



# Inhoudsopgave

8	Versterkende elementen, basisschakelingen .....	2
8.1	Wat leer je in dit hoofdstuk .....	2
8.2	Veldeffect-transistor (Field Effect Transistor, FET) .....	2
8.2.1	Opbouw, schemasymbool en werking .....	2
8.2.2	Versterking .....	6
8.2.3	MOSFET's .....	9
8.3	Elektronenbuizen .....	9
8.3.1	Opbouw en werking .....	9
8.3.2	De triode .....	10
8.3.3	De penthode .....	12
8.3.4	Schemasymbolen, vergelijking van FETs en buizen .....	13
8.4	Bipolaire transistoren .....	15
8.4.1	Opbouw, schemasymbool en werking .....	15
8.4.2	Grootheden en karakteristieken .....	16
8.4.3	Regelen van de basisstroom .....	18
8.5	De drie basisschakelingen .....	21
8.5.1	Inleiding .....	21
8.5.2	Combinatie A. Gemeenschappelijke source/kathode/emitterschakeling .....	23
8.5.3	Combinatie B. Gemeenschappelijke gate/rooster/gateschakeling .....	24
8.5.4	Combinatie C. Gemeenschappelijke drain- anode- en collectorschakeling ..	25
8.5.5	De basisschakelingen samengevat .....	26

## 8 Versterkende elementen, basisschakelingen

### 8.1 Wat leer je in dit hoofdstuk

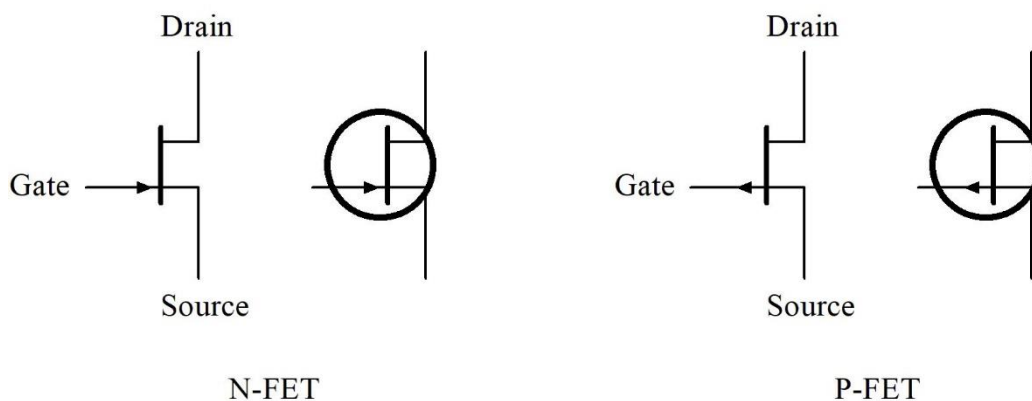
We bespreken veldeffect-transistoren (FET's), enkele soorten buizen en 'gewone' transistoren. Ze hebben gemeen dat ze, afhankelijk van de manier waarop ze zijn geschakeld, spanning, stroom of beide kunnen versterken. We beginnen met FET's, daarna komen de buizen en tenslotte de transistoren. FET's en buizen zetten spanningsveranderingen om naar stroomveranderingen, die daarna weer worden omgezet in spanningsveranderingen. Transistoren zijn stroomversterkers, maar in een transistorschakeling kan spanning ook worden versterkt.

FET's en buizen lijken dus in hun gedrag meer op elkaar dan op transistoren. Daarom behandelen we FET's en buizen direct na elkaar en dan pas de transistoren. Voor alle drie groepen kijken we naar de manier van instellen en de basisschakelingen. Dat zijn er voor elk soort element drie. Die drie lijken nogal op elkaar. Daarom behandelen we ze in deze korte versie per manier en niet per versterkend element.

### 8.2 Veldeffect-transistor (Field Effect Transistor, FET)

#### 8.2.1 Opbouw, schemasymbool en werking

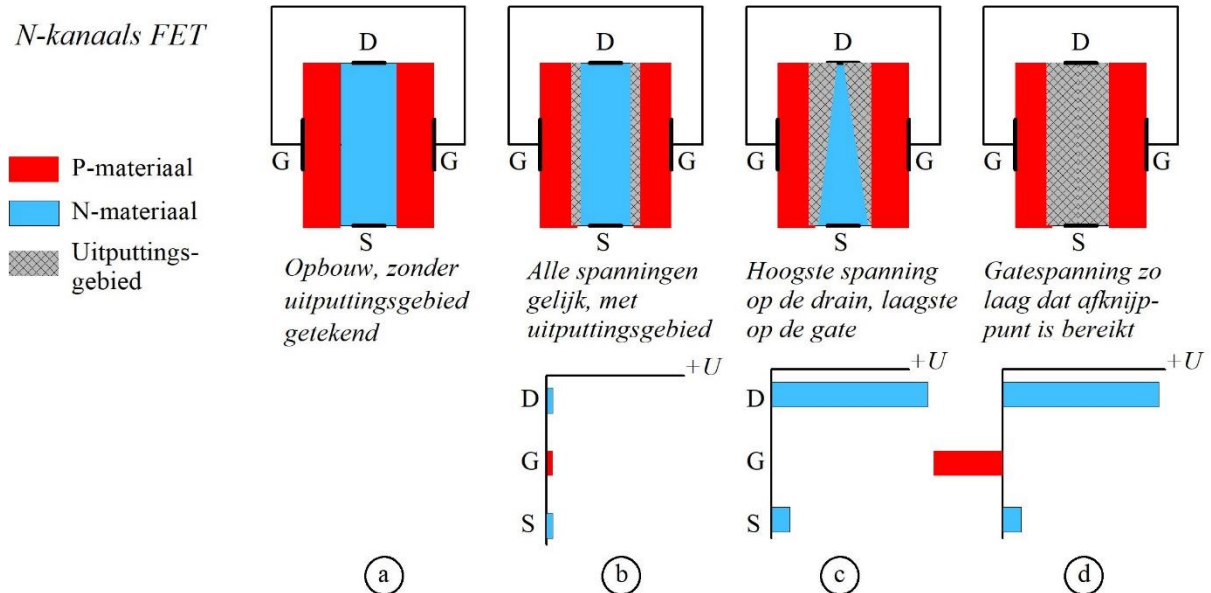
Het type FET dat we hier behandelen is meestal van silicium (Si). Hij heeft één PN-junctie. Die moet gesperd staan. De stroom loopt langs, niet door de junctie. Het deel waar de stroom doorheen loopt, heet het *kanaal*. We hebben N- en P-kanaals FETs, afgekort N- of P-FET. Het kanaal heeft twee aansluitingen, *source* en *drain*: ingang en uitgang voor de ladingsdragers. Bij de P-FET zijn dat gaten, bij de N-FET elektronen. De aansluiting aan de andere kant van de junctie heet de *gate*. Figuur 8.2-1 toont schemasymbolen en aansluitingen.



*Figuur 8.2-1. Schemasymbolen van een N-FET (links) en een P-FET (rechts). De symbolen met en zonder cirkel betekenen hetzelfde. Die met cirkel zijn ouderwets. De richting van de pijl van de gate geeft aan of het om een N- of P-FET gaat.*

Langs de gesperde junctie tussen gate en kanaal ligt de uitputtingszone (Hoofdstuk 7). De N-kanaals FET dient als voorbeeld. Bij een P-kanaals FET werkt alles net zo, maar met omgekeerde polariteit van spanningen en omgekeerde stroomrichtingen.

Figuur 8.2-2 toont de opbouw en de belangrijkste toestanden van een N-FET.



*Figuur 8.2-2. Werking van een N-kanaals FET. Boven: opbouw en uitputtingszone. Onder: spanningen op de elektroden grafisch weergegeven. De kleur stelt het materiaal voor, niet de polariteit.*

*a. opbouw; D is drain, G is gate en S is source. De gate bestaat in de tekening uit twee elektrisch verbonden delen.*

*b. spanningen op alle aansluitingen gelijk. De uitputtingszone is overal even breed.*

*c. drainspanning positiever dan sourcespanning; gatespanning het laagst. Doordat de spanning tussen gate en kanaal van source naar drain toeneemt, wordt de uitputtingszone van source naar drain breder en het geleidende deel van het kanaal dunner.*

*d. gatespanning zo laag dat het hele kanaal uitputtingszone is: het afknijppunt is bereikt.*

**Afbeelding a** toont alleen de opbouw.

**Afbeelding b** toont de situatie met gelijke spanningen op source, gate en drain. Als ze alle drie dezelfde spanning hebben loopt er geen stroom. Wel is het kanaal, op een smalle uitputtingszone na, geleidend. Bij kleine spanningen tussen source en drain blijft dat zo, maar dan loopt er wel stroom. Het kanaal is dan te beschouwen als een weerstand waarvan de grootte wordt bepaald door de spanning tussen gate en kanaal.

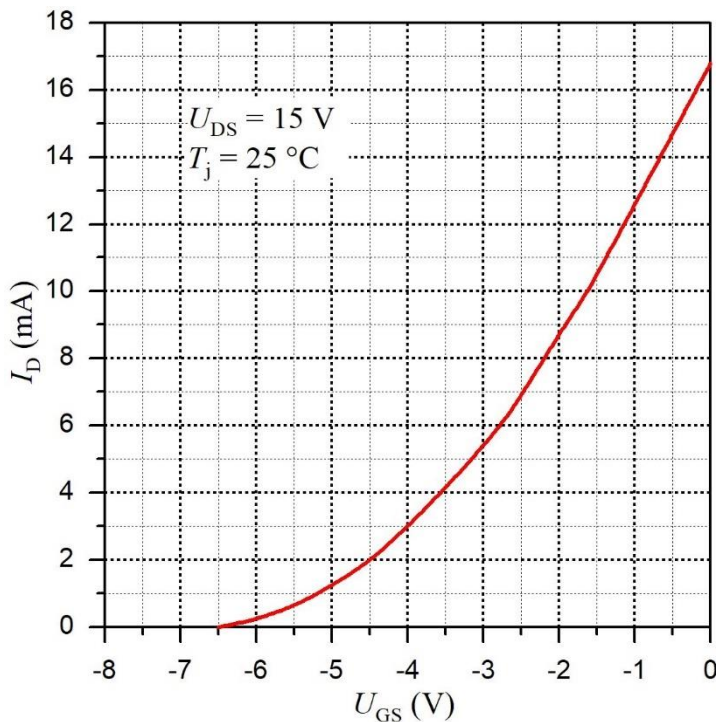
**Afbeelding c** toont het effect van een grotere spanning  $U_{DS}$  tussen drain en source bij een gatespanning die iets lager is dan die op de source. De spanning  $U_{GS}$  tussen gate en source is dan negatief. Doordat de kanaalspanning van source naar drain positiever wordt, is er in dezelfde richting een oplopende spanning tussen kanaal en gate. De uitputtingszone in het kanaal wordt daardoor van source naar drain wijder en het geleidende restant van het kanaal smaller. Het gevolg is een van source naar drain toenemende kanaalweerstand. Die

toename is sterker, naarmate  $U_{DS}$  hoger is. Gevolg: de invloed van  $U_{DS}$  op de stroomsterkte in het kanaal is beperkt: hogere spanning veroorzaakt meer weerstand.

**Afbeelding d** toont het effect van een sterk negatieve gatespanning. Het kanaal is over de volle breedte uitputtingszone geworden, zodat de stroom geblokkeerd is. De gatespanning waarbij dit gebeurt, heet het *afknijppunt*. De half-Engelse term is *pinch-off-spanning*.

