

Trappen en structuren

[2020-2021, door Marius Versteegen]

Inleiding

Een aanvullende manier op “praktisch kirchhoff” om sneller het gedrag van circuits te doorgronden, is het gebruiken van bekende formules voor bekende deeltcircuits. Actieve trappen en andere structuren.

Ultra snel circuits lezen

Met het volgende stappenplan kun je vele circuits snel lezen:

- Denk in termen van bekende structuren en actieve “trappen”.
- Denk in termen van hun in- en uitgangen, en hoe ze op elkaar aansluiten.
- Bepaal het gedrag per trap apart.
- Gebruik indien nodig “Slimme Kirchhoff” voor het overige.
- Probeer ook dat te doen “per trap”.

Bekende structuren

In voorgaande documenten (AC/DC, Practische Electronica, Basiselectronica) zijn er al een aantal structuren voorbij gekomen waarvan het gedrag al bepaald is:

- **LD filter** ($f_0 = 1/(2\pi RC)$)
- **HD filter** ($f_0 = 1/(2\pi RC)$)
- **C opladen** ($\tau = RC, C = Q / V$)
- **C ontladen** ($\tau = RC, C = Q / V$)
- **weerstandsdeler** ($V_{Rx} = V_{tot} * (R_x / R_{tot})$)
- **vervangingsweerstand** ($R_v = R_1 + R_2, 1/R_v = 1/R_1 + 1/R_2$)
- **vervangingscapaciteiten** ($1/C_v = 1/C_1 + 1/C_2, C_v = C_1 + C_2$)
- **Diode** (0.8V stroomvoerend)
- **Zenerdiode** (XV stroomvoerend)
- **Vereenvoudigde transistormodellen**
(zie ook: actieve “trappen”)

(Straks) bekende actieve “trappen”

- **BJT als schakelaar**
- **MOSFET als schakelaar**
- **BJT als spanningsvolger**
- **BJT als stroombron**
- **BJT als stroomspiegel**
- **Referentiespanning met diodes en/of zeners**
- **Opamp configuraties**
(besproken in een ander document)

Binnen die “trappen” evt “supercomponenten”

- BJT als Diode
- Low-VceSat Darlington
- Current-efficient Darlington

Opknippen in actieve “trappen”

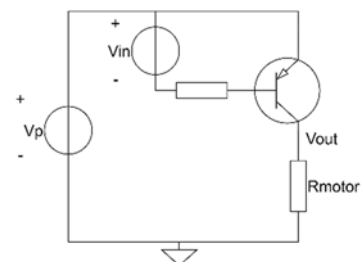
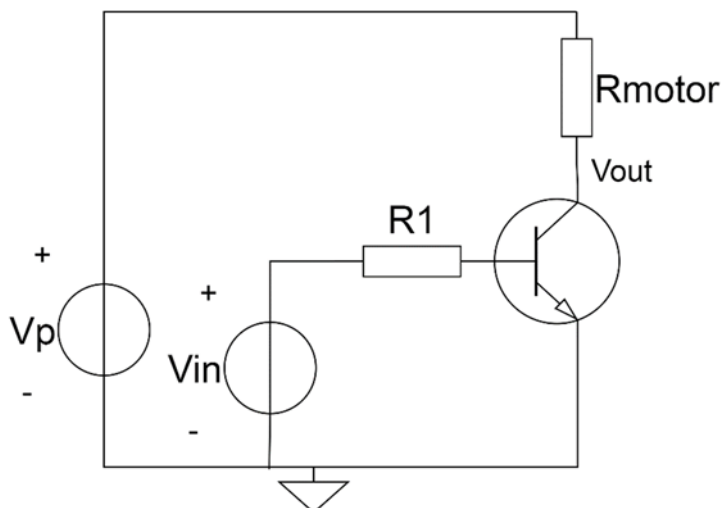
Een belangrijke truc om de analyse van een schakeling te vereenvoudigen, is het opknippen in achtereenvolgende “trappen”. Vaak legt een signaal een pad door een circuit af via verschillende “trappen”. Dat zijn “losstaande” delen van een circuit, waarvan het gedrag goed bekend is. Op de overgang tussen 2 opeenvolgende trappen zijn er 2 mogelijke situaties:

1. De uitgangsweerstand van de ene trap is **laag**, en de ingangsweerstand van de andere (volgende) trap is **hoog**. In dat geval is er sprake van een “**spanningskoppeling**”.
2. De uitgangsweerstand van de ene trap is **hoog**, en de ingangsweerstand van de andere (volgende) trap is **laag**. In dat geval is er sprake van een “**stroomkoppeling**”.

We zetten hier even de belangrijkste trappen op een rijtje, zodat je in staat bent om ze te herkennen en (bijna-) zonder rekenen hun gedrag in een schakeling te herkennen.

