



2023

## 17. Transistors

R2: SCRAPY-gids

Projectnummer: **2021-1-FR01-KA220-SCH-000031617**



 **Co-funded by  
the European Union**

De steun van de Europese Commissie voor de productie van deze publicatie houdt geen goedkeuring in van de inhoud, die uitsluitend de standpunten van de auteurs weergeeft, en de Commissie kan niet verantwoordelijk worden gehouden voor het gebruik van de informatie die erin is vervat.

ECAM EPMI  
30/04/2023

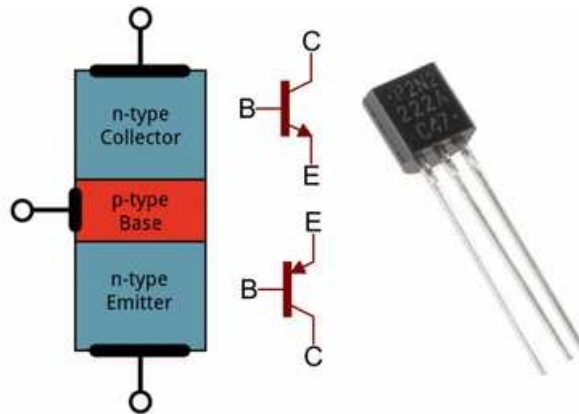
## Inhoudsopgave

1 Inleiding.....	2
2 Symbolen, pinnen en constructie.....	3
2.1 Transistorbouw .....	4
2.2 Een transistor als twee diodes .....	4
2.3 Structuur en werking van transistors .....	4
2.4 De wateranalogie uitbreiden .....	6
2.5 Vermogen versterken.....	8
3 Bedieningsmodi.....	8
3.1 Verzendingsmodus .....	9
3.2 Afsnijdmodus .....	10
3.3 Actieve modus .....	11
3.4 Versterken in actieve modus.....	11
3.5 Achteruit actief .....	12
4 Met betrekking tot de PNP .....	13
5 Toepassingen I: Schakelaars .....	13
5.1 Transistorschakelaar.....	13
6 basisweerstanden! .....	15
7 Digitale logica.....	16
8 oscillatoren .....	19
9 Toepassingen II: Versterkers.....	20
10 Algemene configuraties .....	21
10.1 Gemeenschappelijke zender.....	21
10.2 Gemeenschappelijke Collector (Emitter Volger).....	22
10.3 Gemeenschappelijke basis .....	23
10.4 Samenvatting.....	23
11 Meertrapsversterkers .....	23
11.1 Differentiële Versterker .....	24
11.2 Push-Pull versterker.....	25
11.3 Ze samenvoegen (een operationele versterker).....	25

## 1 Inleiding

Transistors laten onze elektronicawereld draaien. Ze zijn van cruciaal belang als stuurbron in zowat elke moderne schakeling. Soms zie je ze, maar meestal zitten ze diep verborgen in de matrijs van een geïntegreerde schakeling. In deze les laten we je kennismaken met de basisprincipes van de meest voorkomende transistor: de junction met bipolaire stroomtransistor (BJT).

In kleine, discrete hoeveelheden kunnen transistors worden gebruikt om eenvoudige elektronische schakelaars, digitale logica en signaalversterkende schakelingen te maken. In hoeveelheden van duizenden, miljoenen en zelfs miljarden transistors worden onderling verbonden en ingebed in kleine chips om computergeheugens, microprocessors en andere complexe IC's te maken.



*Transistors*

### Behandeld in deze les :

Na het lezen van deze les willen we dat je een goed begrip hebt van de werking van transistors. We zullen niet te diep ingaan op halfgeleiderfysica of equivalente modellen, maar we gaan wel diep genoeg in op het onderwerp zodat je begrijpt hoe een transistor kan worden gebruikt als schakelaar of versterker.

Deze les is opgedeeld in een aantal secties:

- **Symbolen, pinnen en constructie** -- Uitleg over de verschillen tussen de drie pinnen van de transistor.
- **De wateranalogie uitbreiden** -- Teruggaan naar de wateranalogie om uit te leggen hoe een transistor werkt als een klep.
- **Werkingsmodi** -- Een overzicht van de vier mogelijke werkingsmodi van een transistor.
- **Toepassingen I: Schakelaars** -- Toepassingsschakelingen die laten zien hoe transistors worden gebruikt als elektronisch gestuurde schakelaars.

- **Toepassingen II: Versterkers** -- Meer toepassingsschakelingen, deze keer laten we zien hoe transistors worden gebruikt om spanning of stroom te versterken.

Er zijn twee soorten basistransistors: bipolaire junctie (BJT) en metaaloxide-veldeffect (MOSFET). In deze les richten we ons op de BJT, omdat die iets makkelijker te begrijpen is. Als we nog dieper ingaan op transistortypes, zien we dat er twee versies van de BJT zijn: NPN en PNP. We zullen onze focus nog scherper stellen door onze eerste discussie te beperken tot de NPN. Door ons te beperken -- een goed begrip te krijgen van de NPN -- wordt het gemakkelijker om de PNP (of zelfs MOSFETS) te begrijpen door te vergelijken hoe deze verschilt van de NPN.

Voordat je je in deze les verdiept, raden we je aan om er even doorheen te kijken:

- **Spanning, stroom, weerstand en de wet van Ohm** -- Een inleiding tot de grondbeginselen van elektronica.
- **Basisbegrippen elektriciteit** -- We zullen het hebben over elektriciteit als de stroom van elektronen. Ontdek in deze tutorial hoe die elektronen stromen.
- **Elektrisch vermogen** -- Een van de belangrijkste toepassingen van de transistor is versterken -- het vermogen van een signaal verhogen. Het vermogen verhogen betekent dat we ofwel de stroom ofwel de spanning kunnen verhogen. Ontdek waarom in deze tutorial.
- **Diodes** -- Een transistor is een halfgeleider, net als een diode. Het is in zekere zin wat je zou krijgen als je twee diodes op elkaar zou stapelen en hun anodes met elkaar zou verbinden. Als je begrijpt hoe een diode werkt, kom je een heel eind in het begrijpen van de werking van een transistor.

## 2 Symbolen, pinnen en constructie

Transistors zijn in principe apparaten met drie pinnen. Op een junctie met bipolaire stroom transistor (BJT) worden die pinnen aangeduid als **collector** (C), **basis** (B) en **emitter** (E). De circuitsymbolen voor zowel de NPN als de PNP BJT staan hieronder:



*De circuitsymbolen voor de NPN- en de PNP-transistors*

Het enige verschil tussen een NPN en PNP is de richting van de pijl op de emitter. Bij een NPN wijst de pijl naar buiten en bij een PNP naar binnen. Een handig geheugensteuntje is:

## NPN: Niet Wijzend iN

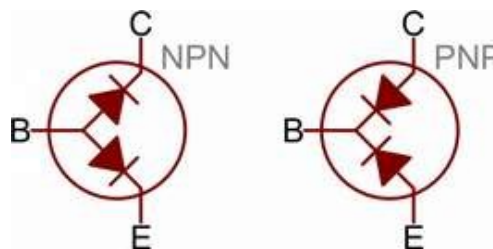
Achterlijke logica, maar het werkt!

### 2.1 Constructie van transistors

Transistors vertrouwen op halfgeleiders om hun magie te laten werken. Een halfgeleider is een materiaal dat geen zuivere geleider is (zoals koperdraad) maar ook geen isolator (zoals lucht). De geleidbaarheid van een halfgeleider -- hoe gemakkelijk het elektronen laat stromen -- hangt af van variabelen zoals temperatuur of de aanwezigheid van meer of minder elektronen. Laten we eens kort onder de motorkap van een transistor kijken. Maak je geen zorgen, we zullen niet te diep in de kwantumfysica duiken.

### 2.2 Een transistor als twee diodes

Transistors zijn als het ware een uitbreiding van een andere halfgeleidercomponent: diodes. In zekere zin zijn transistors gewoon twee diodes waarvan de kathodes (of anodes) met elkaar verbonden zijn:



Een transistor als twee diodes

De diode die de basis van de emitter verbindt is hier de belangrijkste; deze komt overeen met de richting van de pijl op het schematische symbool en laat zien in welke richting de stroom door de transistor moet lopen.