De stroom door de FET neemt toe, naarmate de spanning  $U_{GS}$  tussen gate en source stijgt.  $U_{GS}$  moet daarbij lager blijven dan de drempelspanning van de junctie tussen gate en kanaal, anders wordt het systeem een diode in doorlaatrichting. Omgekeerd neemt de stroom af naarmate  $U_{GS}$  lager wordt, totdat het afknijppunt is bereikt en de stroom stopt.

In een FET wordt zo een stroom geregeld met behulp van een elektrisch veld: een spanning stuurt een stroom. In grafiekvorm ziet dat eruit als in Figuur 8.2-3.

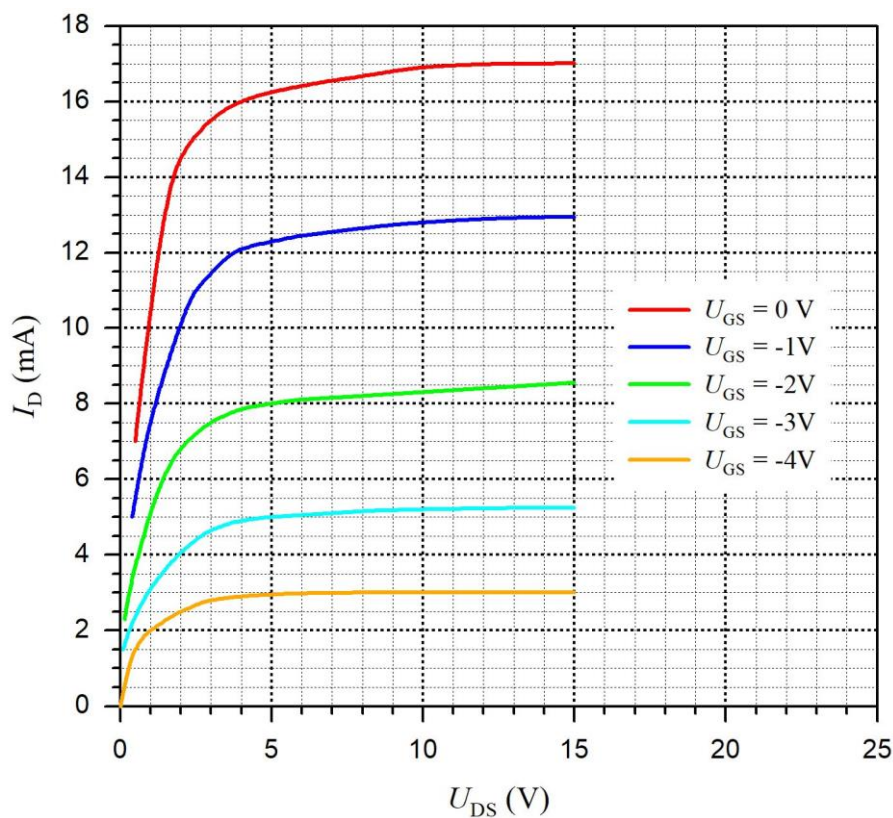


*Figuur 8.2-3. Drainstroom  $I_D$  uitgezet tegen de spanning  $U_{GS}$  tussen gate en source van een N-FET. Omdat ook de spanning tussen  $U_{DS}$  tussen drain en source enige invloed op de stroom heeft, hoort de bijbehorende waarde van  $U_{DS}$  in de grafiek te staan. Verder staat er de bijbehorende junctietemperatuur  $T_j$  in, want ook die heeft invloed op het gedrag van halfgeleiders en dus ook van FET's.*

In Figuur 8.2-3 ligt het afknijppunt bij  $U_{GS} \approx -6,5$  V. De helling van de grafiek heet de *steilheid*, symbool  $S$ .  $S$  is niet voor elke waarde van  $U_{GS}$  gelijk, want de grafiek is krom. De definitie van  $S$  is dan ook niet eenvoudig  $I_{DS}/U_{GS}$ , maar *de veroorzaakte verandering van  $I_{DS}$  gedeeld door de veroorzakende verandering van  $U_{GS}$* .  $S$  wordt uitgedrukt in mA/V.

Steilheid is het omgekeerde van weerstand. Weerstand is spanning gedeeld door stroom (wet van Ohm), steilheid is (verandering van) stroom gedeeld door (verandering van) spanning.

Aan de drainkant gebeurt iets totaal anders. In Figuur 8.2-2c kunnen we zien dat de voor stroom beschikbare ruimte in het kanaal, dat is de ruimte buiten de uitputtingszone, kleiner wordt naarmate de spanning  $U_{GS}$  toeneemt. Meer spanning, grotere weerstand dus. Gevolg: de drainstroom  $I_D$  neemt vanaf een zekere waarde van de drainspanning  $U_{DS}$  bij verder toenemende  $U_{DS}$  maar weinig toe. De grafiekenbundel in Figuur 8.2-4 laat dat zien. Bij elke gatespanning  $U_{GS}$  hoort een andere grafiek van ongeveer dezelfde vorm.

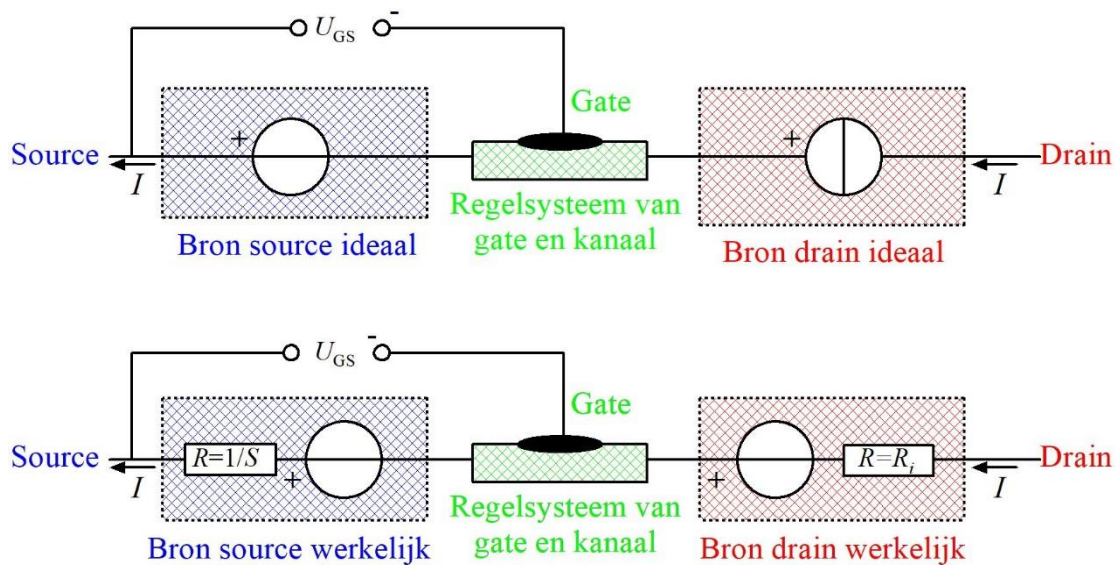


Figuur 8.2-4.  $I_D$ - $U_{DS}$  karakteristieken van de N-FET BF245C. We zien de drainstroom  $I_D$  tegen de drain-source-spanning  $U_{DS}$  bij verschillende  $U_{GS}$ .  $T_j$  is de junctietemperatuur waarvoor de grafieken gelden. Data uit Philips databoek *Field-effect transistors*.

De bijna horizontale delen van de grafieken geven het gebied van de drain-source spanning  $U_{DS}$  weer, waarin  $U_{DS}$  maar weinig invloed heeft op de drainstroom  $I_D$ . Een spanning met weinig invloed op stroom betekent een hoge weerstand. Die weerstand heet de *inwendige weerstand*  $R_i$  van de FET.  $R_i$  is in het gebied van de vlakke karakteristieken veel groter dan  $1/S$ . De versterking van de FET berust op de verhouding van die twee grootheden.

### 8.2.2 Versterking

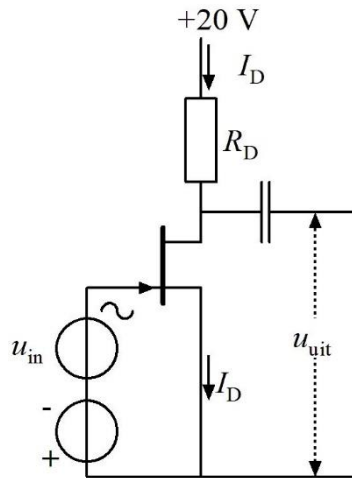
Volgens de grafiek van Figuur 8.2-3 veroorzaakt een verandering van  $U_{GS}$  van  $-2\text{ V}$  naar  $-1\text{ V}$ ,  $1\text{ V}$  een verandering van de drainstroom  $I_D$  met ongeveer  $3,9\text{ mA}$ .  $S = 3,9\text{ mA/V}$  komt overeen met  $1/S \approx 260\ \Omega$ . Figuur 8.2-4 laat ook zien dat een verhoging met  $10\text{ V}$  van  $5$  naar  $15\text{ V}$  van de drainspanning  $U_{DS}$  bij een  $U_{GS}$  van  $-2\text{ V}$  ongeveer  $0,6\text{ mA}$  stroomverandering veroorzaakt. Dat komt neer op  $R_i \approx 17\text{ k}\Omega$ . Bij deze FET zit dus ongeveer een factor  $70$  tussen  $1/S$  en  $R_i$ , of wiskundig wat netter uitgedrukt:  $R_i \approx 70/S$ . Vergeleken met het source-gate-systeem is de drainaansluiting dus hoogohmig. Trekken we dit in het extreme door, dan ontstaat een voorstelling van een 'ideale' FET (Figuur 8.2-5, boven). Die heeft aan de source  $0\ \Omega$  -een ideale spanningsbron- en aan de drain een oneindige  $R_i$ , een ideale stroombron. De 'werkelijke' FET zien we onderin.



Figuur 8.2-5. Boven: model van een ideale N-kanaals FET als omvormer van een spanningsbron (de source) naar een stroombron (de drain). Onder: de werkelijke situatie met weerstand  $1/S$  in serie met de spanningsbron en de stroombron op de drain is veranderd in een spanningsbron ter grootte van  $R_i$ .

Aan de sourcekant zit in de werkelijke FET een niet-ideale ('onvolkomen') spanningsbron met inwendige weerstand  $1/S$  en aan de drainkant een onvolkomen stroombron met inwendige weerstand  $R_i$ . De onvolkomen stroombron op de drainkant is gelijkwaardig aan een onvolkomen spanningsbron met dezelfde inwendige weerstand.

We bekijken nu Figuur 8.2-6, waarin een FET-schakeling is getekend.



Figuur 8.2-6. FET-schakeling met signaalbron ( $u_{in}$ ), drainweerstand  $R_D$  en versterkte signaalspanning  $u_{uit}$  aan de drain. De kleine letters  $u$  geven aan dat het wisselspanning betreft. De condensator laat alleen het wisselspanningsdeel van de drainspanning door.

De drainstroom  $I_D$  is een onzuivere wisselstroom. De grootte van het wisselstroomdeel wordt bepaald door de wisselspanning  $u_{in}$  en de steilheid  $S$ . De spanning tussen drain en source heeft nauwelijks invloed op de kanaalstroom  $I_D$  als gevolg van de hoge  $R_i$ .