De hierna volgende discussie van de transistortrappen is gebaseerd op NPN transistoren, maar zou vergelijkbaar zijn met PNP transistoren. Voor PNP transistoren is de positieve voedingsrail wat voor NPNS de ground of negatieve voedingsrail is. De varianten met PNP transistoren zijn bij elke trap “in het klein” aan de rechterkant afgebeeld.

De NPN als schakelaar



Kenmerken:

- Stroomvoorziening van **basis** kan worden aan en uitgeschakeld
- Emitter aan aarde.
- Collector via weerstand aan **positieve** voeding.

Vereenvoudigd gedrag:

- Als basisstroom dan $V_{out} = V_p$
else $V_{out} = 0V$

Ingangsimpedantie, uitgangsimpedantie: Hoog op laag

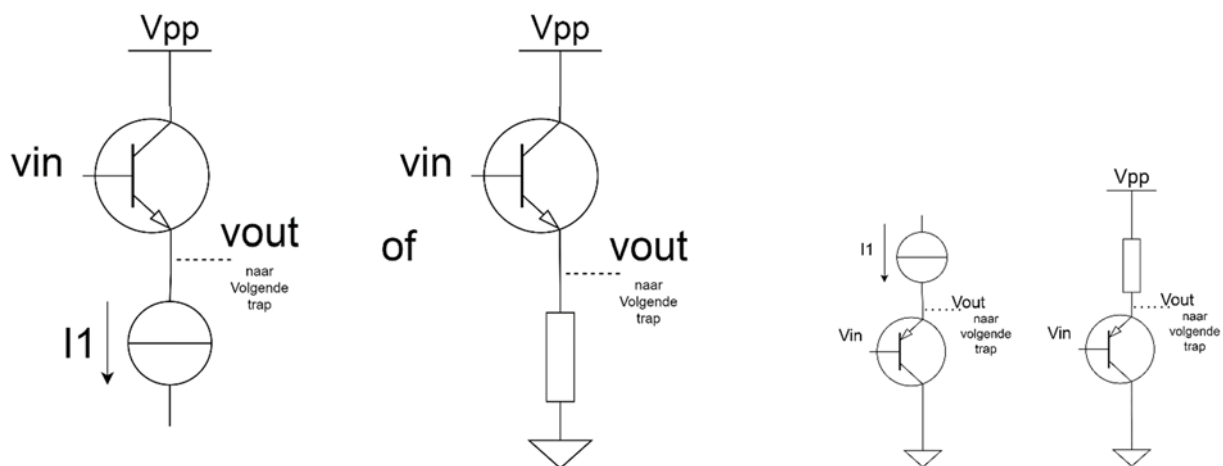
V_{in} vormt een laagimpedante spanningsbron (idealiter 0Ω uitgangsweerstand).

T1 met R1 in de basis kan relatief hoogimpedant (via R1) aangestuurd worden.

De uitgang kan laagimpedant (vergeleken R_{motor}) geschakeld worden: bij benadering een kortsluiting naar aarde.

PNP als schakelaar: zelfde, maar dan omgekeerd (positieve voeding en aarde verwisselen in het verhaal)

Een emittervolger / spanningsvolger / spanningsbuffer



Kenmerken:

- Emitter aan stroombron, of via weerstand naar aarde.
- Collector aan positieve voeding

Vereenvoudigd gedrag:

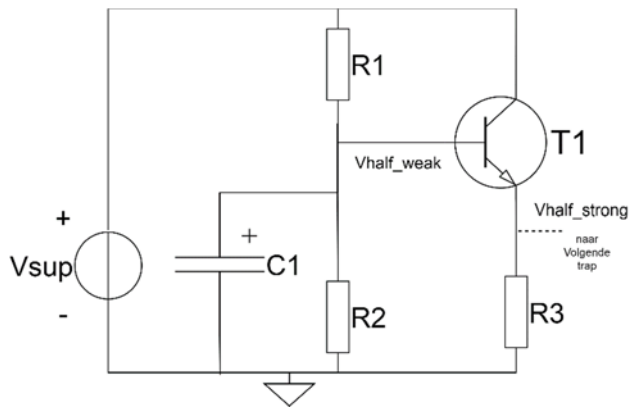
- $I_b = 0A$
- $V_{out} = V_{in} - 0.8V$
- $I_e = I_c$

Ingangsimpedantie, uitgangsimpedantie:

Het is een trap met hoge ingangsweerstand op V_{in} (dus is zelf spanningsgestuurd) en lage uitgangsweerstand op V_{out} (dus geeft spanningssturing aan volgende trap).