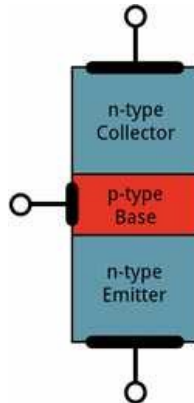
De diodevoorstelling is een goede plek om te beginnen, maar het is verre van nauwkeurig. Baseer je begrip van de werking van een transistor niet op dat model (en probeer het niet na te bootsen op een breadboard, dat werkt niet). Er zijn een heleboel vreemde kwantumfysische dingen die de interacties tussen de drie aansluitingen regelen.

(Dit model is handig als je een transistor moet testen. Met de diodetestfunctie (of weerstandstestfunctie) op een multimeter kun je meten over de BE- en BC-polen om de aanwezigheid van deze "diodes" te controleren).

### 2.3 Structuur en werking van transistors

Transistors worden gemaakt door drie verschillende lagen halfgeleidermateriaal op elkaar te stapelen. Aan sommige van die lagen worden extra elektronen toegevoegd (een proces dat "doping" wordt genoemd) en aan andere worden elektronen verwijderd (gedoteerd met "gaten" -- de afwezigheid van elektronen). Een halfgeleidermateriaal met extra elektronen wordt een **n-type** genoemd (n staat voor negatief omdat elektronen een negatieve lading hebben) en een materiaal met verwijderde elektronen wordt een **p-type**

**genoemd** (voor positief). Transistors worden gemaakt door een n op een p op een n te stapelen, of p over n over p.



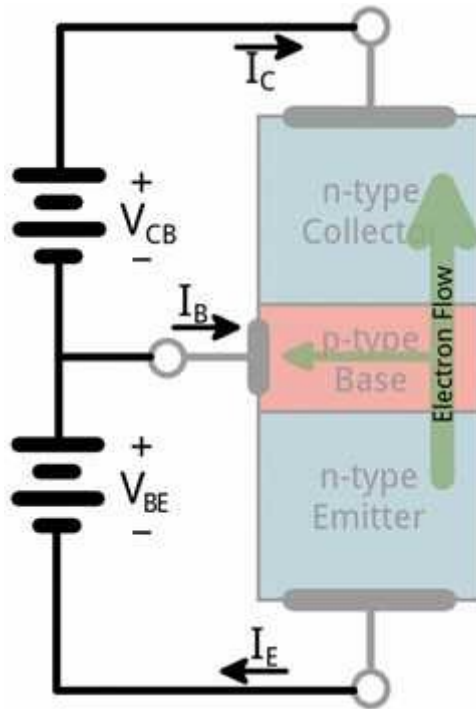
*Vereenvoudigd schema van de structuur van een NPN.*

Met wat handgeklap kunnen we zeggen dat elektronen gemakkelijk van n-regio's naar topregio's kunnen stromen, zolang ze maar een beetje kracht (spanning) hebben om ze te duwen. Maar van een p-gebied naar een n-gebied stromen is moeilijk (vereist veel spanning). Maar het speciale aan een transistor -- het deel dat ons tweediodemodel overbodig maakt -- is het feit dat **elektronen gemakkelijk van de p-type basis naar de n-type collector kunnen stromen zolang de basis-emitterverbinding voorwaarts gericht is** (wat betekent dat de basis op een hogere spanning staat dan de emitter).

De NPN-transistor is ontworpen om elektronen door te geven van de emitter naar de collector (dus conventionele stroom vloeit van collector naar emitter). De emitter "zendt" elektronen uit naar de basis, die het aantal elektronen regelt dat de emitter uitzendt. De meeste uitgezonden elektronen worden "opgevangen" door de collector, die ze naar het volgende deel van de schakeling stuurt.

Een PNP werkt op dezelfde maar tegenovergestelde manier. De basis regelt nog steeds de stroomtoevoer, maar die stroom gaat in de tegenovergestelde richting -- van emitter naar collector. In plaats van elektronen zendt de emitter "gaten" uit (een conceptuele afwezigheid van elektronen) die door de collector worden opgevangen.

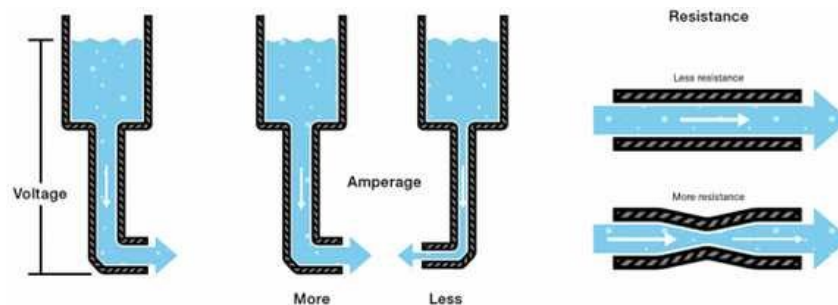
De transistor is als een **elektronenklep**. De basispen is als een hendel die je kunt verstellen om meer of minder elektronen van de emitter naar de collector te laten stromen. Laten we deze analogie verder onderzoeken...



De structuur van een NPN

## 2.4 De wateranalogie uitbreiden

Als je de laatste tijd veel elektriciteitstutorials hebt gelezen, ben je gewend aan wateranalogieën. We zeggen dat stroom gelijk is aan de stroomsnelheid van water, spanning is de druk die dat water door een pijp duwt en weerstand is de breedte van de pijp.



De wateranalogie uitbreiden

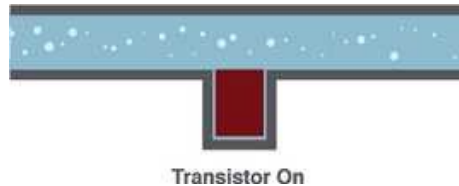
Het is geen verrassing dat de wateranalogie ook kan worden uitgebreid naar transistors: een transistor is als een **waterklep** -- een mechanisme dat we kunnen gebruiken om **de stroomsnelheid te regelen**.

Er zijn drie toestanden waarin we een klep kunnen gebruiken, die elk een ander effect hebben op de stroomsnelheid in een systeem.

### 1) Aan -- Kortsluiting



Een klep kan volledig worden geopend, waardoor het water **vrij kan stromen** - erdoorheen alsof de klep niet eens aanwezig is.

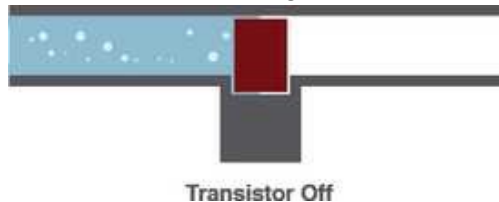


#### *Transistor aan -- Kortsluiting*

Op dezelfde manier kan een transistor onder de juiste omstandigheden lijken op een **kortsluiting** tussen de collector- en emitterpennen. De stroom kan vrij door de collector en uit de emitter stromen.

### 2) Uit -- Open circuit

Een gesloten klep kan **de** watertoevoer volledig **stoppen**.

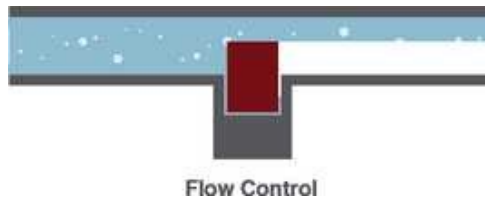


#### *Transistor uit -- Open circuit*

Op dezelfde manier kan een transistor worden gebruikt om een **open circuit** te creëren tussen de collector- en emitterpennen.

### 3) Lineaire debietregeling

Met wat nauwkeurige afstelling kan een klep worden ingesteld om **de stroomsnelheid** fijn te **regelen** op een punt tussen volledig open en gesloten.



#### *Transistor Lineaire Debietregeling*

Een transistor kan hetzelfde doen -- **lineair de stroom** door een circuit **regelen** op een punt tussen volledig uit (een open circuit) en volledig aan (een kort circuit).