Voor spanningsversterking groter dan 1 (grotere signaalspanning op de uitgang dan op de ingang) moet  $R_D$  groter zijn dan  $1/S$ . Een getallenvoorbeeld:

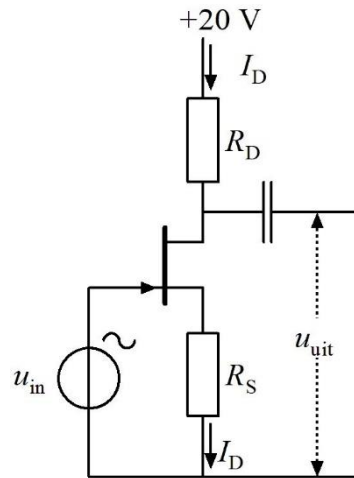
Stel de steilheid  $S$  is 4 mA/V en  $R_D$  is 3 k $\Omega$ . Een signaalwisselspanning  $u_{in}$  van 0,1 V produceert een signaalwisselstroom van 0,4 mA in het kanaal van de FET. Op de drain moet die stroom door 3 k $\Omega$  worden ge'duwd'. Daarvoor is een spanning  $u_{uit}$  nodig van 0,4 mA maal 3 k $\Omega$  is 1,2 V. De spanningsversterking is dus 12 (van 0,1 V naar 1,2 V). De spanningsversterking  $A_u$  van de FET in Figuur 8.2-6 is dus gelijk aan  $SR_D$ . De vergelijkingen ( 8.2-1) en ( 8.2-2) geven de wiskundige basis.

$$u_{uit} : u_{in} = R_D : \frac{1}{S} \quad (8.2-1)$$

In vergelijking ( 8.2-1) staat de spanningsversterking  $A_u$  van de schakeling in Figuur 8.2-6, want de spanningsversterking is de verhouding van  $u_{uit}$  en  $u_{in}$ . Dus

$$A_u = \frac{u_{uit}}{u_{in}} = \frac{R_D}{1/S} = SR_D \quad (8.2-2)$$

Nu de spanningsversterking in eenzelfde schakeling als in Figuur 8.2-6, maar dan met een sourceweerstand  $R_S$ . De schakeling zien we in Figuur 8.2-7.



Figuur 8.2-7. FET-schakeling als in Figuur 8.2-6, maar met sourceweerstand  $R_S$ . Ook hier zijn de wisselspanningscomponenten aan in- en uitgang met een kleine letter  $u$  aangegeven.

De weerstand  $R_S$  heeft twee effecten.

- Hij veroorzaakt een negatieve gatespanning  $U_{GS}$ , doordat de gelijkspanning op de source positief wordt ten opzichte van de gate die 0 V blijft. Als de source positief is ten opzichte van de gate, is de gate negatief ten opzichte van de source. Vandaar de afwezigheid van de negatieve spanningsbron in de gateleiding die er in Figuur 8.2-6 wel is.
- De steilheid van de schakeling wordt verlaagd doordat  $R_S$  in serie staat met  $1/S$ . Dat heeft gevolgen voor de spanningsversterking: die gaat omlaag, want de effectieve steilheid wordt kleiner. De weerstand van het source-gatecircuit is dan niet meer  $1/S$ , maar  $R_S + 1/S$ .

Vanaf de voorlaatste stap van vergelijking ( 8.2-2) is dit gemakkelijk te verwerken: vul op de plaats van  $1/S$  de uitdrukking  $1/S + R_S$  in en klaar:

$$A_u = \frac{u_{uit}}{u_{in}} = \frac{R_D}{1/S + R_S} \quad (8.2-3)$$

Als  $R_S$  veel groter is dan  $1/S$ , dan is vergelijking ( 8.2-3) te benaderen met

$$A_u = \frac{u_{uit}}{u_{in}} \approx \frac{R_D}{R_S} \quad (8.2-4)$$

Door het verwaarlozen van  $1/S$  zal vergelijking ( 8.2-4) altijd een te hoge uitkomst voor de spanningsversterking  $A_u$  opleveren, maar als handige vuistregel voldoet hij.

Er zijn andere versterkerschakelingen met een J-FET mogelijk dan die in Figuur 8.2-7. Die behandelen we na de elektronenbuizen en de transistoren, omdat die elementen versterkerschakelingen hebben die lijken op die met FET's, ook al gebeurt er binnenin de elementen niet hetzelfde.



### 8.2.3 MOSFET's

De benaming MOSFET is de afkorting van Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor. Het is geen examenstof, maar MOSFET's zitten tegenwoordig in allerlei amateurapparatuur. We noemen ze dus wel, maar zijn er kort over. De naam vertelt de opbouw van de gate: een laagje Metaal op een laagje siliciumOxide (zeg maar glas) op halfgeleider-(Semiconductor-)materiaal. In dit type FET spelen het metaal en de oxidelaag samen dezelfde rol als de diodejunctie van de gate bij de N- of P-FET, maar dit type gate geleidt nooit, ongeacht de gatespanning. De gateweerstand is veel hoger dan bij de gesperde junctie van een J-FET. Een MOSFET is daardoor kwetsbaar voor doorslag als gevolg van statische spanningen die bijvoorbeeld optreden bij vastpakken met de hand. De modernere types zijn daar redelijk tegen beveiligd. Wie meer wil weten, kan terecht op bijvoorbeeld <https://nl.wikipedia.org/wiki/MOSFET>.

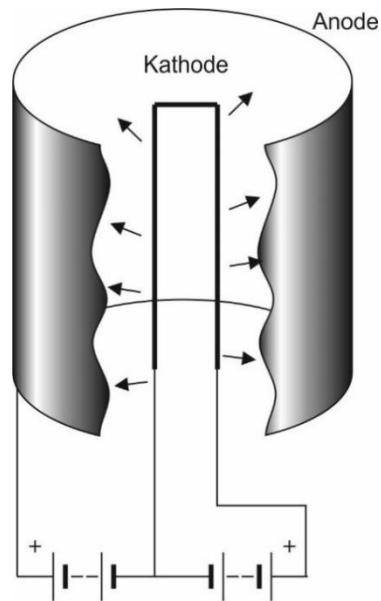
## 8.3 Elektronenbuizen

### 8.3.1 Opbouw en werking

Elektronen kunnen zich goed verplaatsen in vacuüm (luchtledig). In lucht botsen ze tegen luchtmoleculen, waardoor de vaart er binnen een onzichtbaar kleine afstand uit is. Lucht is dus een goede isolator. Het probleem met geleiding in vacuüm is, hoe je elektronen in een vacuüm krijgt. Dat lukt pas als de geleider zo heet is dat hij een rode tot oranje gloed uitstraalt. Hoge temperatuur betekent sneller trillende atomen en moleculen. Als de trilling sterk genoeg is, worden elektronen buiten de geleider geslingerd. In vacuüm kunnen ze zich van de geleider verwijderen. Doordat de geleider positief wordt door het verlies aan elektronen, keren elektronen er ook weer op terug. De zaak is in evenwicht als er evenveel elektronen de gloeiende geleider verlaten als erop terugkeren. Een gloeiende geleider in vacuüm heeft dan ook een elektronenwolk om zich heen.

Brengen we een tweede en koelere geleider in het vacuüm en voorzien we die van een positieve spanning ten opzichte van de gloeiende draad, dan worden de elektronen door de tweede geleider aangetrokken. Zo ontstaat een elektronenstroom door het vacuüm. Doordat de tweede geleider niet heet is, kunnen de elektronen er wel in, maar er niet uit. Zo werkt de *vacuümdiode* die ook wel *buisdiode* wordt genoemd.

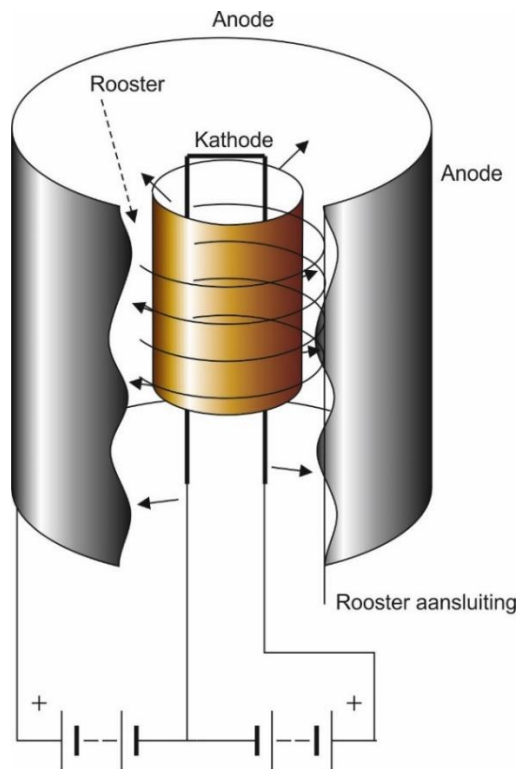
We zien daarvan een plaatje in Figuur 8.3-1. De gloeidraad is de kathode die elektronen uitzendt; de plaat eromheen de anode die ze opvangt. De gloeidraad die in het plaatje ook meteen kathode is, noemen we *direct verhit*. Bij de meeste buizen is de gloeidraad gevoed met wisselstroom en wordt hij omgeven door een dun buisje dat de eigenlijke kathode is. Dat heet *indirect verhit*.



*Figuur 8.3-1. Buisdiode. De kathode is hier een gloeidraad die elektronen uitzendt; de anode is de ronde plaat eromheen.*

### 8.3.2 De triode

Tussen kathode en anode kan een *rooster* worden opgenomen. Dat bestaat meestal uit een dunne draad die als een spiraal om de kathode ligt (Figuur 8.3-2).



*Figuur 8.3-2. De triode. De kathode is hier indirect verhit; de gloeidraad zit binnen de oranje gekleurde kathode. Het rooster is een dunne draad en de anode ziet eruit als in Figuur 8.3-1.*

Met de spanning op het rooster kan de elektronenstroom tussen kathode en anode worden geregeld. Dat lijkt op wat er in een FET gebeurt. Daarin regelt de spanning tussen source en gate de stroom van ladingdragers in het kanaal. Bij een N-FET moet de gatespanning negatief zijn ten opzichte van de source omdat de gatediode anders niet meer spert.

Bij een *triode*, want zo heet zo'n ding met kathode, rooster en anode, mag het rooster niet positief ten opzichte van de kathode worden. Dan werkt het als een tweede anode. Voor de rest gedraagt het rooster zich als de gate bij een N-FET. Er bestaat alleen geen P-vorm, want een buis kent alleen elektronen als ladingdrager.

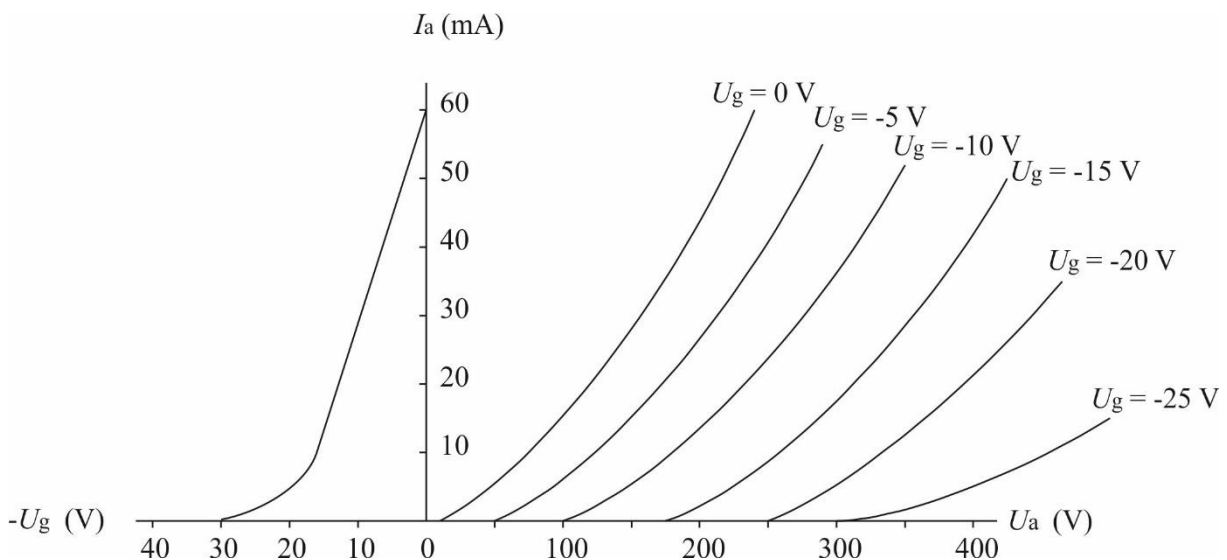
De versterking door een triode gaat ongeveer in zijn werk als bij een N-FET, maar in de buizenwereld zijn de spanningen veel hoger. Buizen voor klein vermogen hebben al gauw anodespanningen rond 200 of 250 V, bij zendbuizen met hoog vermogen kan die spanning in de kilovolts (kV) lopen.