Effect in woorden: v_{in} wordt met $0.8V$ verlaagd doorgegeven naar v_{out} , waar het die spanning **met een lage uitgangsweerstand** aanbiedt, waardoor het **belast** kan worden zonder dat de spanning (veel) inzakt.

Voorbeeld van een toepassing: een storingsvrije voedingsspanning



Stel je voor dat je een adapter hebt die voedingsspanning V_{sup} levert, en dat je behoefte hebt aan een schone, tweede voedingsspanning met ongeveer de spanning $V_{sup}/2$.

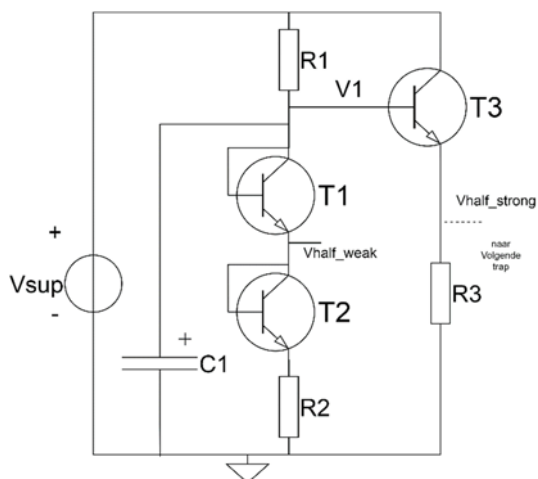
Voor het maken van een spanning $V_{sup}/2$ kunnen we zoals we weten een weerstandsdeler gebruiken die bestaat uit twee gelijke weerstanden. Bijvoorbeeld met weerstanden $R1 = R2 = 10k\Omega$. Om de spanning mooi storingsvrij te maken, kunnen we hem afvlakken met condensator $C1$. Die filtert dan storing weg onder de frequentie $f_c = \frac{1}{2\pi \frac{R1}{2} C1}$ (want vanuit $C1$ gezien staan weerstanden $R1$ en $R2$ parallel aan elkaar voor wisselspanning). Om die kantelfrequentie zo laag mogelijk te maken, moet het product tussen $R1$ en $C1$ dus zo groot mogelijk zijn. Grote condensatoren zijn duur. Dat betekent dat $R1$ (en dus ook $R2$) groot moet zijn.

Maar een probleem van grote $R1$ en $R2$, is dat de halve voedingsspanning v_{half_weak} een heel zwakke spanning is: als je er een klein stroompje uit trekt, zakt die spanning makkelijk in. De uitgangsweerstand van v_{half_weak} is immers nogal hoog, zoals hierbovenuitgelegd: $R1/2$.

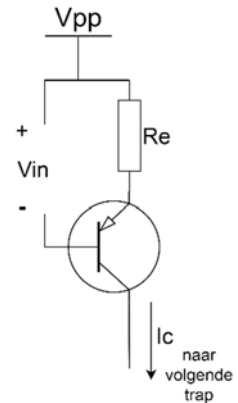
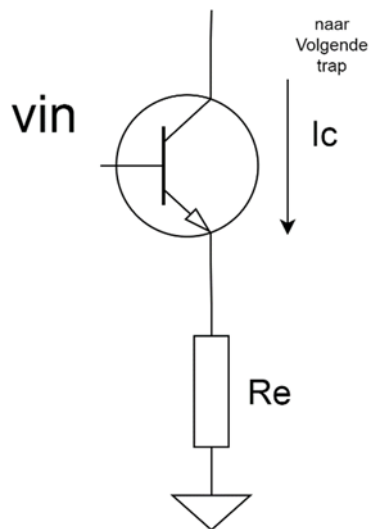
Gelukkig gebruiken we vervolgens de “emitter-volger-trap”, waardoor onze zelfgemaakte voedingsspanning bij dezelfde belastingsstroom veel minder inzakt.

Trucje

De bovenstaande oplossing levert een stabiele, spanning met als waarde de halve voedingsspanning, verlaagd met 0.8V. Met twee extra als diode geschakelde transistoren kunnen we ervoor zorgen dat de halve voedingsspanning resulteert zonder die verlaging met 0.8V (ga zelf na waarom):



NPN als stroombron / spanning naar stroom omzetter



Kenmerken:

- **Emitter** via weerstand naar **aarde**.
- **Collector** niet met **voeding** verbonden.

Vereenvoudigd gedrag:

- $I_b = 0A$
- $I_c = (V_{in} - 0.8V) / R_e$

Ingangsimpedantie, uitgangsimpedantie:

Het is een trap met hoge ingangsweerstand (beta maal R_e , om precies te zijn), en is dus **spanningsgestuurd**. De trap heeft ook een hoge uitgangsweerstand zijn uitgang (dus geeft **stroomsturing** aan volgende trap).