Vanuit onze wateranalogie is de breedte van een pijp vergelijkbaar met de weerstand in een circuit. Als een klep de breedte van een pijp fijn kan afstellen, dan kan een transistor



de weerstand tussen de collector en de emitter fijn afstellen. Dus in zekere zin is een transistor als een **variabele, instelbare weerstand**.

## 2.5 Versterkend vermogen

Er is nog een andere analogie die we hierbij kunnen gebruiken. Stel je voor dat je met een kleine draai aan een knop het debiet van de stroompoorten van de Hoover Dam zou kunnen regelen. De kleine hoeveelheid kracht die je zou kunnen gebruiken om aan die knop te draaien heeft de potentie om een kracht te creëren die duizenden keren sterker is. We rekken de analogie tot het uiterste op, maar dit idee is ook van toepassing op transistors. Transistors zijn speciaal omdat ze elektrische signalen kunnen **versterken**, waardoor een signaal met een laag vermogen wordt omgezet in een soortgelijk signaal met een veel hoger vermogen.

Een soort van. Er komt nog veel meer bij kijken, maar dit is een goed begin! Bekijk de volgende sectie voor een meer gedetailleerde uitleg van de werking van een transistor.

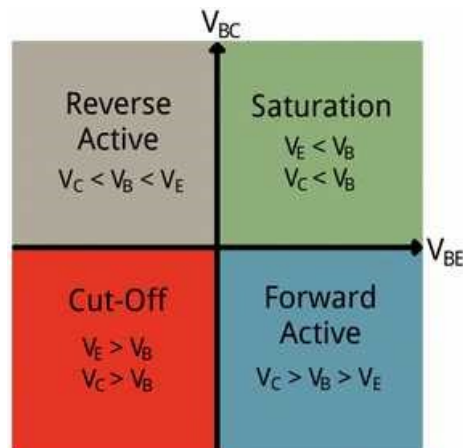
## 3 bedieningsmodi

In tegenstelling tot weerstanden, die een lineair verband afdwingen tussen spanning en stroom, zijn transistors niet-lineaire apparaten. Ze hebben vier verschillende werkingsmodi, die de stroom beschrijven die er doorheen loopt. (Als we het hebben over stroom door een transistor, bedoelen we meestal **stroom die van de collector naar de emitter van een NPN loopt**).

De vier transistorbedrijfsmodi zijn:

- **Verzadiging** -- De transistor gedraagt zich als een **kortsluiting**. Er vloeit vrij stroom van de collector naar de emitter.
- **Cut-off** -- De transistor gedraagt zich als een **open circuit**. Er loopt geen stroom van de collector naar de emitter.
- **Actief** -- De stroom van collector naar emitter is **evenredig** met de stroom die naar de basis vloeit.
- **Reverse-Active** -- Net als in de actieve modus is de stroom evenredig met de basisstroom, maar stroomt hij in omgekeerde richting. De stroom vloeit van emitter naar collector (niet precies het doel waarvoor transistors zijn ontworpen).

Om te bepalen in welke toestand een transistor zich bevindt, moeten we kijken naar de spanningen op elk van de drie pinnen en hoe die zich tot elkaar verhouden. De spanningen van basis naar emitter (VBE) en vervolgens van basis naar collector (VBC) bepalen de modus van de transistor:



### De modus van de transistor

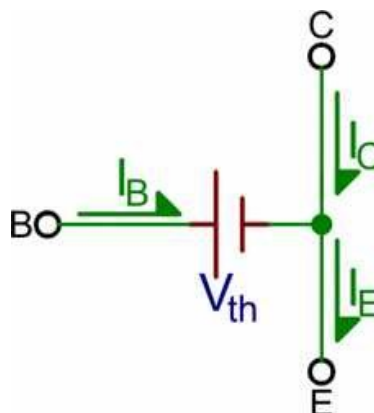
De vereenvoudigde kwadrantgrafiek hierboven laat zien hoe positieve en negatieve spanningen op die klemmen de modus beïnvloeden. In werkelijkheid is het iets ingewikkelder dan dat.

Laten we de vier transistormodi afzonderlijk bekijken; we onderzoeken hoe we het apparaat in die modus kunnen zetten en welk effect dit heeft op de stroomdoorgang.

**Opmerking:** Het grootste deel van deze pagina gaat over **NPN-transistors**. Om te begrijpen hoe een PNP-transistor werkt, draai je gewoon de polariteit of > en < tekens om.

### 3.1 Verzendingsmodus

Verzendiging is de **enige modus** van een transistor. Een transistor in verzadigingsstand gedraagt zich als een kortsluiting tussen de collector en de emitter.



### Verzendingsmodus

In de verzadigingsmodus zijn beide "diodes" in de transistor naar voren gericht. Dat betekent dat  $V_{BE}$  groter moet zijn dan 0, en  $V_{BC}$  ook. Met andere woorden,  $V_B$  moet hoger zijn dan zowel  $V_E$  als  $V_C$ .

$$V_B > V_C$$

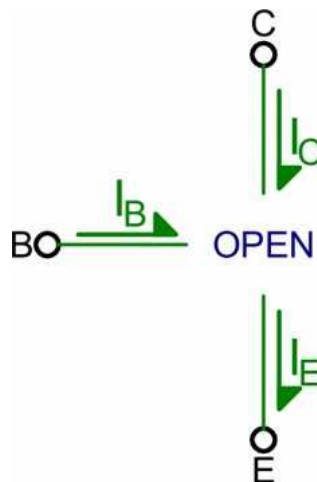
$$V_B > V_E$$

Omdat de overgang van basis naar emitter op een diode lijkt, moet  $V_{BE}$  in werkelijkheid groter zijn dan een **drempelspanning** om in verzadiging te komen. Er zijn veel afkortingen voor deze spanningsval --  $V_{th}$ ,  $V_{\gamma}$  en  $V_d$  zijn er een paar -- en de werkelijke waarde varieert tussen transistors (en zelfs nog meer per temperatuur). Voor veel transistors (bij kamertemperatuur) kunnen we deze daling schatten op ongeveer 0,6 V.

Een andere domper op de werkelijkheid: er zal geen perfecte geleiding zijn tussen de emitter en de collector. Er zal zich een kleine spanningsval vormen tussen deze knooppunten. Transistorgegevensbladen definiëren deze spanning als **CE-verzadigingsspanning  $V_{CE(sat)}$**  -- een spanning van collector naar emitter die nodig is voor verzadiging. Deze waarde ligt meestal rond 0,05-0,2V. Deze waarde betekent dat  $V_C$  iets groter moet zijn dan  $V_E$  (maar beide nog steeds kleiner dan  $V_B$ ) om de transistor in verzadigingsmodus te krijgen.

### 3.2 Uitschakelmodus

Afsnijdmodus is het tegenovergestelde van verzadiging. Een transistor in de afsnijdstand staat uit -- er is geen collectorstroom en dus ook geen emitterstroom. Het lijkt bijna op een open circuit.



**Uitschakelmodus**

Om een transistor in de afsnijdfunctie te krijgen, moet de basisspanning lager zijn dan zowel de emitter- als de collectorspanning.  $V_{BC}$  en  $V_{BE}$  moeten beide negatief zijn.

$$V_C > V_B$$

$$V_E > V_B$$

In werkelijkheid kan  $v_{BE}$  overal tussen 0V en  $v_{th}$  ( $\sim 0,6V$ ) liggen om de afsnijfunctie te bereiken.

### 3.3 Actieve modus

Om in de actieve modus te werken, moet de  $V_{BE}$  van een transistor groter zijn dan nul en moet de  $V_{BC}$  negatief zijn. De basisspanning moet dus lager zijn dan de collector, maar hoger dan de emitter. Dat betekent ook dat de collector groter moet zijn dan de emitter.

$$V_C > V_B > V_E$$

In werkelijkheid hebben we een niet-nul **voorwaartse spanningsval** nodig (afgekort  $V_{th}$ ,  $V_Y$  of  $V_d$ ) van de basis naar de emitter ( $V_{BE}$ ) om de transistor "aan te zetten". Gewoonlijk is deze spanning ongeveer 0,6 V.

