



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	5
8.2.3	MOSFET's	8
8.3	Elektronenbuizen	8
8.3.1	Opbouw en werking	8
8.3.2	De triode	9
8.3.3	De penthode	11
8.3.4	Schemasymbolen, vergelijking van FETs en buizen	12
8.4	Bipolaire transistoren	14
8.4.1	Opbouw, schemasymbool en werking	14
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/basisschakeling	23
8.5.4	Combinatie C. Gemeenschappelijke drain- anode- en collectorschakeling.	24
8.5.5	De basisschakelingen samengevat	25

8 Versterkende elementen, basisschakelingen

8.1 Wat leer je in dit hoofdstuk

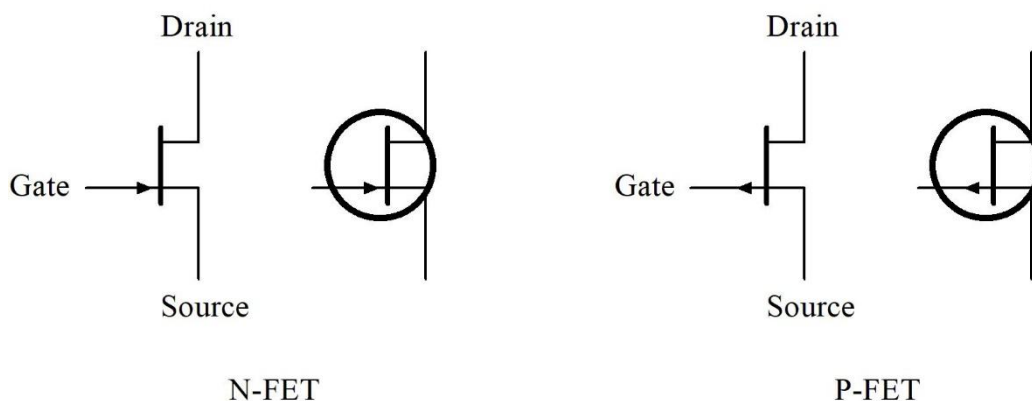
We bespreken veldeffect-transistoren (FET's), enkele soorten buizen en 'gewone' transistoren. Ze hebben gemeen dat ze, afhankelijk van de manier waarop ze zijn geschakeld, spanning, stroom of beide kunnen versterken. We beginnen met FET's, daarna komen de buizen en tenslotte de transistoren. FET's en buizen worden aangestuurd met spanning. Die spanning stuurt een stroom. Die kan daarna weer worden omgezet in spanning. In transistoren wordt stroom aangestuurd door stroom.

FET's en buizen lijken dus voor wat betreft hun aansturing meer op elkaar dan op transistoren. Daarom behandelen we FET's en buizen direct na elkaar en dan pas de transistoren. Bij alle drie 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 gelijktijdig en niet per versterkend element.