Effect in woorden: v_{in} wordt met 0.8V verlaagd doorgegeven naar v_{out} , waar het die spanning **met een lage uitgangsweerstand** aanbiedt, waardoor het **belast** kan worden zonder dat de spanning (veel) inzakt.

Spanning-stroom omzetter

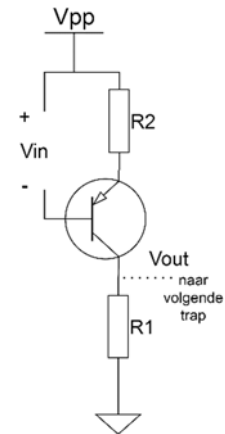
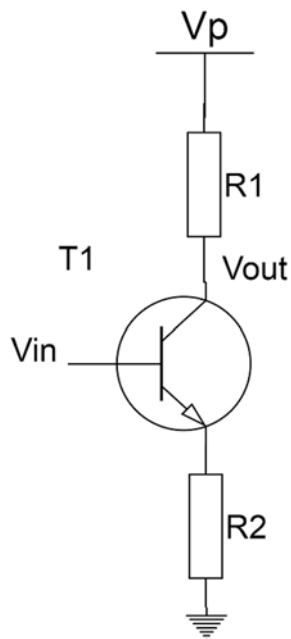
Zoals je kunt zien aan het gedrag, is dit een spanning (V_{in}) naar stroom (I_c) omzetter, ofwel een "Transconductantie". Dat werkt nog steeds als V_{in} bestaat uit een DC component en een AC component: $V_{in} = V_{inDC} + v_{in}$ en $I_c = I_{cDC} + i_c$

(de AC component worden geschreven zonder leading capital)

Er geldt voor de AC component:

- $i_c = v_{in} / R_e$

NPN als spanningsversterker



Kenmerken:

- **Emitter** via weerstand naar **aarde**.
- **Collector** via weerstand naar **positieve voeding**.

Vereenvoudigd gedrag:

- $V_{out} = V_p - (V_{in} - 0.8V) * R1/R2$
- $v_{out} = -v_{in} * R1/R2$

Bij het bovenstaande is verondersteld dat input en outputspanning zowel een DC als een AC component hebben. De ac componenten zijn geschreven zonder capital.

$V_{in} = V_{inDC} + v_{in}$ en $V_{out} = V_{outDC} + v_{out}$.

Ingangsimpedantie, uitgangsimpedantie:

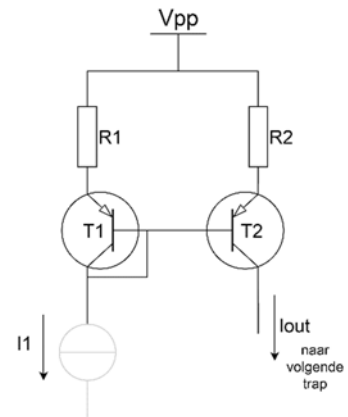
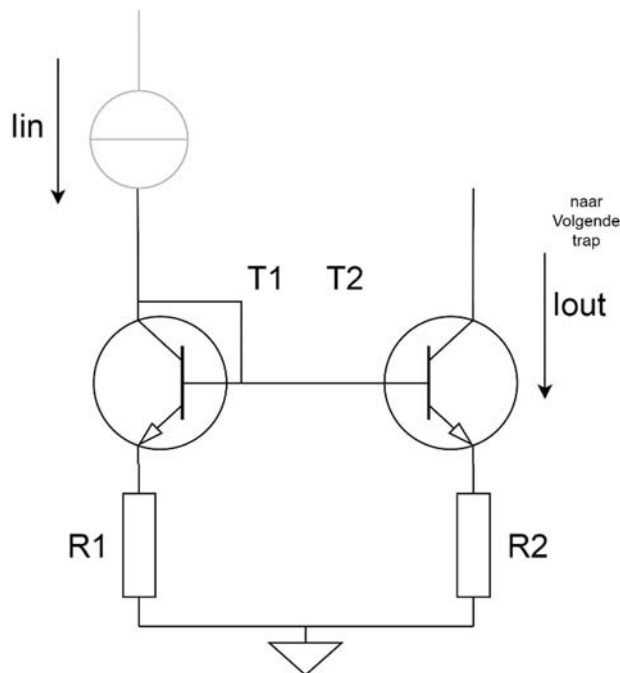
Het is een trap met hoge ingangsweerstand (beta maal $R2$, om precies te zijn), en is dus **spanningsgestuurd**. De trap heeft een “medium uitgangsweerstand” aan zijn uitgang ($R1$), en kan als spanningssturing dienen voor een volgende trap met een hogere ingangsweerstand.