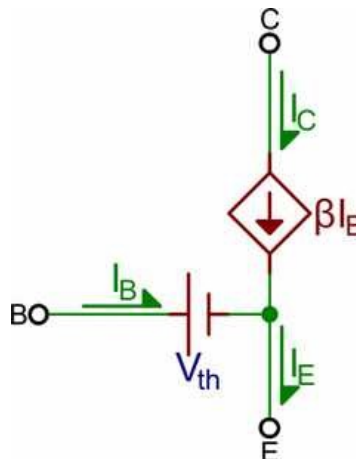
### 3.4 Versterken in actieve modus

De actieve modus is de krachtigste modus van de transistor omdat deze het apparaat in een versterker verandert. De stroom die naar de basispen gaat **versterkt** de stroom die naar de collector en uit de emitter gaat.

Onze stenografische notatie voor de **versterking** (versterkingsfactor) van een transistor is  $\beta$  (je kunt het ook zien als  $\beta_F$ , of  $h_{FE}$ ).  $\beta$  relateert lineair de collectorstroom ( $I_C$ ) aan de basisstroom ( $I_B$ ):

$$I_C = \beta I_B$$

De werkelijke waarde van  $\beta$  varieert per transistor. Hij ligt meestal rond de 100 maar kan variëren van 50 tot 200...zelfs 2000, afhankelijk van welke transistor je gebruikt en hoeveel stroom er doorheen loopt. Als je transistor bijvoorbeeld een  $\beta$  van 100 heeft, zou dat betekenen dat een ingangsstroom van 1mA in de basis een stroom van 100mA door de collector kan produceren.



*Model met actieve modus.  $V_{BE} = V_{th}$  en  $I_C = \beta I_B$ .*

Hoe zit het met de emitterstroom,  $I_E$ ? In actieve modus gaan de collector- en basisstromen het apparaat in en komt de  $I_E$  eruit. Om de emitterstroom te relateren aan de collectorstroom, hebben we een andere constante waarde:  $\alpha$ .  $\alpha$  is de common-base stroomversterking en relateert deze stromen als zodanig:

$$I_C = \alpha I_E$$

$\alpha$  ligt gewoonlijk erg dicht bij, maar minder dan, 1. Dat betekent dat  $I_C$  erg dicht bij, maar minder dan  $I_E$  ligt in actieve modus.

Je kunt  $\beta$  gebruiken om  $\alpha$  te berekenen, of andersom:

$$\beta = \frac{\alpha}{(1-\alpha)}$$
$$\alpha = \frac{\beta}{\beta+1}$$

Als  $\beta$  bijvoorbeeld 100 is, dan betekent dit dat  $\alpha$  0,99 is. Dus als  $I_C$  bijvoorbeeld 100mA is, dan is  $I_E$  101mA.

### 3.5 Omgekeerd Actief

Net zoals verzadiging het tegenovergestelde is van afsnijden, is de omgekeerde actieve modus het tegenovergestelde van de actieve modus. Een transistor in de omgekeerde actieve modus geleidt, versterkt zelfs, maar de stroom vloeit in de tegenovergestelde richting, van emitter naar collector. Het nadeel van de omgekeerde actieve modus is dat de  $\beta$  ( $\beta_R$  in dit geval) veel kleiner is.

Om een transistor in omgekeerde actieve modus te zetten, moet de emitterspanning groter zijn dan de basisspanning, die weer groter moet zijn dan de collector ( $V_{BE} < 0$  en  $V_{BC} > 0$ ).

$$V_C < V_B < V_E$$

De omgekeerde actieve modus is meestal geen toestand waarin je een transistor wilt aansturen. Het is goed om te weten dat het bestaat, maar het is zelden ontworpen in een toepassing.

## 4 Betreffende de PNP

Na alles wat we op deze pagina hebben besproken, hebben we nog maar de helft van het BJT-spectrum behandeld. Hoe zit het met PNP transistors? PNP's werken net als de NPN's -- ze hebben dezelfde vier standen -- maar alles is omgedraaid. Om erachter te komen in welke modus een PNP-transistor staat, draai je alle <- en >-tekens om.

Om bijvoorbeeld een PNP in verzadiging te brengen, moeten VC en VE hoger zijn dan VB. Je trekt de basis laag om de PNP in te schakelen en maakt hem hoger dan de collector en emitter om hem uit te schakelen. En om een PNP in actieve modus te zetten, moet VE een hogere spanning hebben dan VB, die hoger moet zijn dan VC.

Samengevat:

### Spanningsrelaties NPN-modus PNP-modus

$VE < VB < VC$	Actief	Omgekeerd
$VE < VB > VC$	Verzadiging	Afgesneden
$VE > VB < VC$	Afgesneden	Verzadiging
$VE > VB > VC$	Omgekeerd	Actief

Een andere tegengestelde eigenschap van NPN's en PNP's is de stroomrichting. In de actieve en verzadigingsmodus **loopt de stroom in een PNP van de emitter naar de collector**. Dit betekent dat de emitter op een hogere spanning moet staan dan de collector.

Als je uitgekeken bent op conceptuele dingen, ga dan naar de volgende sectie. De beste manier om te leren hoe een transistor werkt, is hem te onderzoeken in echte schakelingen. Laten we eens kijken naar enkele toepassingen!

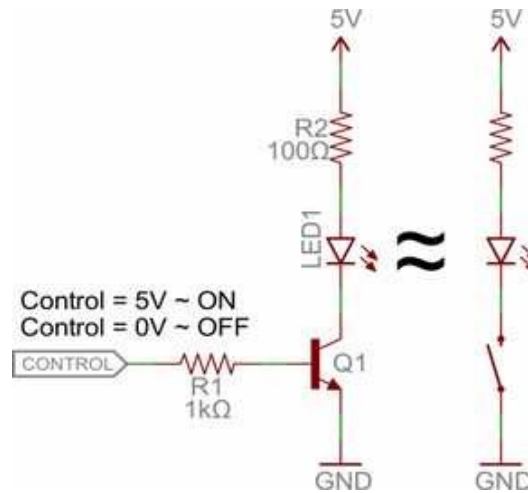
## 5 Toepassingen I: Schakelaars

Een van de meest fundamentele toepassingen van een transistor is deze te gebruiken om de stroomtoevoer naar een ander deel van het circuit te regelen -- deze te gebruiken als een elektrische schakelaar. Door de transistor in de cutoff- of verzadigingsmodus te zetten, kan hij het binaire aan/uit-effect van een schakelaar creëren.

Transistorschakelaars zijn cruciale bouwstenen voor schakelingen; ze worden gebruikt om logische poorten te maken, waaruit microcontrollers, microprocessors en andere geïntegreerde schakelingen ontstaan. Hieronder staan enkele voorbeeldschakelingen.

### 5.1 Transistorschakelaar

Laten we eens kijken naar de meest fundamentele transistor-schakelaarschakeling: een NPN-schakelaar. Hier gebruiken we een NPN om een LED met hoog vermogen aan te sturen:



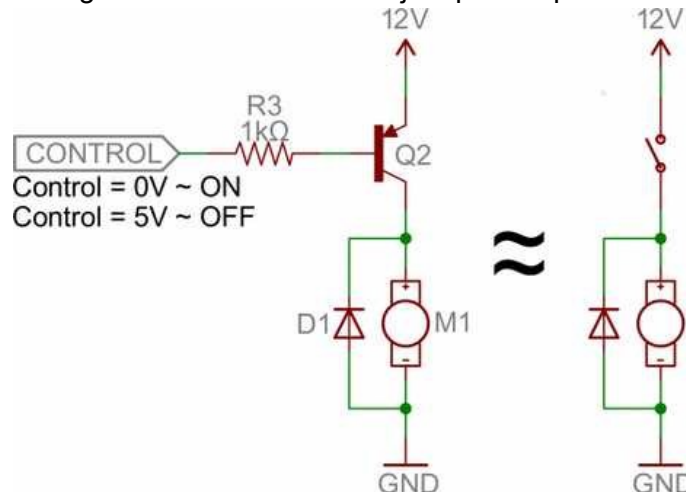
*Een NPN-schakelaar*

Onze sturingang stroomt naar de basis, de uitgang is verbonden met de collector en de emitter wordt op een vaste spanning gehouden.