8.2 Veldeffect-transistor (Field Effect Transistor, FET)

8.2.1 Opbouw, schemasymbool en werking

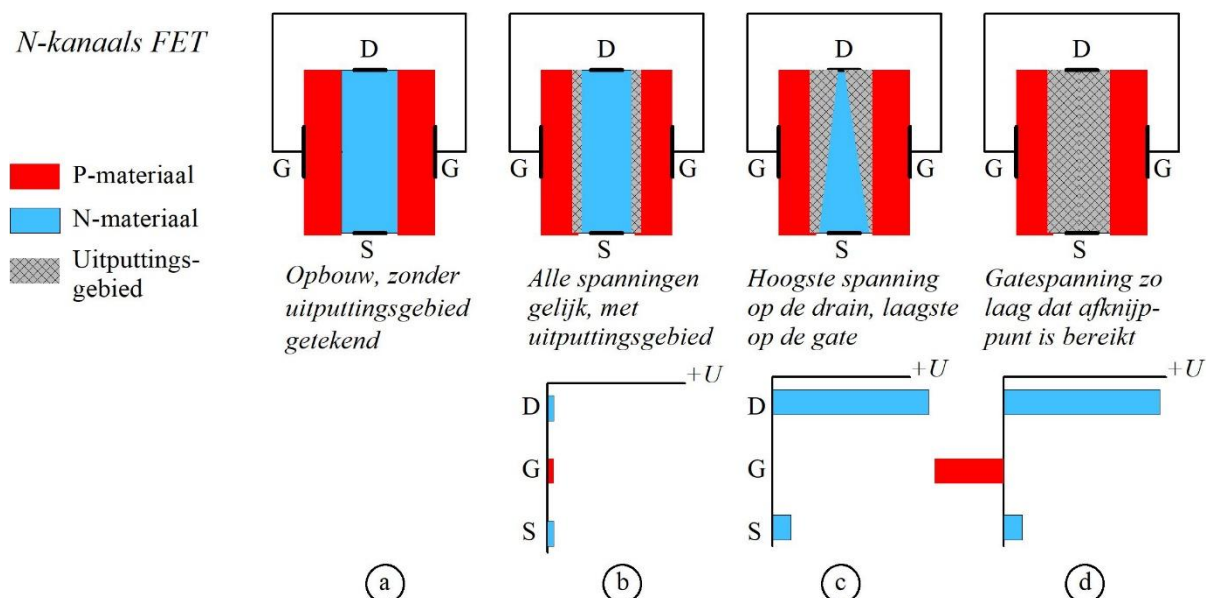
De FET's die we hier behandelen zijn meest Si-FET's. Ze hebben één PN-junctie. Die moet gesperd staan. De stroom loopt langs, niet door de junctie. Het deel waar de stroom doorheen loopt, heet het *kanaal*. Er zijn N- en P-kanaals FETs, afgekort N- of P-FET. Het kanaal heeft twee aansluitingen, *source* en *drain*, de in- en uitgang voor ladingsdragers. Die zijn bij de P-FET gaten, bij de N-FET elektronen. De aansluiting aan de andere kant van de junctie heet *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 **rode** elektrisch verbonden delen.

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

c. drainspanning positiever dan sourcespanning; gatespanning het laagst. De spanning tussen gate en kanaal neemt van source naar drain toe. Daardoor wordt de uitputtingszone van source naar drain breder en het geleidende deel van het kanaal smaller.

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

Afbeelding a toont alleen de opbouw.

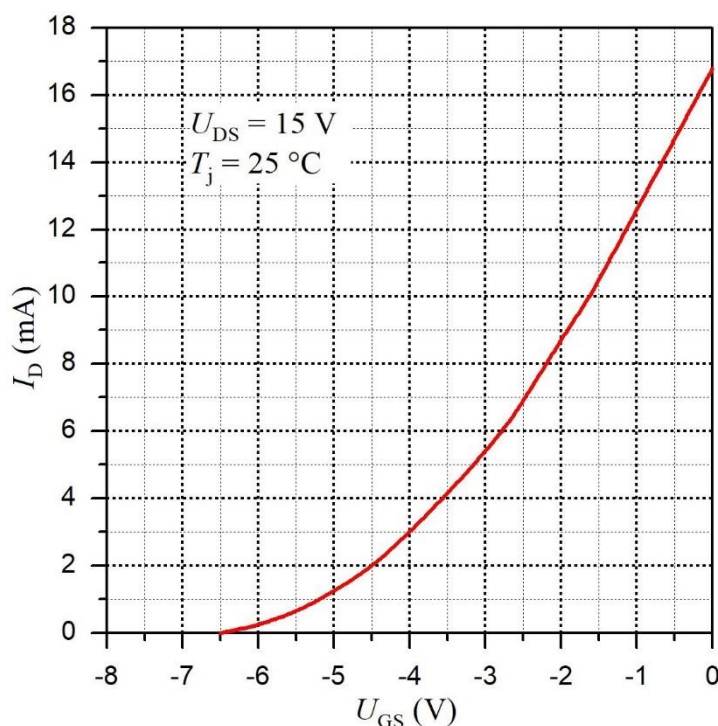
Afbeelding b toont de situatie met gelijke spanningen op source, gate en drain. Als ze alle drie dezelfde spanning hebben loopt er geen stroom. Wel is het kanaal, op een smalle uitputtingszone na, geleidend. Bij kleine spanningen tussen source en drain blijft dat vrijwel zo, maar dan loopt er wel stroom. 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 gestuurd met een spanning. Figuur 8.2-3 toont de grafiek.