Een triode heeft een steilheid  $S$  en een inwendige weerstand  $R_i$ , net als een FET. De namen van de drie elektroden verschillen wel. Tabel 8.3-1 geeft een overzicht.

Tabel 8.3-1. Benamingen van overeenkomstige elektroden bij FET en buis (triode)

Naam bij FET	Naam bij buis (triode)
Source	Kathode
Gate	Rooster (Engels: grid)
Drain	Anode

Het verhaal bij versterking is identiek aan dat bij de FET. Alleen heet de sourceweerstand bij de buis *kathodeweerstand* ( $R_k$ ) en de drainweerstand *anodeweerstand* ( $R_a$ ).



Figuur 8.3-3. Voorbeeld van een  $I_a/U_g$ -karakteristiek (steilheid, links) en  $I_a/U_a$ -karakteristieken van een triode.

Figuur 8.3-3 toont links de steilheidsgrafiek ( $I_a/U_g$ -karakteristiek) van een triode. Die lijkt sterk op de  $I_b/U_{GS}$ -karakteristiek van een FET. De  $I_a/U_a$ -karakteristiekenbundel van een triode, rechts in de figuur, lijkt echter helemaal niet op de  $I_b/U_{DS}$ -karakteristiekenbundel van een FET, zoals we die zagen in Figuur 8.2-4.

Dat komt vooral doordat het elektrisch veld van de anode van invloed is op de elektronenstroom uit de kathode. De afscherming ervan door het rooster is niet heel effectief. Wie Figuur 8.3-2 nog eens bekijkt, voelt dat wel aan. De inwendige weerstand van een triode is desondanks groot genoeg om spanningsversterking mogelijk te maken. Voor wie de lage spanningen bij FET's (en transistoren) gewend is, lijkt de inwendige weerstand in Figuur 8.2-4 lager dan hij in werkelijkheid is. Zowel  $S$  als  $R_i$  van FET en triode zijn qua grootte redelijk vergelijkbaar.

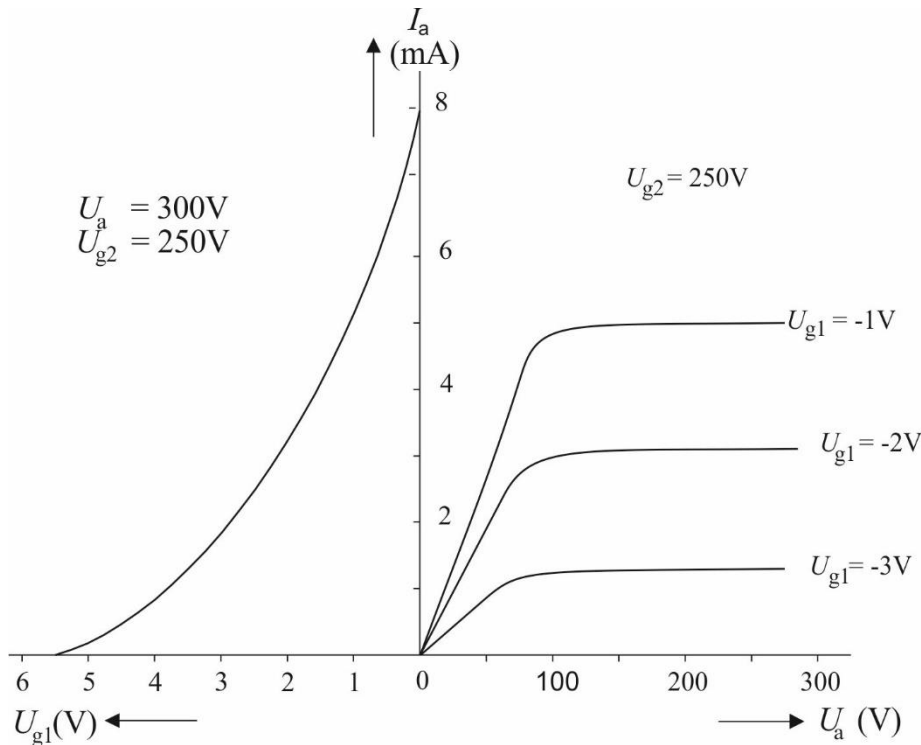
### 8.3.3 De penthode

De penthode is een (sterk) verbeterde triode. Een penthode heeft drie roosters. Het rooster dat het dichtst bij de kathode ligt, heet *stuurrooster*, meestal afgekort als  $g_1$ . De functie is dezelfde als het rooster van de triode: het regelen van de elektronenstroom van kathode naar anode. Het tweede rooster ( $g_2$ ) is positief. Het versnelt de elektronen en onttrekt daardoor een klein deel van de elektronenstroom aan de buis. Maar de grote meerderheid van de elektronen schiet er doorheen op weg naar de anode. Dit rooster schermt de invloed van het elektrisch veld van de anode op de kathode af, waardoor de invloed van de anodespanning op de elektronenstroom uit de kathode wordt verkleind. Dit tweede rooster heet daarom *schermrooster*.

De inwendige weerstand van een penthode is door het schermrooster (veel) groter dan die van een triode. Dat geldt ook voor de hoogst mogelijke spanningsversterking.

Voor een goede werking mag de schermroosterspanning niet worden beïnvloed door het te versterken signaal. Daarom is het schermrooster via een weerstand verbonden met een positieve spanning en met 0 V via een condensator. Weerstand en condensator vormen een laagdoorlaatfilter (Hoofdstuk 5). Dat verzwakt eventuele resten van de signaalspanning op de schermroosterspanning.

Het derde rooster ( $g_3$ ) is nodig, doordat het schermrooster de elektronen versnelt. Bij hun 'landing' op de anode kunnen ze zoveel energie hebben dat ze elektronen uit de anode losmaken. Dat maakt de anode tot een tweede elektronenbron. Dat verschijnsel heet *secundaire emissie*. Die leidt tot ongewenste effecten. Het derde rooster is verbonden met de kathode en negatief ten opzichte van de anode. 'Losgeslagen' elektronen worden daardoor meteen teruggestuurd naar de anode. Zo hebben ze geen invloed op wat er verder in de buis gebeurt. Bovendien remt het derde rooster de door het schermrooster versnelde elektronen af. Het derde rooster staat bekend onder verschillende namen: *remrooster*, *vangrooster* of *keerrooster* en wordt in databladen aangeduid met  $g_3$ . Een voorbeeld van een steilheidsgrafiek  $I_a/U_{g1}$  en een bundel  $I_a/U_a$ -karakteristieken van een penthode is weergegeven in Figuur 8.3-4.

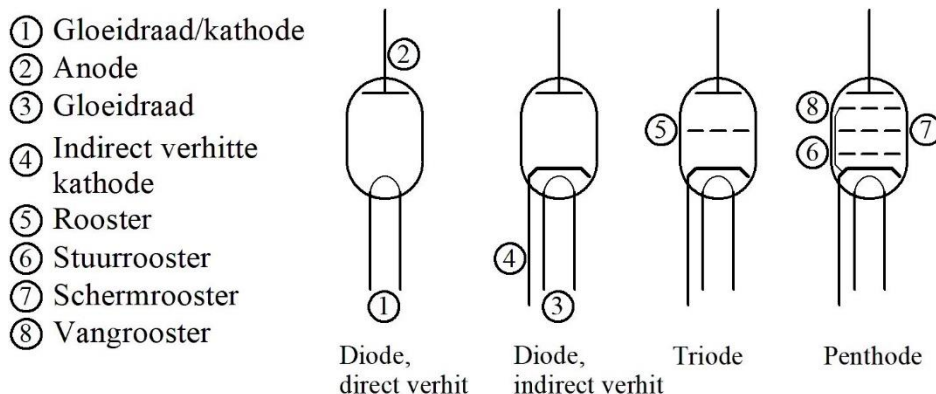


Figuur 8.3-4. Karakteristieken van een penthode, geldend bij een schermroosterspanning ( $U_{g2}$ ) van 250 V. De stuurroosterspanningen zijn aangegeven met  $U_{g1}$ . Links steilheid, rechts:  $I_a/U_a$ -karakteristieken.

De steilheidsgrafiek ziet er net zo uit als bij de triode (Figuur 8.3-3) of de FET in Figuur 8.2-3. De  $I_a/U_a$ -karakteristieken in Figuur 8.3-4 lijken niet op die van de triode. Ze doen meer denken aan de  $I_D/U_{DS}$ -karakteristieken van de FET (Figuur 8.2-4). Het verschil met de triode is een gevolg van de afschermdende werking van het schermrooster.

### 8.3.4 Schemasymbolen, vergelijking van FETs en buizen

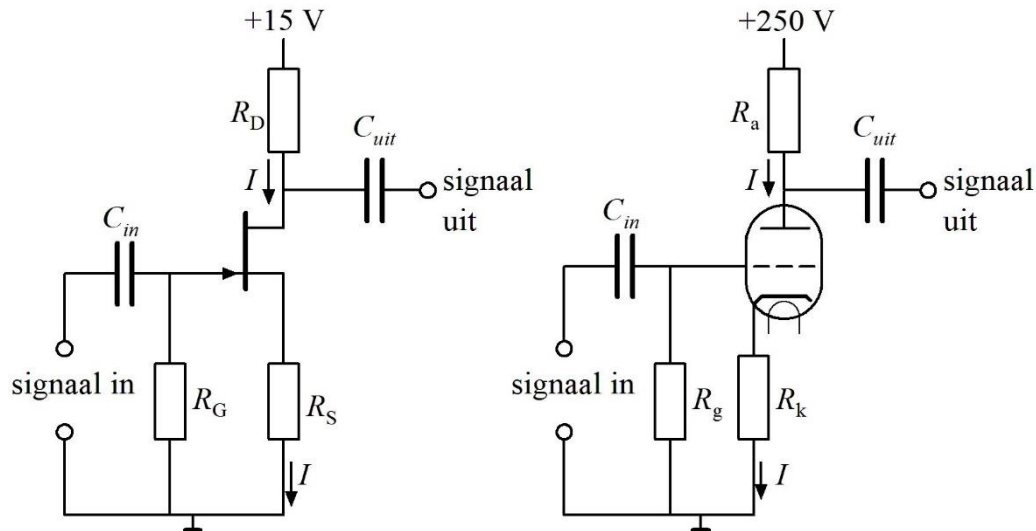
De schemasymbolen van alle behandelde buizen zien we in Figuur 8.3-5.



Figuur 8.3-5. Schemasymbolen voor diode, triode en penthode met benamingen van de samenstellende delen. Bij de penthode is het vangrooster intern verbonden met de kathode. Dat is meestal zo.

Er zijn meer soorten buizen dan getoond. Die vallen buiten de exameneisen.