Terwijl een normale schakelaar een actuator nodig heeft om fysiek om te schakelen, wordt deze schakelaar bestuurd door de spanning op de basispen.

Een I/O-pin van een microcontroller, zoals die op een Arduino, kan worden geprogrammeerd om hoog of laag te gaan om de LED aan of uit te zetten.

Wanneer de spanning aan de basis groter is dan 0,6V (of wat de  $V_{th}$  van je transistor ook is), begint de transistor te verzadigen en lijkt het op een kortsluiting tussen de collector en emitter. Wanneer de spanning aan de basis lager is dan 0,6 V, staat de transistor in de afsnijfunctie -- er vloeit geen stroom omdat het lijkt op een open circuit tussen C en E.



*Een schakelaar met lage kant*



De schakeling hierboven wordt een laag-zijschakelaar genoemd omdat de schakelaar - onze transistor - zich aan de lage (massa) kant van de schakeling bevindt. Als alternatief kunnen we een PNP-transistor gebruiken om een hoog-zijschakelaar te maken

Net als bij de NPN-schakeling is de basis onze ingang en is de emitter verbonden met een constante spanning. Deze keer is de emitter echter hoog gekoppeld en is de belasting aan de massazijde van de transistor aangesloten.

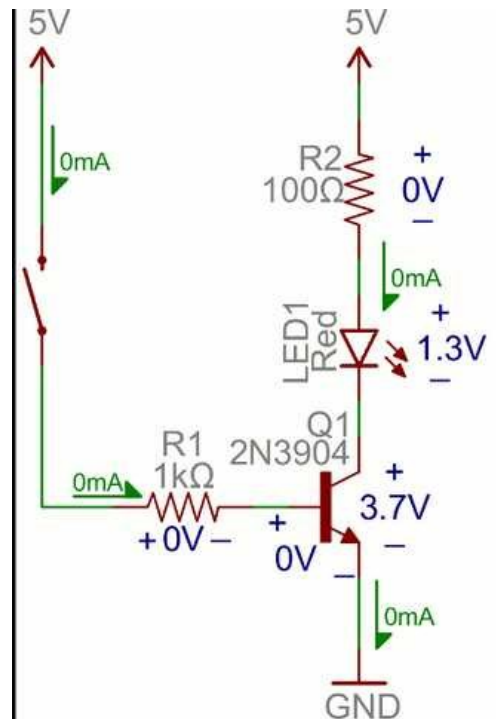
Deze schakeling werkt net zo goed als de NPN-gebaseerde schakelaar, maar er is één groot verschil: om de belasting "aan" te zetten, moet de basis laag zijn. Dit kan complicaties veroorzaken, vooral als de hoogspanning van de belasting (VCC is 12V die in deze afbeelding wordt aangesloten op de emitter VE) hoger is dan de hoogspanning van onze sturingang. Deze schakeling zou bijvoorbeeld niet werken als je een Arduino met 5V probeert te gebruiken om een 12V motor uit te schakelen. In dat geval zou het **onmogelijk** zijn **om de schakelaar uit te schakelen** omdat VB (verbonden met de controlepin) altijd lager zou zijn dan VE.

## 6 Basisweerstand s!

Je zult zien dat elk van deze schakelingen een serieweerstand gebruikt tussen de sturingang en de basis van de transistor. Vergeet niet deze weerstand toe te voegen! Een transistor zonder weerstand op de basis is als een LED zonder stroombegrenzende weerstand.

Onthoud dat een transistor in zekere zin gewoon een paar onderling verbonden diodes is. We sturen de basis-emitter diode naar voren om de belasting in te schakelen. De diode heeft slechts 0,6 V nodig om aan te gaan, meer spanning betekent meer stroom. Sommige transistors hebben een nominale stroomsterkte van slechts 10-100mA. Als je een stroom levert die hoger is dan de maximumwaarde, kan de transistor ontploffen.

De serieweerstand tussen onze stuurbron en de basis **beperkt de stroom naar de basis**. Het basis-emitter knooppunt kan zijn gelukkige spanningsval van 0,6V krijgen, en de weerstand kan de resterende spanning laten vallen. De waarde van de weerstand en de spanning erover bepalen de stroom.



#### Een basisweerstand

De weerstand moet groot genoeg zijn om de stroom effectief te beperken, maar klein genoeg om de basis voldoende stroom te geven. 1mA tot 10mA is meestal genoeg, maar controleer de datasheet van je transistor om er zeker van te zijn.

## 7 Digitale logica

Transistors kunnen gecombineerd worden om al onze fundamentele logische poorten te maken: AND, OR en NOT.

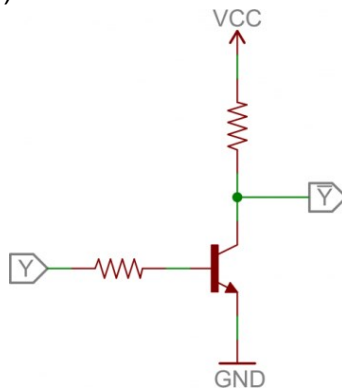
(Opmerking: tegenwoordig worden MOSFETS vaker gebruikt om logische poorten te maken dan BJT's. MOSFET's zijn energiezuiniger, waardoor ze een betere keuze zijn). MOSFET's zijn energiezuiniger, waardoor ze de betere keuze zijn).

### Omvormer

Hier is een transistorschakeling die een **inverter** of NOT gate implementeert:

Hier zal een hoge spanning in de basis de transistor aanzetten, waardoor de collector effectief verbonden wordt met de emitter. Aangezien de emitter rechtstreeks is verbonden met de massa, zal de collector dat ook zijn (hoewel deze iets hoger zal zijn, ergens rond  $V_{CE(sat)} \sim 0,05-0,2V$ ). Als de ingang daarentegen laag is, ziet de transistor eruit als een open circuit, en wordt de uitgang omhoog getrokken naar VCC

(Dit is een fundamentele transistorconfiguratie die een gemeenschappelijke emitter wordt genoemd. Daarover later meer).



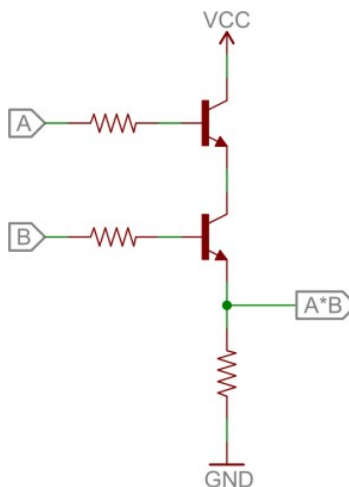
*Een omvormer opgebouwd uit transistors.*

### EN-poort

Hier zijn een paar transistors gebruikt om een **2-input AND gate** te maken:

Als één van beide transistors wordt uitgeschakeld, dan wordt de uitgang op de collector van de tweede transistor laag getrokken.

Als beide transistors "aan" zijn (basis beide hoog), dan is de uitgang van de schakeling ook hoog.

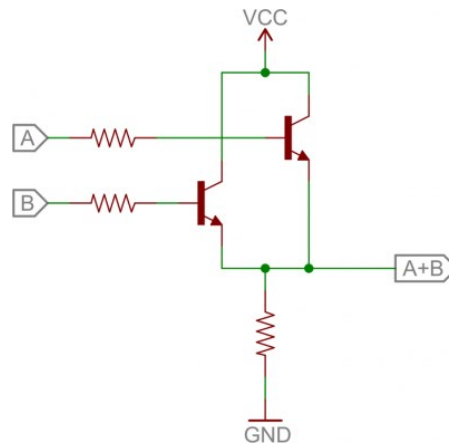


*2-input AND gate opgebouwd uit transistors.*

### OF Poort

En tot slot is hier een **OR-poort met 2 ingangen**:

In deze schakeling zal, als één van beide (of beide) A en B hoog zijn, de betreffende transistor aangaan en de uitgang hoog trekken. Als beide transistors uit zijn, wordt de uitgang laag getrokken door de weerstand.