Werking

$T1$ vormt met $R2$ een spanning-naar-stroom omzetter: $I_{c1} = (V_{in} - 0.8V)/R2$.

Die stroom loopt door $R1$, waardoor hij dankzij de wet van ohm wordt “omgezet” naar een spanning.

NPNs als Stroomspiegel / Stroomversterker



Kenmerken:

- Twee NPNs, van beide Emitter via weerstand naar aarde.
- Ingaande NPN heeft collector en basis met elkaar verbonden.
(en is daarmee een diode geworden)

Vereenvoudigd gedrag:

- $I_{out} = I_{in} * R1/R2$

Ingangsimpedantie, uitgangsimpedantie:

Het is een trap met lageingangsimpedantie (pakweg $R1$), en is dus **stroomgestuurd**. De trap heeft een hoge uitgangsweerstand zijn uitgang (dus geeft zelf **stroomsturing** aan volgende trap).

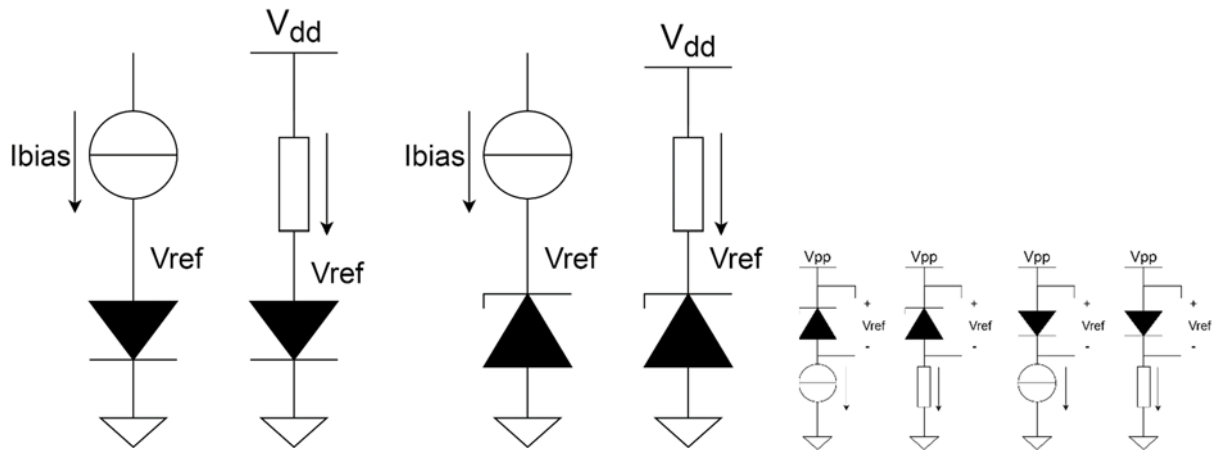
Meervoudige uitgangen:

Parallel aan $T2, R2$ kun je desgewenst meerdere stroom-uitgangen toevoegen: $T3, R3$ $T4, R4$, etc

Diode(s) of zener als referentiespanningsbron

In veel gevallen heb je behoefte aan een schone, stabiele spanning die lager is dan de voedingsspanning en ook onafhankelijk is van de voedingsspanning.

Een structuur die daarvoor wordt gebruikt heet een "referentiespanningsbron".



Bovenstaand zijn 4 voorbeelden van referentiespanningsbronnen die zijn gemaakt door een instelstroom te laten lopen door een diode of zenerdiode. Diodes en zeners “begrenzen” de spanningsval als ze stroomvoerend zijn op een vaste, bekende spanning, ongeacht de precieze grootte van de stroom die er doorheen loopt.

Alternatief kunnen er meerder diodes en of zenerdiodes met elkaar in serie worden gezet om alternatieve referentiespanningen te maken.

Een transistor als diode

Een bipolaire transistor waarvan de basis met de collector verbonden is.

Je kunt afleiden dat zo’n structuur zich gedraagt als een gewone diode. En van zo’n gewone diode weten we dat je die mag benaderen door een spanningsbron van 0.8V als hij stroomvoerend is, en door een open verbinding als hij dat niet is:

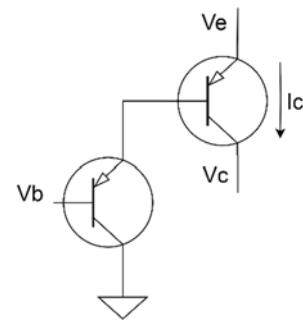
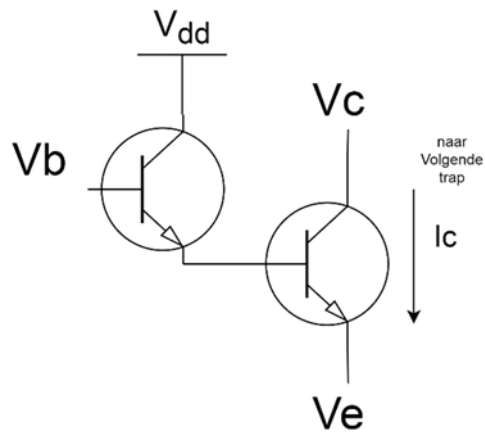


Zo’n transistor als diode kan op zijn beurt weer voorkomen in andere bekende trappen, zoals een referentiespanningsbron.