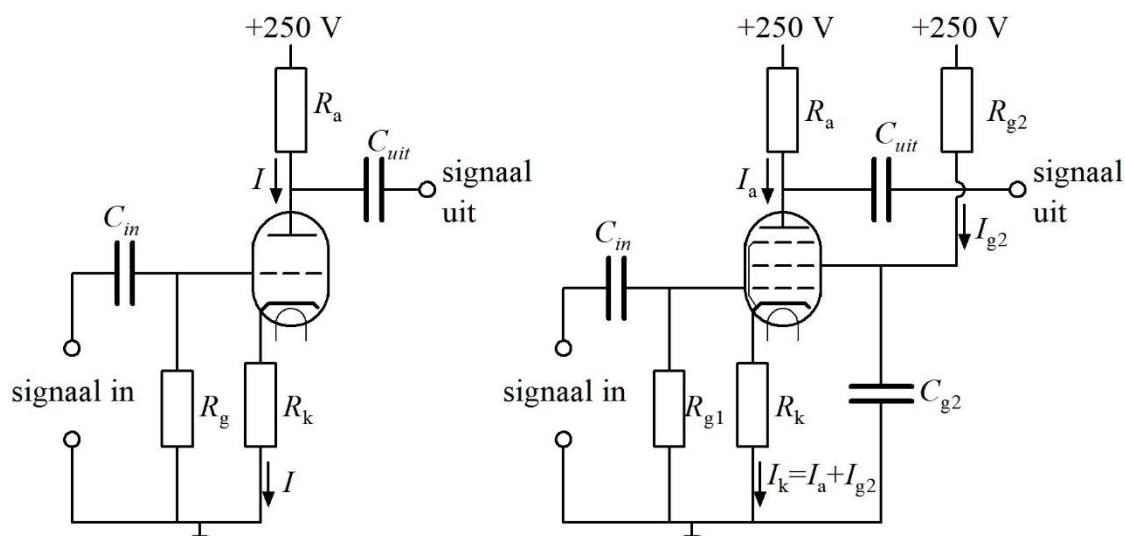
In Figuur 8.3-6 zien we twee versterkerschakelingen, één met een FET (links) en één met een triode (rechts).



Figuur 8.3-6. Versterkerschakeling met FET (links) en met triode (rechts). De gloeidraad van de triode is in buizenschema's zo vanzelfsprekend dat het voedingcircuit van de gloeidraad niet is opgenomen.

De gelijkenis is groot. Het verschil is de voedingsspanning. In buizenschema's wordt het gloeidraadcircuit meestal weggelaten, want een gloeidraad spreekt vanzelf. Vandaar het niet-aangesloten eindje gloeidraad van de triode.

De spanningsversterking is bij de triode iets kleiner dan anodeweerstand gedeeld door kathodeweerstand,  $R_a/R_k$ . De oorzaak is dezelfde als bij de FET:  $1/S$  staat in serie met  $R_k$ .



Figuur 8.3-7. Links dezelfde triodeschakeling als in Figuur 8.3-6, rechts een gelijkwaardige schakeling met een penthode, waarin het vangrooster binnenin de buis al is doorverbonden met de kathode.

Figuur 8.3-7 laat links dezelfde triodeschakeling zien als Figuur 8.3-6. Rechts zien we een gelijksoortige schakeling met een penthode. De penthodeschakeling lijkt ingewikkelder. Dat komt door het schermroostercircuit met het filter  $R_{g2}$  en  $C_{g2}$ , besproken in 8.3.3.

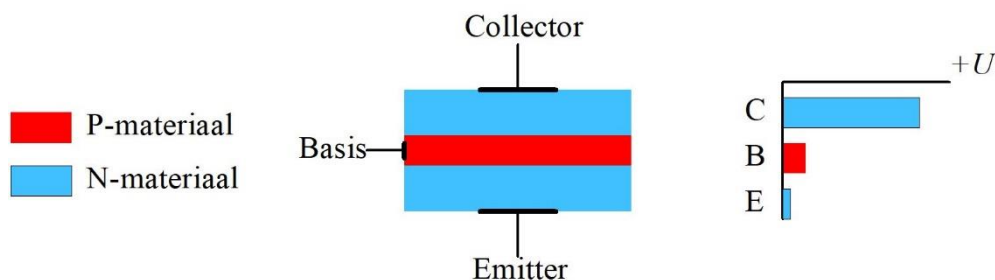
De elektronenstroom in de penthode splitst zich in anode- en schermroosterstroom. Voor wie voorkeur heeft voor de technische stroomrichting: de anode- en schermroosterstroom verenigen zich tot de kathodestroom, zoals in de figuur. De spanningsversterking van de schakeling is, zoals we inmiddels gewend zijn, iets kleiner dan de verhouding  $R_a/R_k$ .

## 8.4 Bipolaire transistoren

### 8.4.1 Opbouw, schemasymbool en werking

Bipolaire transistoren hebben twee PN-overgangen. Daarom heten ze *bipolair*. Het voorvoegsel *bi* staat voor *twee*. Een FET heeft maar één PN-overgang en heet daarom ook wel *unipolaire transistor*. Het voorvoegsel *uni* staat voor één. De meeste transistoren zijn tegenwoordig van Si, maar de eerste waren van germanium.

Je kunt je een bipolaire transistor die we hierna gewoon *transistor* zullen noemen, voorstellen als een sandwich of op zijn Nederlands: een dubbele boterham. Het brood is N-materiaal en er zit P-beleg tussen. Dat heet een NPN-transistor. Het kan ook andersom: P-brood met N-beleg. Dat heet een PNP-transistor. De ladingdragers bij een NPN-transistor zijn elektronen, die bij een PNP-transistor gaten. Een NPN werkt precies als een PNP, maar met omgekeerde spanningspolariteit en stroomrichting. We bekijken nu een NPN-transistor in dwarsdoorsnede (Figuur 8.4-1). Er zijn drie elektroden. Van boven naar beneden: collector, basis en emitter.



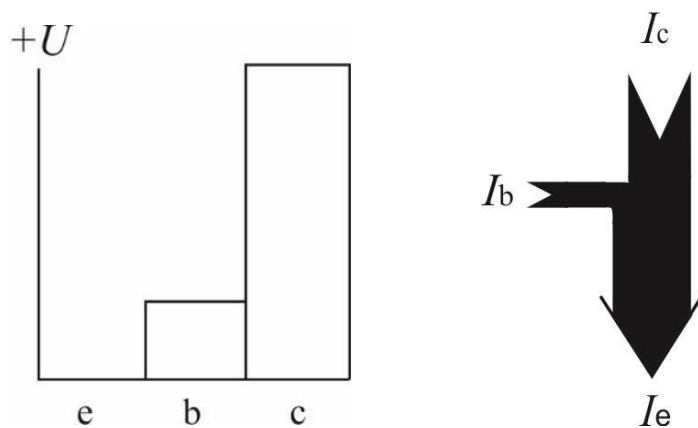
Figuur 8.4-1. Opbouw van een NPN-transistor met namen van de elektroden en geschematiseerde spanningsverdeling.

Wie de verdeling van de spanningen in de blokgrafiek rechts bekijkt, ziet dat de onderste PN-overgang geleidt als de spanning tussen emitter en basis groot genoeg is. De bovenste overgang is gesperd. Bij omkering van de spanningen is er weer één geleidende en één niet-geleidende PN-overgang. Dit vraagt om uitleg.

Eigenlijk zien we twee dioden die hun anode, in dit geval de basis, samen delen. De andere elektroden heten emitter (*uitzender*) en collector (*verzamelaar*). De emitter-

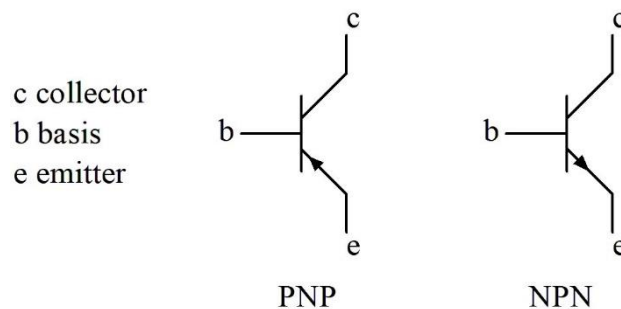
basisdiode geleidt. Er stromen elektronen van emitter naar basis. Dat verklaart de naam 'emitter'.

De collectorspanning is positief ten opzichte van de emitter. De collector trekt zo de elektronen aan die vanuit de emitter in de basis zijn beland. De meeste elektronen steken zo de collector-basis-junctie over voordat ze een gat zijn tegengekomen om mee te recombineren. De weinige recombinaties in de basis leiden wel tot een basisstroom, maar die is maar een fractie van de emitterstroom. Figuur 8.4-2 laat dit zien. De pijl staat in de technische stroomrichting. De figuur toont aan dat de emitterstroom de som is van basis- en collectorstroom. Dat volgt uit de eerste wet van Kirchhoff.



Figuur 8.4-2. Spanningsverdeling over een NPN-transistor (links) en de stroomverdeling (rechts). De letter *e* staat voor emitter, *b* voor basis en *c* voor collector. Pijl in de technische stroomrichting.

Schemasymbolen voor de PNP- en NPN-transistor staan in Figuur 8.4-3.



Figuur 8.4-3. Schemasymbolen voor PNP en NPN-transistor.

### 8.4.2 Grootheden en karakteristieken

Van essentieel belang is dat er in een transistor een tamelijk vast verband is tussen basis- en collectorstroom. De grootheid die dat verband beschrijft wordt aangegeven als  $\beta$ , de Griekse letter voor b of  $h_{FE}$ . Die laatste hoort tot de zogenoemde *h*-parameters. De beschrijving daarvan valt buiten het bestek van een cursus voor het zendexamen. Gewoon onthouden dus. In de vorm van een vergelijking:



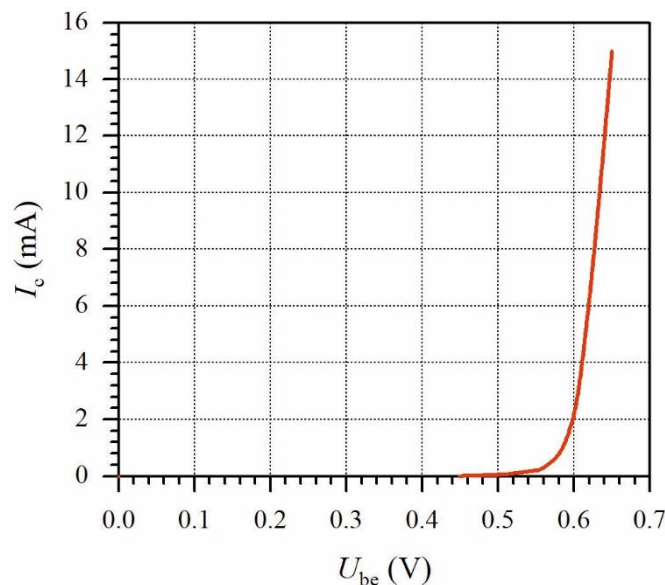
$$h_{FE} = \beta = \frac{I_C}{I_b} = \frac{\text{collectorstroom}}{\text{basisstroom}} \quad (8.4-1)$$

De waarde van  $\beta$  verschilt per type transistor en kan tussen ongeveer 5 en 1000 liggen. Binnen een type kan de waarde gemakkelijk met een factor 2 variëren. Bovendien is  $\beta$  vrij sterk temperatuurafhankelijk. Dat kan lastig zijn als een transistor tijdens gebruik warm wordt.

Kort samengevat is een transistor een ding waarmee je met een kleine basisstroom een grote collectorstroom stuurt. Het is dus een echte stroomversterker. Dat is iets anders dan FET en buis. Daarin stuurt een spanning een stroom die weer wordt omgezet in een (grotere) spanning.