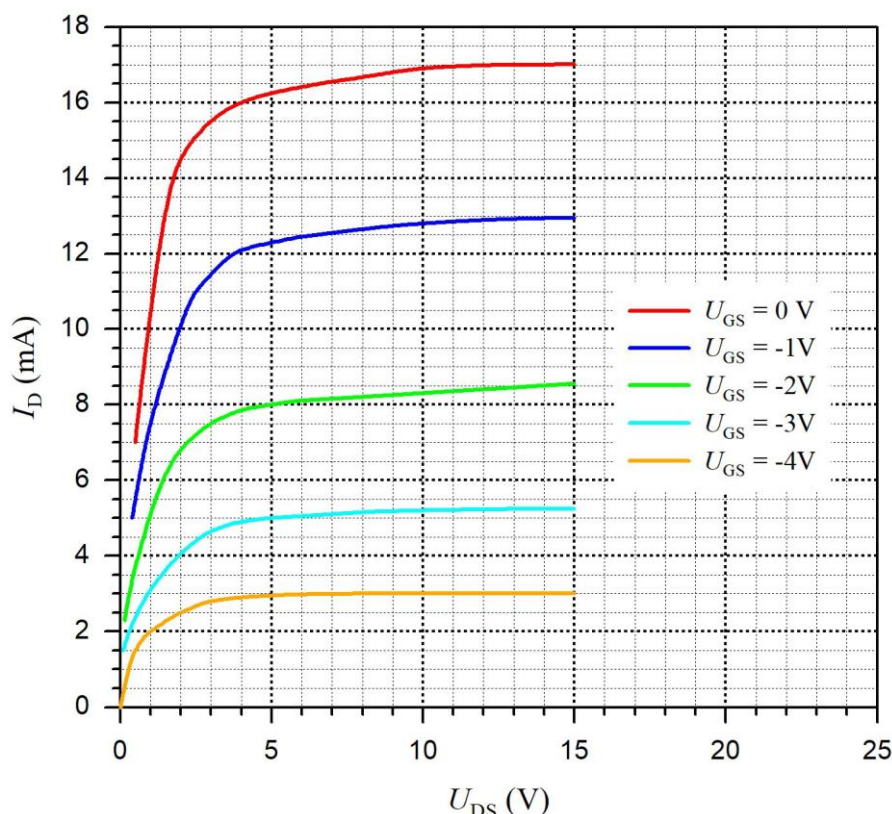
Figuur 8.2-3. Drainstroom I_D van de N-FET BF245C uitgezet tegen de spanning U_{GS} tussen gate en source van een N-FET. Omdat ook de spanning tussen U_{DS} tussen drain en source enige invloed op de stroom heeft, hoort de bijbehorende waarde van U_{DS} in de grafiek te staan. Verder staat er de bijbehorende 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 gelijk voor elke waarde van U_{GS} , 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.



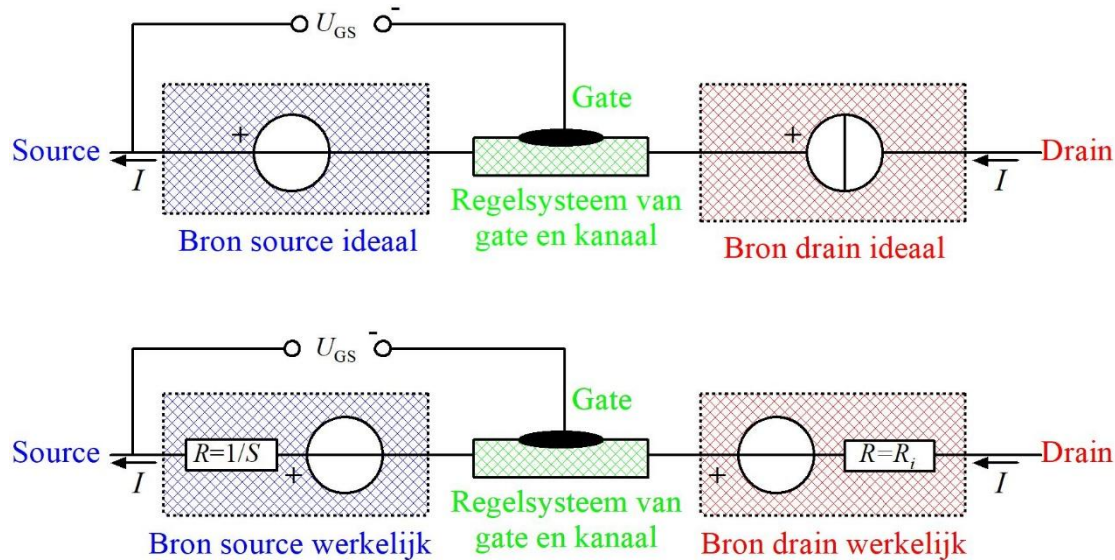
Figuur 8.2-4. I_D - U_{DS} karakteristieken van de N-FET BF245C. We zien de drainstroom I_D tegen de drain-source-spanning U_{DS} bij verschillende U_{GS} . T_j is de juncietemperatuur waarvoor de grafieken gelden. Data uit Philips databoek *Field-effect transistors*.