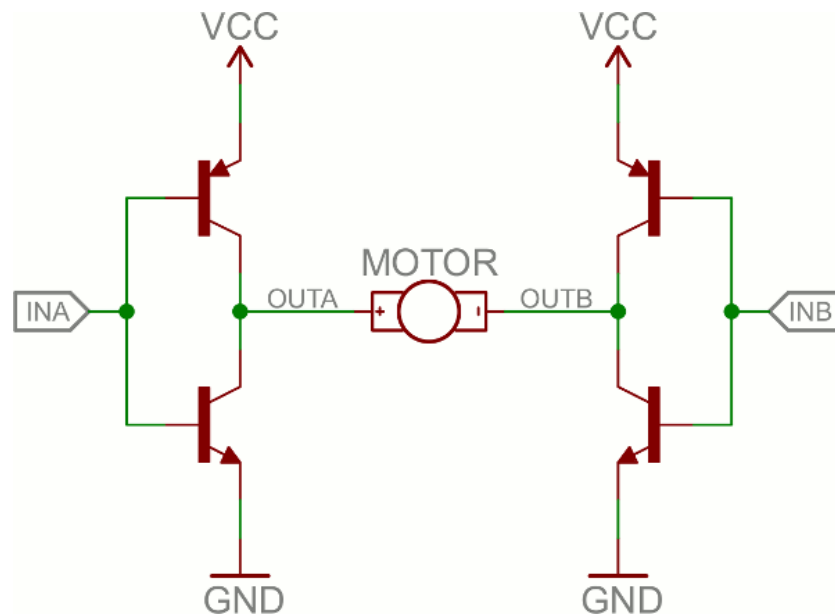


*2-input OR-poort opgebouwd uit transistors.*

## H-Bridge

Een H-brug is een op transistors gebaseerde schakeling die motoren zowel rechtsonder als linksom kan aandrijven. Het is een ongelooflijk populaire schakeling -- de drijvende kracht achter talloze robots die zowel vooruit als achteruit moeten kunnen bewegen.

In principe is een H-brug een combinatie van vier transistors met twee ingangslijnen en twee uitgangen:



*Kun je raden waarom het een H-brug wordt genoemd?*

(**Opmerking:** een goed ontworpen H-brug bevat meestal nog veel meer, waaronder flyback diodes, basisweerstand en Schmidt triggers).

Als beide ingangen dezelfde spanning hebben, zullen de uitgangen van de motor dezelfde spanning hebben en zal de motor niet kunnen draaien. Maar als de twee ingangen tegenovergesteld zijn, zal de motor in de ene of de andere richting draaien.

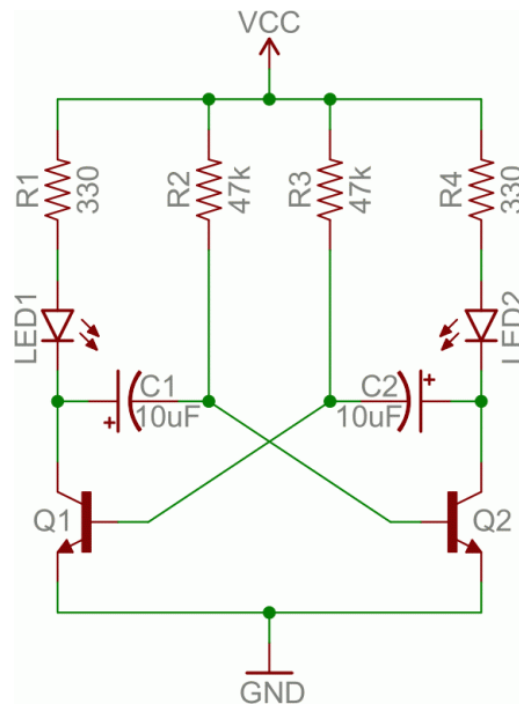
De H-brug heeft een waarheidstabel die er ongeveer zo uitziet:

Ingang A	Invoer B	Uitgang A	Uitgang B	Richting motor
0	0	1	1	Gestopt (remmen)
0	1	1	0	Met de klok mee
1	0	0	1	Tegen de klok in
1	1	0	0	Gestopt (remmen)

## 8 oscillatoren

Een oscillator is een schakeling die een periodiek signaal produceert dat schommelt tussen een hoge en lage spanning. Oscillatoren worden in allerlei soorten schakelingen gebruikt: van het simpelweg laten knipperen van een LED tot het produceren van een kloksignaal om een microcontroller aan te sturen. Er zijn veel manieren om een oscillatorschakeling te maken, waaronder kwarts kristallen, op-amps en natuurlijk transistors.

Hier is een voorbeeld van een oscillerende schakeling, die we een **astabiele multivibrator** noemen. Door **terugkoppeling** te gebruiken, kunnen we een paar transistors gebruiken om twee elkaar aanvullende, oscillerende signalen te maken.



Oscillerend circuit

Naast de twee transistors zijn de condensators de echte sleutel tot deze schakeling. De condensatoren laden en ontladen afwisselend, waardoor de twee transistors afwisselend aan en uit gaan.

Het analyseren van de werking van deze schakeling is een uitstekende studie van de werking van zowel caps als transistors. Om te beginnen gaan we ervan uit dat C1 volledig is opgeladen (met een spanning van ongeveer VCC), C2 is ontladen, Q1 is ingeschakeld en Q2 is uitgeschakeld. Dit is wat er daarna gebeurt:

- Als Q1 aan is, dan is de linkerplaat van C1 (op het schema) verbonden met ongeveer 0V. Hierdoor kan C1 ontladen via de collector van Q1.
- Terwijl C1 zich ontlaaft, laadt C2 zich snel op via de weerstand met de lagere waarde -- R4.
- Zodra C1 volledig ontladen is, wordt de rechterplaat naar ongeveer 0,6V getrokken, waardoor Q2 wordt ingeschakeld.
- Op dit punt hebben we de toestanden verwisseld: C1 is ontladen, C2 is geladen, Q1 is uit en Q2 is aan. Nu doen we dezelfde dans de andere kant op.
- Als Q2 aan is, kan C2 zich ontladen via de collector van Q2.
- Terwijl Q1 uit staat, kan C1 snel opladen via R1.
- Zodra C2 volledig ontladen is, wordt Q1 weer ingeschakeld en zijn we terug in de staat waarin we begonnen.

Het kan moeilijk zijn om het te begrijpen. Je kunt hier nog een uitstekende demo van dit circuit vinden.

Door specifieke waarden te kiezen voor C1, C2, R2 en R3 (en R1 en R4 laag te houden), kunnen we de snelheid van onze multivibratorschakeling instellen:

$$f = \frac{1}{\ln(2) \cdot (R_2 C_1 + R_3 C_2)}$$

Dus, met de waarden voor caps en weerstanden ingesteld op respectievelijk 10µF en 47kΩ, is onze oscillatorfrequentie ongeveer 1,5 Hz. Dat betekent dat elke LED ongeveer 1,5 keer per seconde zal knipperen.

Zoals je al kunt zien, zijn er talloze schakelingen die gebruik maken van transistors. Maar we zijn er nog niet. Deze voorbeelden laten vooral zien hoe de transistor kan worden gebruikt in verzadigings- en afsnijdmodus als schakelaar, maar hoe zit het met versterking? Tijd voor meer voorbeelden!

## 9 Toepassingen II: Versterkers

Enkele van de krachtigste transistortoepassingen hebben te maken met versterking: een signaal met een laag vermogen omzetten in een signaal met een hoger vermogen. Versterkers kunnen de spanning van een signaal verhogen, iets uit het µV-bereik omzetten naar een bruikbaar mV- of V-niveau. Of ze kunnen stroom versterken, wat handig is om de µA stroom die door een fotodiode wordt geproduceerd om te zetten in een stroom van veel grotere omvang. Er zijn zelfs versterkers die een stroom opnemen en een hogere spanning produceren, of omgekeerd (respectievelijk transweerstand en transgeleiding genoemd).