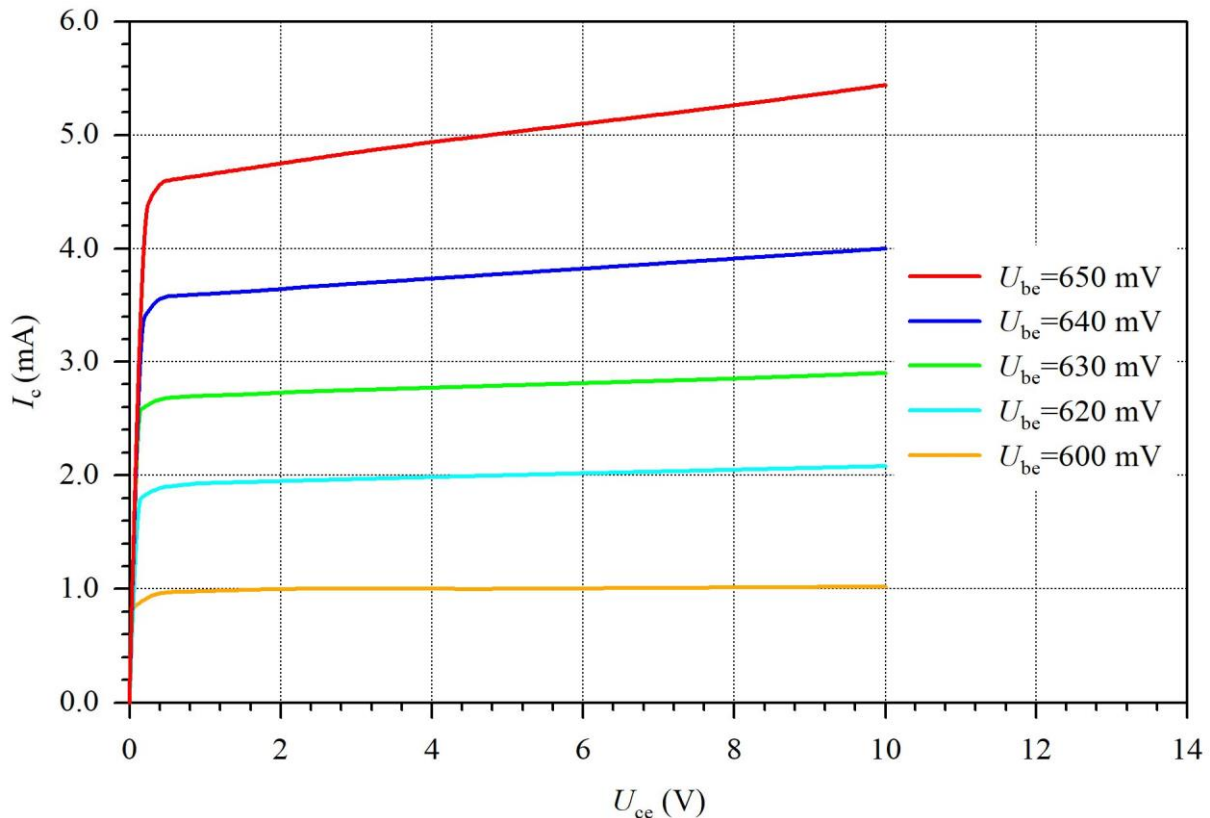
Toch is het verschil in de praktijk niet zo groot als het nu misschien lijkt. De basisstroom kan (mede) worden bepaald door een spanning over een weerstand en de collectorstroom kan via een weerstand weer worden omgezet in een spanning.

Een groot verschil is dat door een buis of FET een stroom loopt, ook als de gate- of stuurroosterspanning 0 V is. Een transistor spert als de emitter-basis- junctie niet geleidt. Er moet een stroom tussen basis en emitter lopen om de transistor te kunnen laten werken. De emitter-basis-junctie is tenslotte een diode. Figuur 8.4-4 toont de karakteristiek van de transistor BC337: collectorstroom  $I_c$  tegen basis-emitterspanning  $U_{be}$ .



Figuur 8.4-4. Grafiek van collectorstroom  $I_c$  tegen basis-emitterspanning  $U_{be}$  bij een spanning van 5 V tussen collector en emitter voor de transistor BC337 (gegevens Philips).

Figuur 8.4-4 verraadt dat het om een Si-transistor gaat. Bij een Ge-transistor zou het knikpunt van de grafiek in de buurt van  $U_{be} = 0,2$  V liggen. De grafiek doet denken aan de steilheidskarakteristiek van FET en buis, maar is veel steiler.



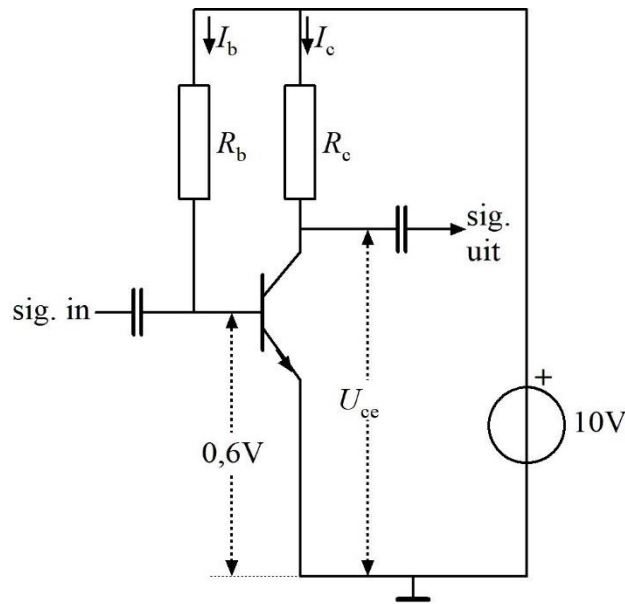
Figuur 8.4-5.  $I_c/U_{ce}$ -karakteristieken van de NPN Si-transistor BC107 (data Philips).

In Figuur 8.4-5 zien we de  $I_c/U_{ce}$ -karakteristiekenbundel van de Si-transistor BC107. Deze lijkt op de grafieken voor de FET (Figuur 8.2-4) en de penthode (Figuur 8.3-4). Wat opvalt is de steil oplopende lijn links en de vlakke en rechte karakteristieken in het rechterdeel. Een collector-emitterspanning  $U_{ce}$  van 1 V is genoeg om in de vlakke en hoogohmige deel van de karakteristieken terecht te komen.

### 8.4.3 Regelen van de basisstroom

Ook bij de transistor zien we een hoogohmige uitgang (collector) en een laagohmige ingang (emitter-basis circuit). Ook al werkt hij anders dan FET of buis, het recept voor spanningsversterking is bij de transistor in wezen niet anders dan bij FET of buis. Het belangrijkste verschil is dat de transistor basisstroom van buitenaf nodig heeft om te kunnen werken. Doordat  $\beta$  meestal hoog is -reken op 100 of meer voor transistoren voor kleine signalen- is de vereiste basisstroom klein. Wel moet die worden gedoseerd en afgestemd op de collectorweerstand en -als die er is- de emitterweerstand. De instelstroom kan via een weerstand van de juiste grootte worden afgenomen van de voedingsspanning.

De vraag is nu wat de juiste grootte is en hoe je die vindt. De eenvoudigste maar niet altijd de beste manier is die in Figuur 8.4-6.



Figuur 8.4-6. Transistorinstelling door middel van een weerstand  $R_b$  tussen basis en voedingspanning.

De schakeling heeft geen emitterweerstand, wel een collectorweerstand. De basis is signaalingang; de collector is signaaluitgang. De condensatoren dienen om alleen wisselspanning/stroom door te geven. De basisweerstand  $R_b$  verzorgt de basisstroom. De voedingspanning is (willekeurig gekozen) 10 V. We gaan uit van een siliciumtransistor.

Uit Figuur 8.4-5 blijkt dat een collector-emitterspanning van 1 V genoeg is om de collectorkant van de transistor in het hoogohmige deel van de karakteristieken te houden. De collectorspanning kan niet hoger zijn dan de voedingspanning, hier 10 V. Om zoveel mogelijk ruimte voor de signaalamplitude te hebben, moet de collector worden ingesteld op een gelijkspanning halverwege die 1 V en 10 V, is 5,5 V. Dan kan de amplitude van de collectorspanning maximaal 10 V-5,5 V of 5,5 V- 1 V is 4,5 V zijn.

Stel de collectorweerstand  $R_c = 1 \text{ k}\Omega$ . Over  $R_c$  komt een spanning van 4,5 V. Dan is de collectorstroom  $I_c = 4,5 \text{ mA}$ . Als bijvoorbeeld  $\beta=200$ , dan is volgens vergelijking (8.4-1) de basisstroom  $I_b = 4,5 \text{ mA}/200$  is  $22,5 \mu\text{A}$ . De basisspanning is ongeveer 0,6 V. Over de basisweerstand  $R_b$  moet dan 9,4 V staan. Bij de al gevonden  $22,5 \mu\text{A}$  betekent dit  $R_b = U/I = 9,4 \text{ V}/22,5 \mu\text{A} \approx 0,42 \text{ M}\Omega = 420 \text{ k}\Omega$ .

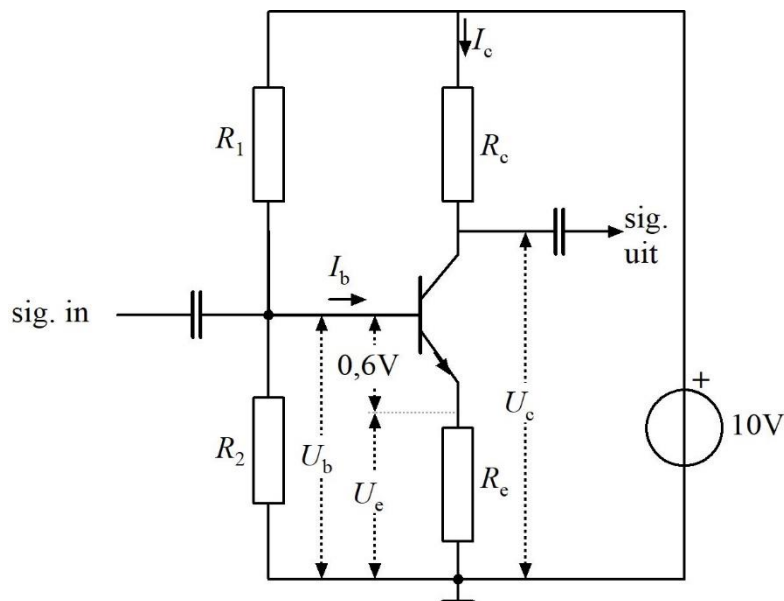
**Let op:** bij gebruik van V en  $\mu\text{A}$  krijg je  $\text{M}\Omega$  uit de wet van Ohm!

#### Het recept samengevat:

1. Bepaal de gewenste collectorspanning uit de voedingspanning en de minimaal benodigde collector-emitterspanning  $U_{ce}$
2. Bepaal de collectorstroom uit collectorweerstand en verschil tussen voedingspanning en de zojuist gevonden collectorspanning.
3. Bepaal de basisstroom uit collectorstroom en  $\beta$  ( $h_{FE}$  kan ook; is hetzelfde als  $\beta$ )
4. Bepaal de basisweerstand uit voedingspanning min basisspanning en de basisstroom.

Een zwak punt is de hoge versterking van de schakeling. Dat klinkt misschien vreemd. Maar laten we nog eens goed naar Figuur 8.4-4 kijken. Je kunt daar een steilheid uit aflezen. Die komt voor het rechte deel van de grafiek neer op ongeveer 13 mA per 0,05 V is 260 mA/V. Bij een bescheiden collectorweerstand  $R_c$  van 1 k is de spanningsversterking 260!. Bij de aangenomen en heel gangbare stroomversterking  $\beta$  van 200 komt dat neer op een vermogensversterking van 52000. Verderop in deze cursus zullen we zien dat heel hoge versterkingen in één element of versterkertrap gemakkelijk leiden tot instabiliteit in de versterker. Dat is een goede reden om de schakeling te voorzien van een emitterweerstand ( $R_e$ ). Omdat  $1/S$  zo klein is, is de spanningsversterking bij een transistor nagenoeg gelijk aan  $R_c/R_e$ .