De bijna horizontale delen van de grafieken geven aan dat daar de drain-source spanning U_{DS} maar weinig invloed heeft op de drainstroom I_D . Dat betekent een hoge *inwendige weerstand* (symbool 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 deze twee grootheden.

8.2.2 Versterking

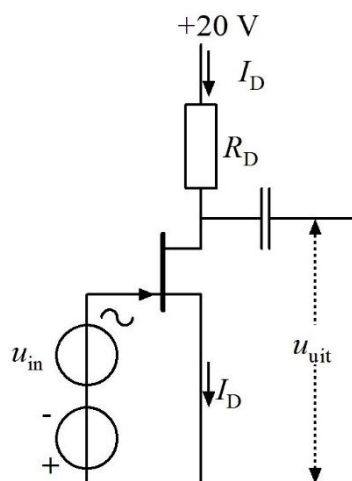
Volgens de grafiek van Figuur 8.2-3 veroorzaakt een verandering van U_{GS} van -2 V naar -1 V, 1 V verschil dus, een verandering van de drainstroom I_D met ongeveer 3,9 mA. $S \approx 3,9$ mA/V komt overeen met $1/S \approx 260 \Omega$. Figuur 8.2-4 laat ook zien dat een verhoging van de drainspanning U_{DS} van 5 naar 15 V bij $U_{GS} = -2$ V een verandering van de drainstroom met ongeveer 0,6 mA 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 spanningsbron met inwendige weerstand $1/S$ en aan de drainkant een niet-ideale 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 weinig 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:

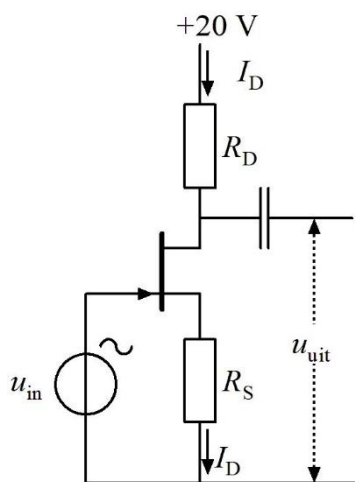
Stel de steilheid S is 4 mA/V en R_D is 3 kΩ. Een signaalwisselspanning u_{in} van 0,1 V produceert een signaalwisselstroom van 0,4 mA in het kanaal van de FET. Op de drain moet die stroom door 3 kΩ worden ge'duwd'. Daarvoor is een spanning u_{uit} nodig van 0,4 mA maal 3 kΩ is 1,2 V. De spanningsversterking is dan 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 vorm.

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

In vergelijking (8.2-1) staat links van het =-teken de spanningsversterking A_u van de schakeling in Figuur 8.2-6, want A_u 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 gemiddeld 0 V blijft. Als de source

positief is ten opzichte van de gate, is de gate negatief ten opzichte van de source. Dat vervangt de negatieve spanningsbron in de gateleiding van Figuur 8.2-6.

- 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 $R_S + 1/S$.