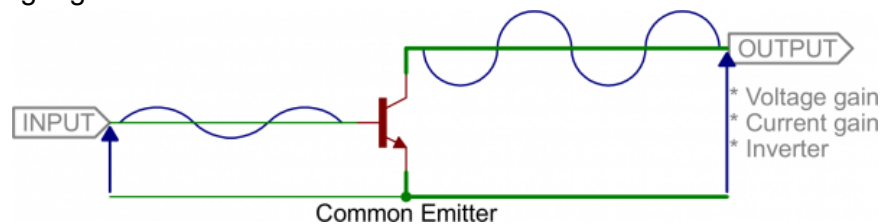
Transistors zijn een belangrijk onderdeel van veel versterkerschakelingen. Er is een oneindige variëteit aan transistorversterkers, maar gelukkig zijn veel ervan gebaseerd op enkele van deze primitievere schakelingen. Onthoud deze schakelingen en hopelijk kun je met een beetje pattern-matching meer complexe versterkers begrijpen.

## 10 Algemene configuraties

Drie van de meest fundamentele transistorversterkers zijn de gemeenschappelijke emitter, gemeenschappelijke collector en gemeenschappelijke basis. In elk van de drie configuraties is een van de drie knooppunten permanent verbonden met een gemeenschappelijke spanning (meestal massa) en de andere twee knooppunten zijn ofwel een ingang of uitgang van de versterker.

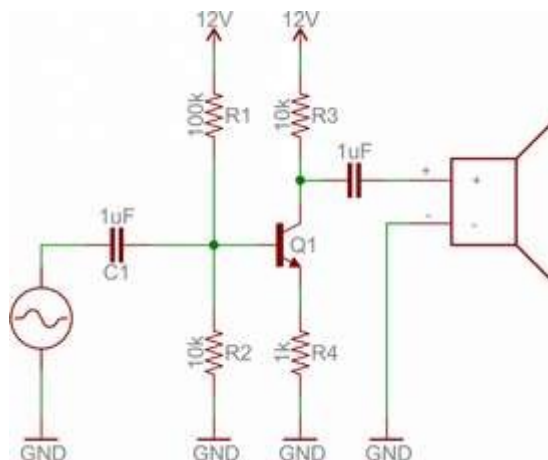
### 10.1 Gemeenschappelijke zender

De gemeenschappelijke emitter is een van de populairdere transistoropstellingen. In deze schakeling is de emitter verbonden met een spanning die gemeenschappelijk is aan zowel de basis als de collector (meestal massa). De basis wordt de signaalingang en de collector wordt de uitgang.



#### Gemeenschappelijke zender

De common emitter schakeling is populair omdat deze zeer geschikt is voor **spanningsversterking**, vooral bij lage frequenties. Ze zijn bijvoorbeeld geweldig voor het versterken van audiosignalen. Als je een klein ingangssignaal hebt van 1,5V piek-tot-piek, kun je dat versterken tot een veel hogere spanning met een iets gecompliceerdere schakeling, zoals:



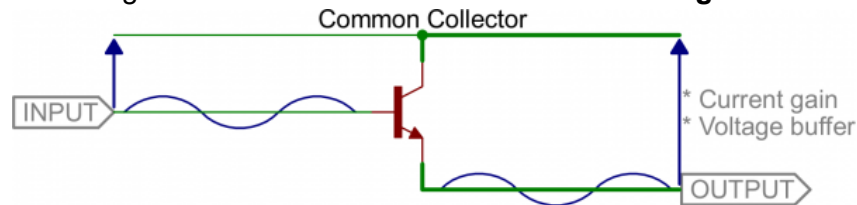
#### Gemeenschappelijk emittercircuit



Een eigenaardigheid van de gemeenschappelijke emitter is echter dat deze het ingangssignaal **omkeert** (vergelijk met de omvormer van de vorige pagina!).

## 10.2 Gemeenschappelijke Collector (Emitter Volger)

Als we de collectorpen verbinden met een gemeenschappelijke spanning, de basis gebruiken als ingang en de emitter als uitgang, hebben we een gemeenschappelijke collector. Deze configuratie staat ook bekend als een **emittervolger**.

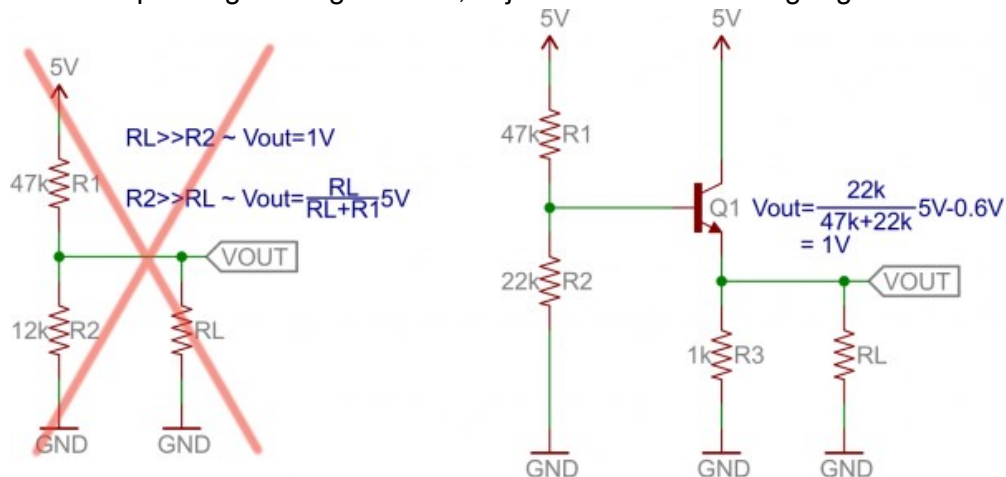


### Gemeenschappelijke verzamelaar

De gemeenschappelijke collector doet geen **spanningsversterking** (in feite zal de spanning uit 0,6V lager zijn dan de spanning in). Daarom wordt deze schakeling ook wel een spanningsvolger genoemd.

Deze schakeling heeft een groot potentieel als **stroomversterker**. Daarnaast maakt de hoge stroomversterking in combinatie met een spanningsversterking van bijna 1 deze schakeling tot een geweldige spanningsbuffer. Een **spanningsbuffer** voorkomt dat een belastingscircuit ongewenst interfereert met het circuit dat het aanstuurt.

Als je bijvoorbeeld 1V aan een belasting wilt leveren, kun je voor de gemakkelijke weg kiezen en een spanningsdeler gebruiken, of je kunt een emittervolger gebruiken.

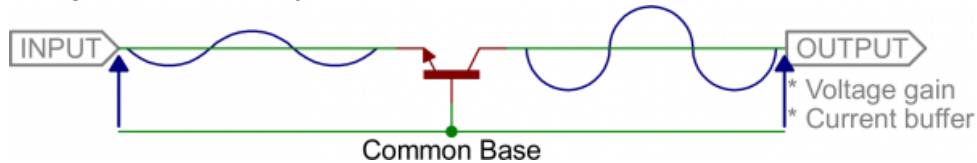


### Gemeenschappelijk collectorcircuit

Naarmate de belasting groter wordt (wat omgekeerd betekent dat de weerstand lager wordt), daalt de uitgang van de spanningsdeler. Maar de uitgangsspanning van de emittervolger blijft constant, ongeacht de belasting. Grotere belastingen kunnen een emittervolger niet "zwaarder belasten", omdat ze kunnen schakelen met grotere uitgangsimpedanties.

### 10.3 Gemeenschappelijke basis

We zullen het hebben over de gemeenschappelijke basis om dit gedeelte enigszins af te sluiten, maar dit is de minst populaire van de drie fundamentele configuraties. In een gemeenschappelijke basisversterker is de emitter de ingang en de collector de uitgang. De basis is gemeenschappelijk voor beide.



#### Gemeenschappelijke basis

De gemeenschappelijke basis is als het ware de anti-emitter-follower. Het is een fatsoenlijke spanningsversterker en de stroom in is ongeveer gelijk aan de stroom uit (eigenlijk is de stroom in iets groter dan de stroom uit).

De common base schakeling werkt het best als een **stroombuffer**. Het kan een ingangsstroom opnemen bij een lage ingangsimpedantie en dezelfde stroom leveren aan een uitgang met een hogere impedantie.

### 10.4 Samenvatting

Deze drie versterkerconfiguraties vormen het hart van veel ingewikkelder transistorversterkers. Ze hebben allemaal toepassingen waarin ze uitblinken, of ze nu stroom, spanning of buffering versterken.