Een ander zwak punt is de waarde van  $\beta$ . Die kan binnen een transistortype met ruwweg een factor 2 variëren en is temperatuurafhankelijk. Als een transistor warm wordt, kan het werkpunt (in ons voorbeeld de collectorspanning van 5,5 V) verschuiven. Bij kleine signalen zal het bijna altijd goed gaan. Bij grotere kan het zijn dat het signaal aan plus- of minkant niet meer past binnen de grenzen van de collectorspanning. Het resultaat is vervorming. Een betrouwbaarder schakeling is de spanningsdeler. Figuur 8.4-7 toont hem, met emitterweerstand.



Figuur 8.4-7. Instelling van een siliciumtransistor met een spanningsdeler ( $R_1$  en  $R_2$ ) en een emitterweerstand  $R_e$ . Bij een Ge-transistor moet de 0,6 V tussen emitter en basis 0,2 V zijn.

De spanningsdeler bestaat ogenschijnlijk uit  $R_1$  en  $R_2$ . Ogenschijnlijk, want de emitterweerstand  $R_e$  doet ook mee, maar heel beperkt. Oorzaak: de basisstroom is gelijk aan de emitterstroom gedeeld door  $(\beta+1)$ , oftewel de emitterstroom  $\beta+1$  keer verkleind. Dan lijkt  $R_e$  via de basis  $\beta+1$  keer vergroot. Omdat  $\beta \gg 1$ , mag je voor  $\beta+1$  ook  $\beta$  schrijven. De onderste helft van de spanningsdeler is dus de vervangingsweerstand van de parallel geschakelde  $R_2$  en  $\beta R_e$ .

De basisspanning is bij een geleidende Si-transistor ruwweg gelijk aan de emitterspanning plus 0,6 V. Bij een Ge-transistor is dat emitterspanning plus 0,2 V.

**Onthoud:**

1. Het verschil tussen basisspanning en emitterspanning bij een siliciumtransistor is ongeveer 0,6 V; bij een germaniumtransistor ongeveer 0,2 V
2. De weerstand, gemeten op de basisaansluiting, is  $\beta+1$  keer zo groot als de emitterweerstand. In de praktijk:  $\beta$  keer, want  $\beta$  is veel groter dan 1.

Nu het berekenen van de transistorinstelling.

Als gevolg van de emitterweerstand  $R_e$  is er een emitterspanning  $> 0V$ . Die gaat ten koste van de spanningsruimte op de collector, dus we maken hem niet te groot, zeg 1 V. Als  $R_e$  1 k $\Omega$  is, moet de emitterstroom 1 mA worden. Om de transistor goed te laten werken, hebben we volgens Figuur 8.4-5 1 V over de transistor nodig (**Let op:** dat hoeft niet voor elk transistortype precies zo te zijn!). Dat is inclusief de basis-emitterspanning. Dat maakt 2 V over transistor en  $R_e$  samen. Dan is er 2x 4V over voor de spanningsruimte op de collector. Dat betekent een collectorspanning van 6 V. Over de collectorweerstand  $R_c$  moet dan  $10 V - 6 V = 4 V$  komen te staan. Bij een stroom van 1 mA -gemakshalve verwaarlozen we de kleine basisstroom- is dat 4 k $\Omega$ . Spanningsversterking: bijna 4 (4 k $\Omega$  gedeeld door 1 k $\Omega$ ).

Nu de spanningsdeler. Als  $\beta=200$ , dan is  $\beta R_e = 200$  k $\Omega$ . Als we  $R_2$  veel kleiner nemen dan  $\beta R_e$ , bijvoorbeeld 20 k $\Omega$ , dan is het effect van  $\beta R_e$  te verwaarlozen en gaan we uit van 20 k $\Omega$ . Over die 20 k $\Omega$  staat 1 V emitterspanning plus ongeveer 0,6 V basis-emitterspanning, is ongeveer 1,6 V. Over  $R_1$  staat de voedingsspanning van 10 V min 1,6 V is 8,4 V. Dan is  $R_1 : R_2 = 8,4 : 1,6$ .  $R_2 \approx 20$  k $\Omega$ , dus  $R_1 \approx 8,4 \cdot 20 \text{ k}\Omega / 1,6 \approx 52,5$  k $\Omega$ .

## 8.5 De drie basisschakelingen

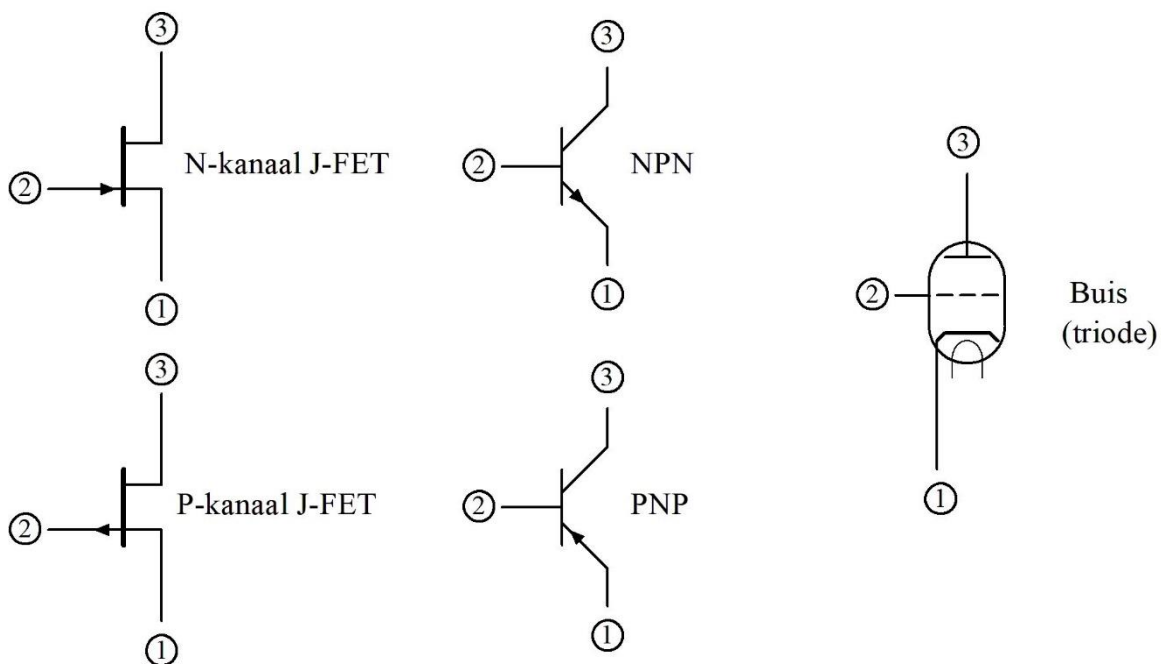
### 8.5.1 Inleiding

We hebben in het voorgaande al kennis gemaakt met enkele versterkerschakelingen, maar er zijn er meer. Tijd voor een systematische behandeling. Voor alle drie versterkende elementen zijn er drie schakelingen. Bij elke schakeling met één versterkend element hoort een overeenkomstige schakeling bij elk van de andere twee. Dat komt doordat alle drie de elementen werken volgens hetzelfde principe: laagohmig waar de ladingdragers het element ingaan en hoogohmig waar ze er weer uitkomen. Daarom behandelen we ze per soort voor alle drie elementen tegelijk. We beginnen met de lijst van overeenkomstige aansluitingen in Tabel 8.5-1.

Tabel 8.5-1. Overeenkomstige aansluitingen van versterkende elementen. Schemasymbolen met overeenkomstige nummers van de elektroden in Figuur 8.5-1.

Element	Elektrode nummer		
	1	2	3
FET	Source	Gate	Drain
Buis	Kathode	(Stuur)rooster	Anode
Transistor	Emitter	Basis	Collector

De schemasymbolen zijn nog eens weergegeven in Figuur 8.5-1, met de overeenkomstige nummers in de tabel.



Figuur 8.5-1. De elementen uit Tabel 8.5-1 met schemasymbool. De nummers verwijzen naar de genummerde kolommen in de tabel.

**Geschikt als signaalingang** zijn de elektroden gemerkt 1 en 2. Die kunnen de stroomdoorgang door het element voldoende beïnvloeden. Voor de nummers 3 geldt dat niet. Die zijn verbonden met een hoogohmige inwendige weerstand. Ze beïnvloeden de stroomdoorgang nauwelijks en zijn daarom ongeschikt als signaalingang.

**Geschikt als signaaluitgang** zijn de elektroden 1 en 3, omdat ze in staat zijn, stroom te leveren. Dat is een onmisbare eigenschap bij versterking van vermogen. De elektroden 2 kunnen dat niet en vallen dus af als signaaluitgang.

De derde elektrode noemen we **gemeenschappelijk**. Alle drie de elektroden kunnen die rol vervullen. Daarmee houden we drie mogelijke combinaties over die we aangeven met A, B en C (Tabel 8.5-2).

Tabel 8.5-2. De drie mogelijke combinaties bij versterkerschakelingen

Combinatie	Ingang	Uitgang	Gemeenschappelijk
A	2	3	1
B	1	3	2
C	2	1	3

Schakelingen worden steeds genoemd naar de gemeenschappelijke elektrode. De benamingen en de bijbehorende signaal-in- en uitgangen staan in Tabel 8.5-3.

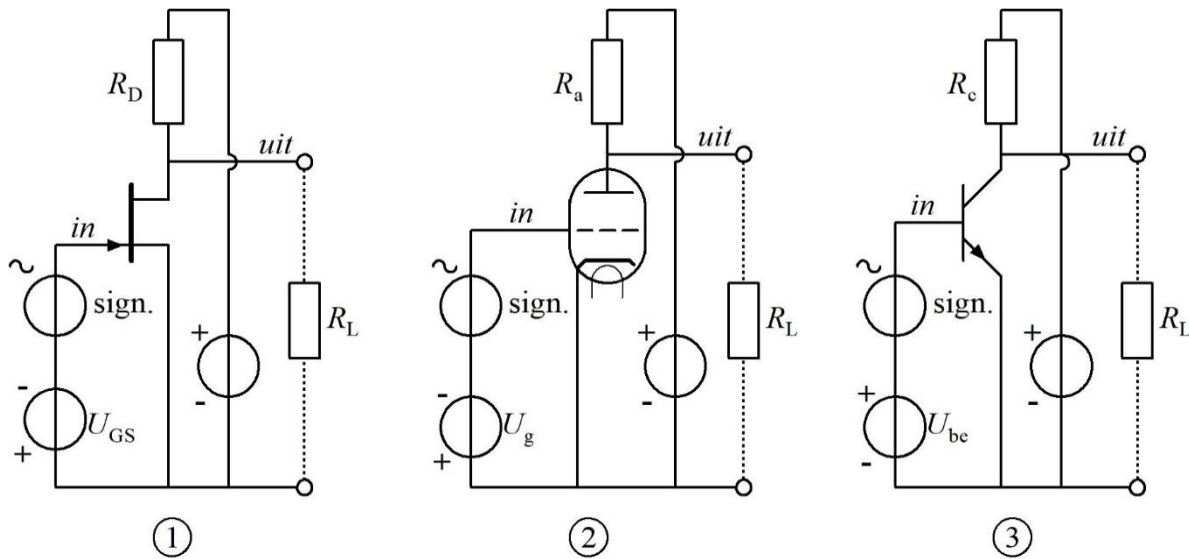
Tabel 8.5-3. De drie keer drie combinaties van basisschakelingen met signaalingang, -uitgang en gemeenschappelijke elektrode, benaming en afkorting.