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 de zaak is geregeld:

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

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. Die elementen 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 we 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. Moderne types zijn daar redelijk tegen beveiligd. Wie meer wil weten, kan terecht op bijvoorbeeld <https://nl.wikipedia.org/wiki/MOSFET>.

8.3 Elektronenbuizen

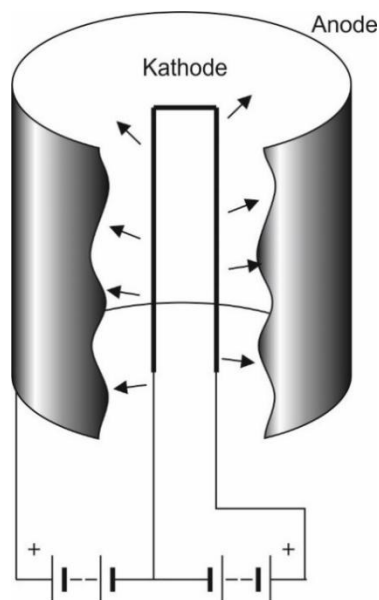
8.3.1 Opbouw en werking

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 een vacuüm in 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 geven we die 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.

Figuur 8.3-1 toont die situatie. De gloeidraad is de kathode die elektronen uitzendt; de metalen plaat eromheen de anode die ze opvangt. Een kathode die tegelijk gloeidraad is, noemen we *direct verhit*.

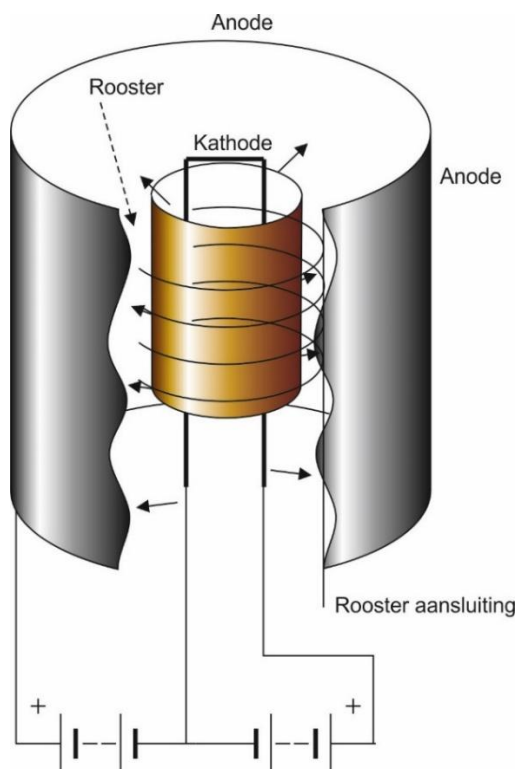


Figuur 8.3-1. Buisdiode. De kathode is hier een gloeidraad die elektronen uitzendt; de anode is de ronde plaat eromheen (bron: VRZA-cursus 1999)

Als de gloeidraad wordt gevoed met wisselstroom wordt hij omgeven een geleidend buisje. Dat buisje is dan de eigenlijke kathode. Die heet dan *indirect verhit*.

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). De kathode is in dit geval indirect verhit



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.

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 geen P-vorm, want een buis kent alleen elektronen als ladingdrager.