Darlington

Je kunt twee bipolaire transistoren combineren tot een super-transistor, een zogenaamde “Darlington”. Daar zijn twee gangbare varianten van: de “low-VceSat” variant, en de “efficient current” variant.

Een low- V_{ceSat} darlington



Kenmerken:

- **Emitter** van ingangs-transistor verbonden **met basis** van uitgangstransistor.
- **Collector** van ingangs-transistor verbonden met de positieve **voedingsspanning**.

Vereenvoudigd gedrag:

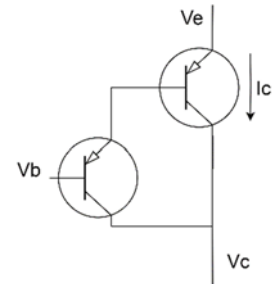
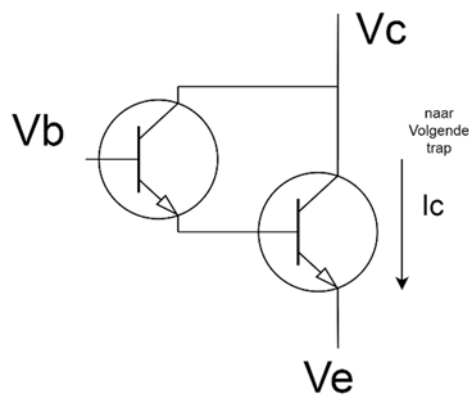
De twee transistoren samen gedragen zich als een super-transistor, met een stroomversterking die het product is van de afzonderlijke transistors. Over de “super be-junctie” valt een spanning van 1.6V. De saturatiespanning is gelijk aan die van de uitgangstransistor. Er gaat wel stroom verloren via de collector van de ingangstransistor.

Als de darlington als schakelaar wordt gebruikt (zie “NPN als schakelaar”), kan de stroom door die ingangstransistor wel significant worden (omdat de beta van de uitgangstransistor dan inzakkt). Door de grote spanningsval over de ingangstransistor kan het product $V \cdot I$ dan groot worden, wat betekent dat de ingangstransistor (te) heet kan worden. De “current efficiënt Darlington” heeft dat probleem niet.

Samengevat:

- $\beta_{Darling} = \beta_{Tin} \cdot \beta_{Tout}$
- $V_{beDarling} = 1.6V$
- $V_{ceSatDarling} = 0.2V$

Een current-efficient darlington



Kenmerken:

- **Emitter** van ingangs-transistor verbonden **met basis** van uitgangstransistor.
- **Collector** van ingangs-transistor verbonden **met collector** van uitgangstransistor.

Vereenvoudigd gedrag:

De twee transistoren samen gedragen zich als een super-transistor, met een stroomversterking die het product is van de afzonderlijke transistors. Over de “super be-junctie” valt een spanning van 1.6V. De saturatiespanning is gelijk aan die van de uitgangstransistor (0.2V) plus een be-junctiespanning (0.8V).

In tegenstelling tot de low-VceSat darlington gaat bij deze variant alle versterkte stroom door de uitgang. Een nadeel van deze variant vergeleken de “Low-VceSat” darlington is de verhoogde saturatiespanning. Als je deze darlington als schakelaar gebruikt, blijft er dus minder spanningsval over voor de load.

Samengevat:

- $\beta_{\text{Darling}} = \beta_{\text{Tin}} * \beta_{\text{Tout}}$
- $V_{\text{beDarling}} = 1.6\text{V}$
- $V_{\text{ceSatDarling}} = 1.0\text{V}$

Opamp Trappen

Er zijn ook een aantal standaard opamp-configuraties. Als je eenmaal weet wat die doen, kun je het gedrag van de betreffende trap in een oogwenk beschrijven.

De opamp-configuraties staan beschreven in een apart document.

Appendices

In de appendices vind je verdere verdieping.

De content van de appendices is geen tentamenstof.

Appendix 1: Extreme impedanties

Ingangsweerstand / uitgangsweerstand / impedantie: Opknippen in “Trappen”

Een belangrijke truc om een schakeling te begrijpen is het opknippen in achtereenvolgende “trappen”. Vaak legt een signaal een pad door een circuit af via verschillende “trappen”.