Comb.	Element	Ingang	Uitgang	Gemeenschappelijk, naam	Afkorting
A	FET	Gate	Drain	Gem. <b>sourceschakeling</b>	<b>GSS</b>
	Buis	Rooster	Anode	Gem. <b>kathodeschakeling</b>	<b>GKS</b>
	Transistor	Basis	Collector	Gem. <b>emitterschakeling</b>	<b>GES</b>
B	FET	Source	Drain	Gem. <b>gateschakeling</b>	<b>GGS</b>
	Buis	Kathode	Anode	Gem. <b>roosterschakeling</b>	<b>GRS</b>
	Transistor	Emitter	Collector	Gem. <b>basisschakeling</b>	<b>GBS</b>
C	FET	Gate	Source	Gem. <b>drainschakeling</b>	<b>GDS</b>
	Buis	Rooster	Kathode	Gem. <b>anodeschakeling</b>	<b>GAS</b>
	Transistor	Basis	Emitter	Gem. <b>collectorschakeling</b>	<b>GCS</b>

We behandelen de drie combinaties A, B en C uit Tabel 8.5-3 in afzonderlijke subparagrafen. In de figuren worden voor de spanningen op de elektroden steeds (ideale) bronnen gebruikt. De signaalbron wordt weergegeven als (ideale) wisselspanningsbron. Bedenk dat in werkelijkheid niets ideaal is. De weerstand, impedantie of reactantie van de schakeling die het versterkte signaal ontvangt, wordt weergegeven als weerstand  $R_L$  (met de L van *Lasting* of het Engelse *Load*). Transistoren zijn NPN, FET's zijn N-FET's, buizen triodes. De ladingdragers zijn dus in alle besproken gevallen elektronen.

### 8.5.2 Combinatie A. Gemeenschappelijke source/kathode/emitterschakeling

We beginnen met het soort schakeling dat we eerder hebben gezien. Signaalingang is gate/rooster/basis, signaaluitgang drain/anode/collector. De schakelingen staan voor alle drie de elementen in hun eenvoudigste vorm in Figuur 8.5-2.



Figuur 8.5-2. De basisschakelingen GSS (1), GKS (2) en de GES (3). Signaalvingen zijn aangegeven met “in”; uitgangen met “uit”.

Tussen de signaaluitgangen drain, anode en collector is weinig verschil. Ze zijn alle drie hoogohmig, dat wil zeggen dat de stroom via drain, anode of collector zich weinig aantrekt van de spanning op die elektroden..

Bij de signaalvingen gate, rooster en basis zit het voor de transistor anders dan voor FET en buis. Bij FET en buis is de stroom door het element spanninggestuurd. De steilheid ligt in dezelfde orde van grootte, meestal 2-10 mA/V.

Bij de transistor moet de zaak in geleiding worden gebracht door basisstroom. De basisspanning  $U_{be}$  moet zo groot zijn dat de basis-emitterovergang in geleiding komt. In de figuur is dat met een spanningsbron gerealiseerd, in de praktijk gebeurt dat vrijwel altijd door het toevoeren van een stroom aan de basis, zoals we eerder zagen. De ‘steilheid’ van een transistor, voorzover je daarvan kunt spreken, is veel groter dan die van FET en buis.

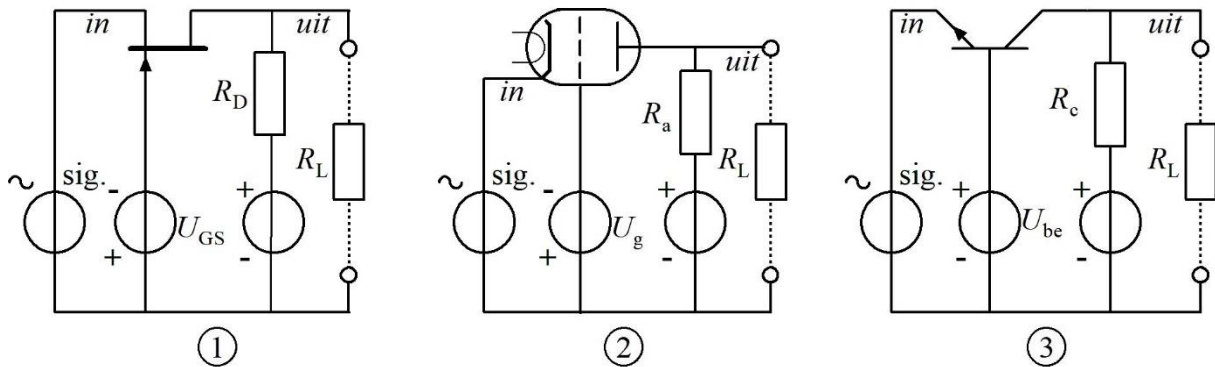
**Bij aanwezigheid van een source-, kathode- of emitterweerstand is daardoor de spanningsversterking bij FET en buis iets kleiner dan de verhouding drainweerstand/sourceweerstand, resp. anodeweerstand/kathodeweerstand. Bij een transistor is die vrijwel gelijk aan de verhouding collectorweerstand/emitterweerstand.**

Een belangrijke eigenschap van combinatie A is dat het signaal (de wisselspanning) op de uitgang in tegenfase is met dat op de ingang.

### 8.5.3 Combinatie B. Gemeenschappelijke gate/rooster/gateschakeling

De schakelingen staan voor alle drie de elementen in hun eenvoudigste vorm in Figuur 8.5-3.





Figuur 8.5-3. De basisschakelingen GGS (1), GRS (2) en de GBS (3). Signaalvingangen zijn aangegeven met "in"; uitgangen met "uit".

Hier zijn source, kathode en emitter de signaalvingangen. Die zijn allen laagohmig.

De stroom op de signaaluitgang is even groot als die op de signaalvingang; alleen bij de transistor is de vrijwel altijd verwaarloosbaar kleine basisstroom afgetakt.

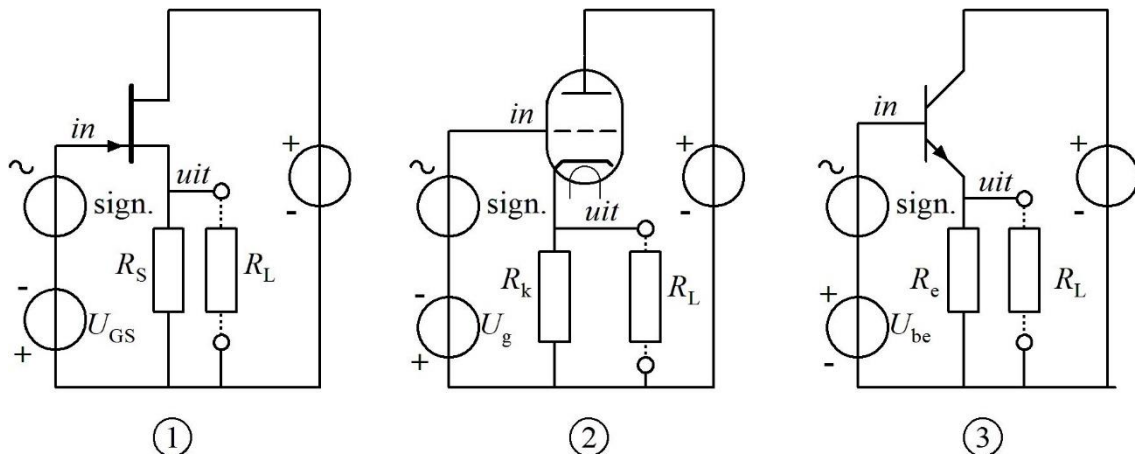
**De stroomversterking is dus 1 en bij de transistor praktisch 1. De spanningsversterking is even groot als bij combinatie A (8.5.2), de GSS, GKS en de GES.**

De signaaluitgangen zijn dezelfde als in Combinatie A en dus ook hier hoogohmig.

**Uitgangs- en ingangssignaal zijn in fase.** Dat is dus tegengesteld aan Combinatie A.

#### 8.5.4 Combinatie C. Gemeenschappelijke drain- anode- en collectorschakeling.

De schakelingen zijn in hun eenvoudigste vorm weergegeven in Figuur 8.5-4.



Figuur 8.5-4. De basisschakelingen GDS (1), GAS (2) en GCS (3). Signaalvingangen zijn aangegeven met "in"; uitgangen met "uit".

De signaaluitgang is de source, kathode of emitter, al naar gelang het soort element. Voor de FET en de buis is de spanningsversterking iets minder dan 1, voor de transistor vrijwel 1. Het kleine verschil zit in de steilheid. De stroomversterking is in alle gevallen groot:



voor FET en buis in theorie oneindig omdat gate en rooster in theorie geen stroom trekken, voor de transistor ongeveer gelijk aan  $\beta$ .

Een andere naam voor deze drie schakelingen is **sourcevolger** (FET), **kathodevolger** (buis) en **emittervolger** (transistor), omdat de signaalspanning op de uitgang vrijwel de spanning op de signaalingang volgt. **In- en uitgangssignaal zijn in fase.**

### 8.5.5 De basisschakelingen samengevat

De eigenschappen van de drie basisschakelingen zijn voor de drie versterkende elementen samengevat in Tabel 8.5-4. Waar de stroomversterking als “zeer hoog” is aangegeven, is de weerstand op de signaalingang in theorie oneindig. Je kunt dan ook zeggen dat de stroomversterking eigenlijk niet te berekenen is. De ingangsweerstand voor het signaal bij de gemeenschappelijke collectorschakeling (emittervolger) is gelijk aan  $\beta+1$  (in de praktijk  $\beta$  omdat  $\beta$  veel groter is dan 1) maal de vervangingsweerstand van de emitterweerstand  $R_e$  en de daaraan parallel staande belastingsweerstand  $R_L$ .

Tabel 8.5-4. Overzicht van de eigenschappen van de basisschakelingen voor elk van de drie versterkende elementen.

Element	FET	Buis	Transistor
Gemeenschappelijk	Source	Kathode	Emitter
Signaalingang	Gate	Rooster	Basis
Signaaluitgang	Drain	Anode	Collector
Ingangsweerstand	Hoog	Hoog	Vrij laag
Uitgangsweerstand	Hoog	Hoog	Hoog
Spanningsversterking	Hoog	Hoog	Hoog
Stroomversterking	Zeer hoog	Zeer hoog	$\beta$
Faseverschil in/uit	180°	180°	180°
Gemeenschappelijk	Gate	Rooster	Basis
Signaalingang	Source	Kathode	Emitter
Signaaluitgang	Drain	Anode	Collector
Ingangsweerstand	Laag	Laag	Laag
Uitgangsweerstand	Hoog	Hoog	Hoog
Spanningsversterking	Hoog	Hoog	Hoog
Stroomversterking	1	1	Vrijwel 1
Faseverschil in/uit	0°	0°	0°
Gemeenschappelijk	Drain	Anode	Collector
Gangbare benaming	Sourcevolger	Kathodevolger	Emittervolger
Signaalingang	Gate	Rooster	Basis
Signaaluitgang	Source	Kathode	Emitter
Ingangsweerstand	Hoog	Hoog	$\beta \frac{R_e R_L}{R_e + R_L}$ (hoog)
Uitgangsweerstand	Laag	Laag	Laag
Spanningsversterking	Iets minder dan 1	Iets minder dan 1	Vrijwel 1
Stroomversterking	Zeer hoog	Zeer hoog	$\beta$
Faseverschil in/uit	0°	0°	0°