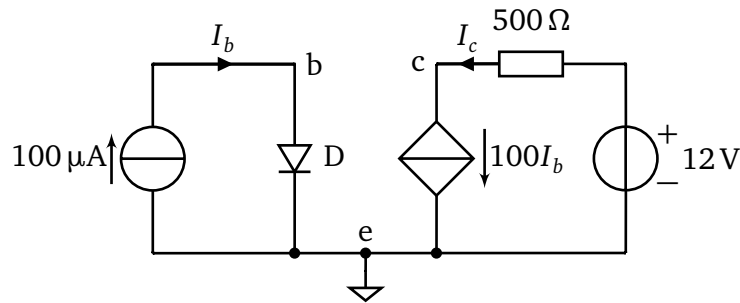
De stromen  $I_c$  en  $I_e$  laten zich als volgt beschrijven:

$$\begin{aligned} I_c &= \beta I_b \\ I_e &= I_c + I_b = (\beta + 1)I_b \end{aligned} \quad (1.7)$$

De transistor is een passieve component. Met name de stroombron kan niet werken zonder dat er een spanning over de collector-emitterovergang staat. De transistor regelt de collectorstroom die door de spanningsbron geleverd wordt. De basis-emitterovergang gedraagt zich als een diode. De spanning-stroomrelatie is niet-lineair. Vandaar dat we de transistor sturen met een stroombron (in de praktijk kan ook een spanningsbron gebruikt worden met een voorschakelweerstand).

In figuur 1.4 is een transistor geschakeld als stroomgestuurde spanningsversteker, ook

wel transimpedantieverstrekker genoemd. Aan de basis sluiten we een stroombron aan met een constante stroom van  $100\text{ }\mu\text{A}$ . Aan de collector is een weerstand van  $500\text{ }\Omega$  gekoppeld in serie met een spanningsbron van  $12\text{ V}$ . De stroomversterkingsfactor  $\beta$  is 100.



**Figuur 1.4:** Eenvoudig netwerk met een bipolaire NPN-transistor.

De collectorstroom is:

$$I_c = 100I_b = 100 \cdot 100 \times 10^{-6} = 10\text{ mA} \quad (1.8)$$

De collectorstroom vloeit ook door de weerstand van  $500\text{ }\Omega$ . De spanningsval over deze weerstand is:

$$U_{500\Omega} = 10 \times 10^{-3} \cdot 500 = 5\text{ V} \quad (1.9)$$

De spanning op de collector (t.o.v. de referentie) is dan  $7\text{ V}$ . We kunnen de relatie van de ingangsstroom naar de collectorspanning als volgt beschrijven:

$$U_c = 12 - 50000I_b \quad (1.10)$$

In de formule staat een minteken. Een grotere stroom in de basis leidt tot een lagere spanning op de collector. Overigens kan de collectorspanning nooit lager worden dan de emitterspanning. De maximale collectorstroom is te berekenen met:

$$I_{c,max} = \frac{12}{500} = 24\text{ mA} \quad (1.11)$$

De maximale basistroom waarvoor dit netwerk nog werkt is een  $\beta$  keer kleiner (een factor 100), dus  $I_{b,max} = 240\text{ }\mu\text{A}$ . Let wel, de basistroom mag wel groter zijn maar  $I_c$  is begrensd tot  $24\text{ mA}$ .

De transistor is verre van een ideale component. Zo is versterkingsfactor  $\beta$  is in de regel groot, tussen de 100 en de 600, maar de spreiding is enorm. Van eenzelfde type transistor kan  $\beta$  behoorlijk variëren. Dat betekent dat in ontwerpen moet worden gezorgd dat de invloed van  $\beta$  niet al te groot is. De collectorspanning kan niet lager worden dan de emitterspanning. Als de basistroom te groot is, zal de collectorspanning enkele tientallen mV boven de emitterspanning blijven. Dit wordt de *kniespanning* genoemd. De transistor is dan *in verzadiging*.

Veel literatuur schrijft dat superpositie niet gebruikt kan worden met gestuurde bron-

nen. Dat is niet waar. Superpositie kan prima gebruikt worden met gestuurde bronnen. Zie [**leachapplication**] voor meer informatie.