Trappen

Je herkent trappen aan extreme impedanties op ingang of uitgang.

Er zijn twee **extreme** uitgangen:

1. Een **hoog impedante** uitgang (hoge uitgangsweerstand)
2. Een **laag impedante** uitgang (lage uitgangsweerstand)

Hoogimpedante uitgang

Een hoog impedante uitgang heeft een **stroombron karakter**.

Voor het gemak nemen we aan dat de uitgangsweerstand **oneindig** is.

De volgende dingen hebben een hoogimpedante uitgang:

1. Een **stroombron**
2. De **collector** van een NPN transistor, **tenzij** teruggekoppeld of **verzadigd**.
3. De **drain** van een MOS transistor, **tenzij** teruggekoppeld of **dichtgeknepen**.

De laatste 2 zal niemand verbazen. In ons vereenvoudigde transistor model voor de NPN en de MOS transistor zijn de collector en de drain immers een kant van een stroombron.

Laag impedante uitgang

Een laag impedante uitgang heeft een **spanningsbron karakter**.

Voor het gemak nemen we aan dat de uitgangsweerstand 0 Ohm is.

De volgende dingen hebben een laagimpedante uitgang:

1. Een **spanningsbron**
2. De **emitter** van een stroomvoerende NPN transistor, mits collector niet verbonden met basis (dan is het een gewone diode geworden).
3. De **source** van een stroomvoerende MOS transistor mits drain niet verbonden met gate (dan is het een soort “dioden” geworden).
4. Een **teruggekoppelde** drain of collector mits respectievelijk source en emitter met ground of voeding verbonden.
5. De uitgang van een **opamp**.

Nummer 5 zal je niet verbazen: alle trappen van opamps zijn opgebouwd met transistoren. De uitgang is dus altijd verbonden met een emitter, source, collector of drain.

Als een opamp als comparator wordt gebruikt, wordt een eindtransistor in verzadiging geschakeld, waardoor de uitgangsweerstand laag is. Als een opamp anderszins wordt gebruikt, is er sprake van terugkoppeling die ervoor zorgt dat de uitgangsweerstand laag is.

Hoogimpedante ingang

Voor een hoog impedante ingang nemen we voor het gemak aan dat ze **oneindig** groot is.

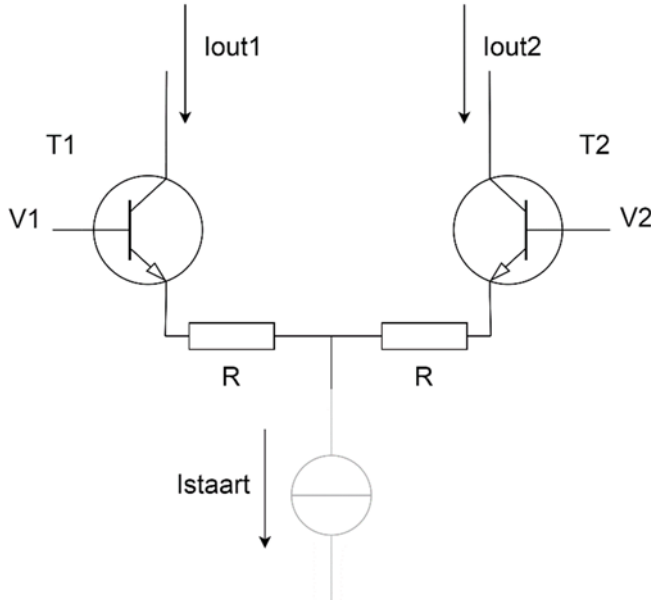
De volgende dingen hebben een hoogimpedante ingang:

1. De gate van een MOSFET.
2. De basis van een NPN die vanaf zijn emitter geen pad van “spanningsbronnen” naar ground heeft. (NB: een diode of be-overgang die stroom voert benaderen we ook als “spanningsbron”.)

Appendix 2: Meer trappen

Deze appendix bevat nog een aantal transistor-trappen. Ze zijn geen tentamenstof.

NPN verschiltrap



Kenmerken:

- Twee NPNs, de emitters met elkaar verbonden via **2 identieke weerstanden**.
- Een “**staart stroombron**” die een vaste stroom trekt tussen die weerstanden.