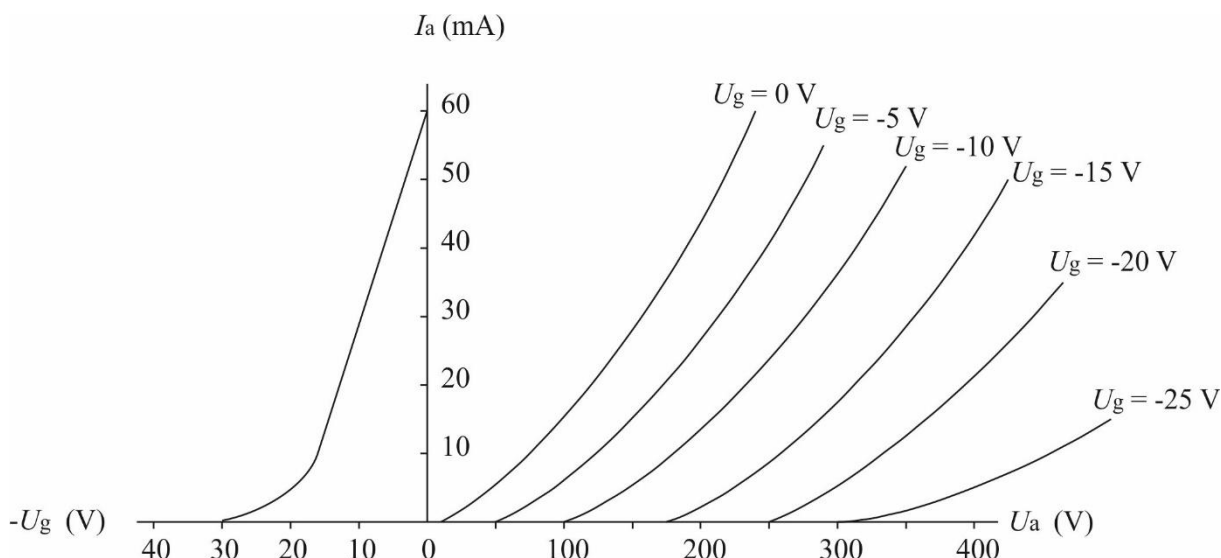
De versterking door een triode gaat ongeveer in zijn werk als bij een N-FET, maar in de buizenwereld zijn de spanningen veel hoger. Buizen voor klein vermogen hebben al gauw anodespanningen rond 200 of 250 V, bij zendbuizen met hoog vermogen kan die spanning in de kilovolts (kV) lopen.

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. S en R_i van FET en triode zijn desondanks in grootte vergelijkbaar.

8.3.3 De penthode

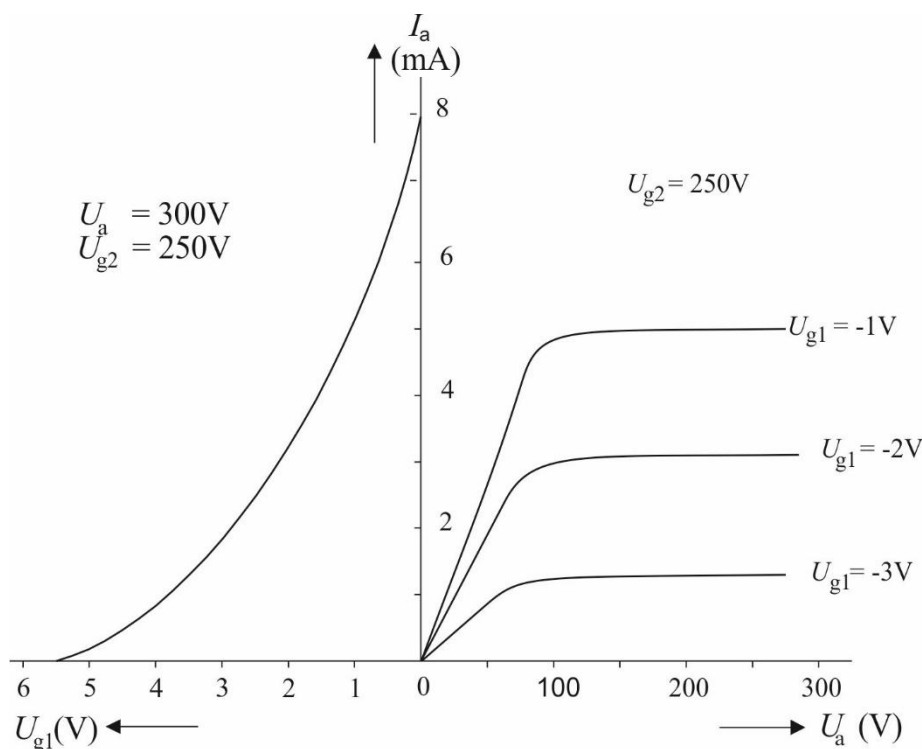
De penthode is te zien als een (sterk) verbeterde triode. Deze buis heeft tussen kathode en anode drie roosters. Het rooster dat het dichtst bij de kathode ligt, heet **stuurrooster** (g_1). De functie is dezelfde als het rooster van de triode: het regelen van de elektronenstroom van kathode naar anode. Het tweede rooster (g_2) heeft een constante positieve spanning. 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 vrij effectief af en verkleint daardoor de invloed van de anodespanning op de elektronenstroom uit de kathode. Dit tweede rooster heet daarom **schermrooster**.