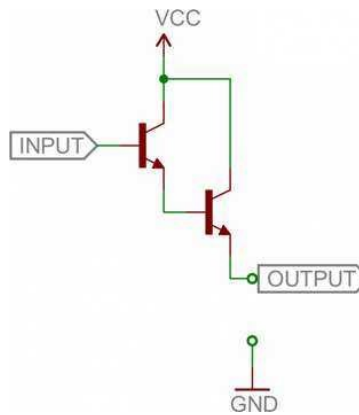
	Gemeenschappelijk e zender	Gemeenschappelijk verzamelprogramm a	Gemeenschappelijk e basis
Spanningsversterkin g	Medium	Laag	Hoog
Huidige winst	Medium	Hoog	Laag
Ingangsimpedantie	Medium	Hoog	Laag
Uitgangsimpedantie	Medium	Laag	Hoog

## 11 Meertrapsversterkers

We kunnen nog wel even doorgaan over de grote verscheidenheid aan transistorversterkers die er zijn. Hier zijn een paar snelle voorbeelden om te laten zien wat er gebeurt als je de bovenstaande eentraps versterkers combineert:

#### Darlington

De Darlington-versterker laat een gemeenschappelijke collector in een andere lopen om een versterker **met hoge stroomsterkte te** creëren.



### Meertraps versterkers

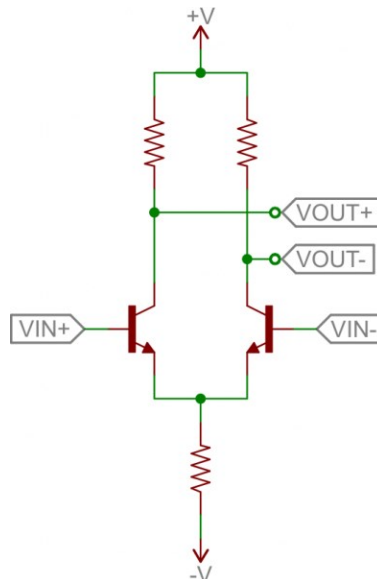
De spanning uit is ongeveer gelijk aan de spanning in (min ongeveer 1,2V-1,4V), maar de stroomversterking is het product van twee transistorversterkingen. Dat is  $\beta^2$  -- meer dan 10.000!

Het Darlington paar is een geweldig hulpmiddel als je een grote belasting moet aansturen met een zeer kleine ingangsstroom.

## 11.1 Differentiële Versterker

Een verschilversterker trekt twee ingangssignalen van elkaar af en versterkt dat verschil. Het is een cruciaal onderdeel van terugkoppelingsschakelingen, waarbij de ingang wordt vergeleken met de uitgang om een toekomstige uitgang te produceren.

Hier is de basis van de differentiële versterker:



### Differentiële versterker

Deze schakeling wordt ook wel een **langstaartpaar genoemd**. Het is een paar common-emitter schakelingen die met elkaar vergeleken worden om een differentiële uitgang te

produceren. Er worden twee ingangen toegepast op de basis van de transistors; de uitgang is een differentiële spanning over de twee collectors.

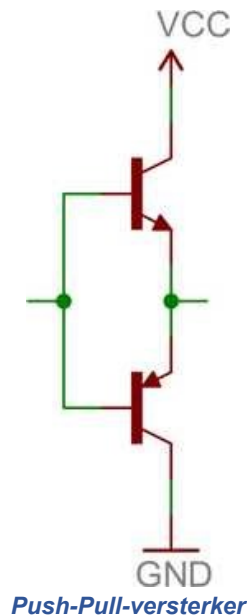
## 11.2 Push-Pull versterker

Een push-pull versterker is een nuttige "eindtrap" in veel meertraps versterkers. Het is een energiezuinige eindversterker die vaak wordt gebruikt om luidsprekers aan te sturen.

De fundamentele push-pull versterker gebruikt een NPN en PNP transistor, beide geconfigureerd als gemeenschappelijke collectoren:

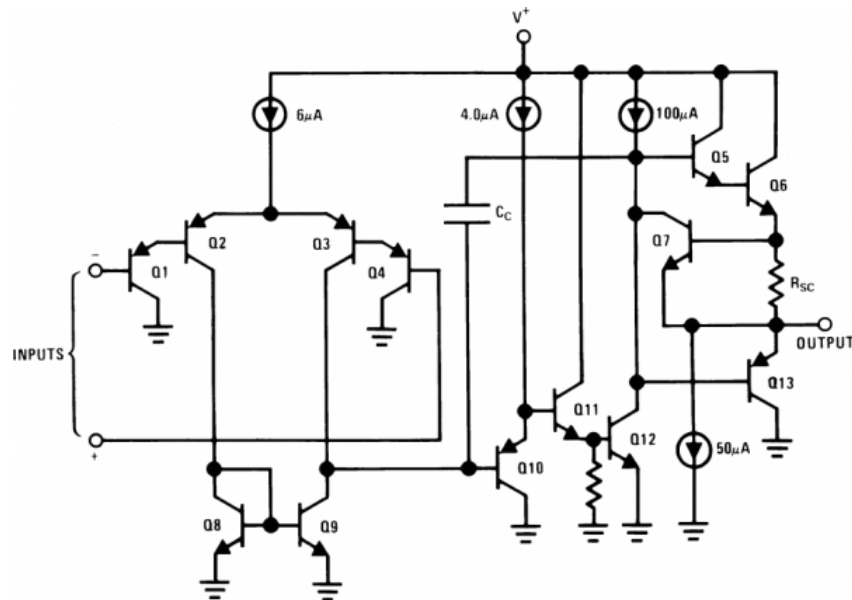
De push-pull versterker versterkt de spanning niet (de spanning uit zal iets minder zijn dan de spanning in), maar versterkt wel de stroom. Hij is vooral nuttig in bipolaire schakelingen (die met positieve en negatieve voedingen) omdat hij zowel stroom in de belasting kan "duwen" vanuit de positieve voeding als stroom eruit kan "trekken" en laten wegvloeien in de negatieve voeding.

Als je een bipolaire voeding hebt (of zelfs als je die niet hebt), is de push-pull een geweldige eindtrap voor een versterker, die fungeert als buffer voor de belasting.



## 11.3 Ze samenvoegen (een operationele versterker)

Laten we eens kijken naar een klassiek voorbeeld van een meertraps transistorschakeling: een Op Amp. Als je veel voorkomende transistorschakelingen kunt herkennen en hun doel begrijpt, kom je al een heel eind! Hier zie je de schakeling in een LM3558, een eenvoudige op-amp:



*De interne onderdelen van een LM358 operationele versterker. Herken je sommige versterkers?*

Er is hier zeker meer complexiteit dan je misschien bereid bent te verwerken; je ziet echter wel enkele bekende topologieën:

- Q1, Q2, Q3 en Q4 vormen de ingangstrap. Het lijkt veel op een gemeenschappelijke collector (Q1 en Q4) in een verschilversterker, toch? Het ziet er alleen ondersteboven uit omdat het PNP's gebruikt. Deze transistors vormen de differentiële ingangstrap van de versterker.
- Q11 en Q12 maken deel uit van de tweede trap. Q11 is een gemeenschappelijke collector en Q12 is een gemeenschappelijke emitter. Dit paar transistors buffert het signaal van de collector van Q3 en zorgt voor een hoge versterking als het signaal naar de eindtrap gaat.
- Q6 en Q13 maken deel uit van de eindtrap, en ze zouden er ook bekend uit moeten zien (zeker als je RSC negeert) -- het is een push-pull! Deze trap buffert de uitgang, waardoor hij grotere belastingen kan aansturen.
- Er zijn nog een aantal andere veel voorkomende configuraties waarover we het nog niet hebben gehad. Q8 en Q9 zijn geconfigureerd als een stroomspiegel, die eenvoudigweg de hoeveelheid stroom door de ene transistor kopieert naar de andere.

Na deze spoedcursus transistors verwachten we niet dat je begrijpt wat er in deze schakeling gebeurt, maar als je kunt beginnen met het herkennen van veelvoorkomende transistorschakelingen ben je op de goede weg!