Vereenvoudigd gedrag:

- $I_{out2} - I_{out1} = (V2 - V1) / (2 R)$
- $I_{out1} + I_{out2} = I_{staart}$

Ingangsimpedantie, uitgangsimpedantie:

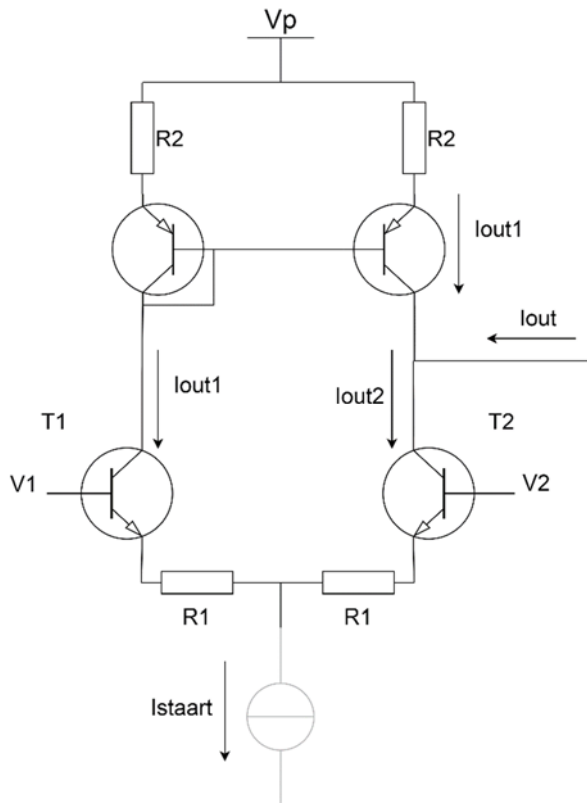
Het is een trap met lage ingangsimpedantie (pakweg $R1$), en is dus **stroomgestuurd**. De trap heeft een hoge uitgangsweerstand zijn uitgang (dus geeft zelf **stroomsturing** aan volgende trap).

Functie:

Met een verschiltrap kun je een verschil tussen twee ingangsspanningen meten.

Het wordt typisch toegepast in combinatie met een stroomspiegel aan de positieve voedingsspanning.

Voorbeeldtoepassing:



In het bovenstaande voorbeeld wordt lout1 gespiegeld en afgetrokken van lout2.

Resultaat:

$$lout = lout2 - lout1 \leftrightarrow$$

$$lout = (Vout2 - Vout1) / (2 R1)$$

Trappen zonder “degeneratieweerstanden”

Op chips zie je de volgende stappen ook wel terug zonder weerstanden (die zijn dan vervangen door draadverbindingen):

- Verschiltrap
- Stroomspiegel

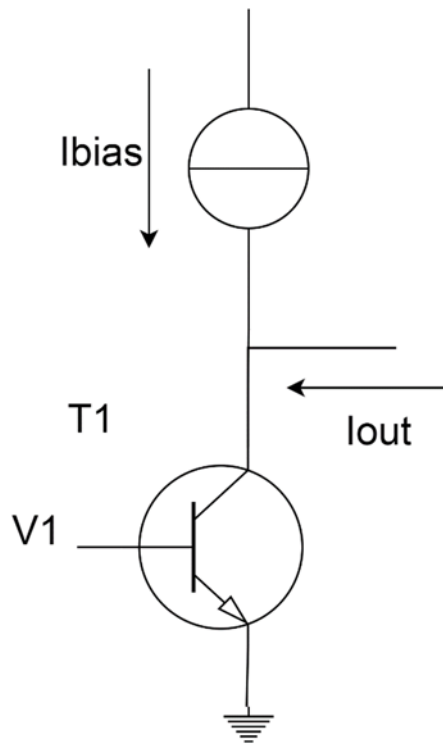
Het gedrag van de verschiltrap is dan voor kleine uitsturingen: $lout2 - lout1 = 20 \cdot I_{staart}$. Die versterking kan veel groter zijn dan met weerstanden.

De stroomspiegel spiegelt dan nog steeds stroom, zei het met veel meer ruis.

Buiten chips (op breadboards en printjes) kom je deze varianten niet tegen, omdat ze veel te gevoelig zijn voor temperatuurverschillen tussen beide transistoren.

(signaal-)versterkertrap

In circuits met feedback-loop(s), zoals de internals van een opamp komen ook “gain stages” / versterkertrappen voor. Dat is een combinatie van een transistor met een stroombron:



Vereenvoudigd gedrag:

- $I_{out} = 40 \cdot I_{bias} \cdot v1$

Werking:

- $v1$ (zonder capital) staat voor een kleine wisselspannings variatie van spanning $V1$.
- De "DC" component van $V1$ wordt door een (trage) feedbackloop zo geregeld dat de DC-component van de stroom door $T1$ gelijk is aan I_{bias} .
- Die I_{bias} bepaalt het instelpunt op de exponentiele transconductantie-karakteristiek (die van V_{be} naar I_c).
- Omdat die karakteristiek nogal stijl loopt, kun je zo de maximale versterking uit een transistor halen.