De inwendige weerstand van een penthode is door het schermrooster (veel) groter dan die van een triode. Daardoor kan de spanningsversterking hoger zijn dan bij een triode.

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 ontkoppeld 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 daardoor 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.

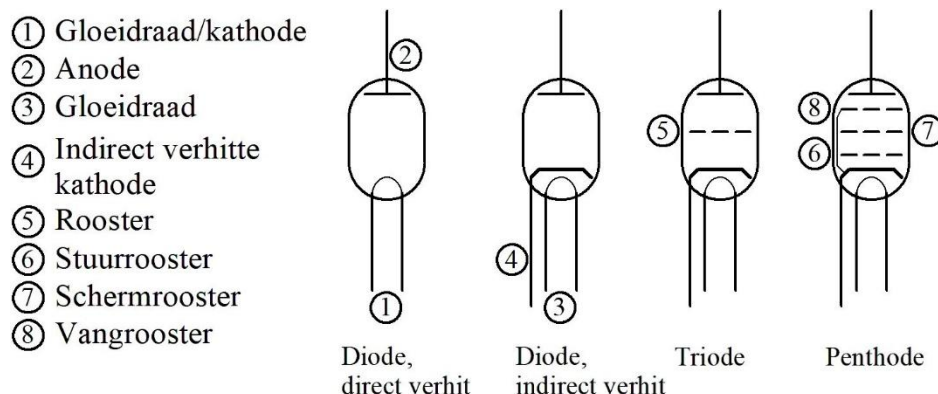


Figuur 8.3-4. Karakteristieken van een penthode, geldend bij een schermroosterspanning (U_{g2}) van 250 V. De stuurroosterspanningen zijn aangegeven met U_{g1} . Links steilheid, rechts: I_a/U_a -karakteristieken.

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 afschermende werking van het schermrooster.

8.3.4 Schemasymbolen, vergelijking van FETs en buizen

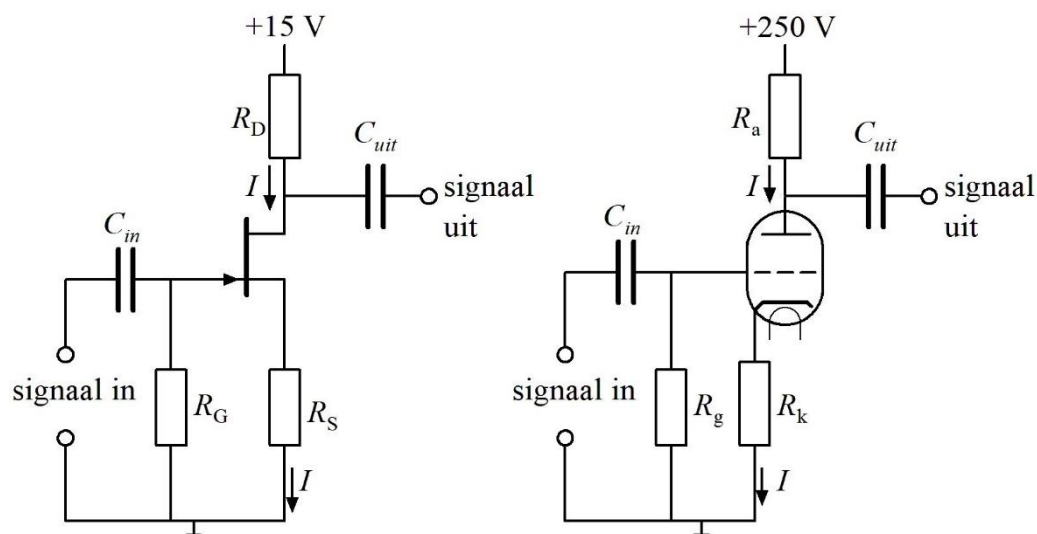
De schemasymbolen van alle behandelde buizen zien we in Figuur 8.3-5.



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.

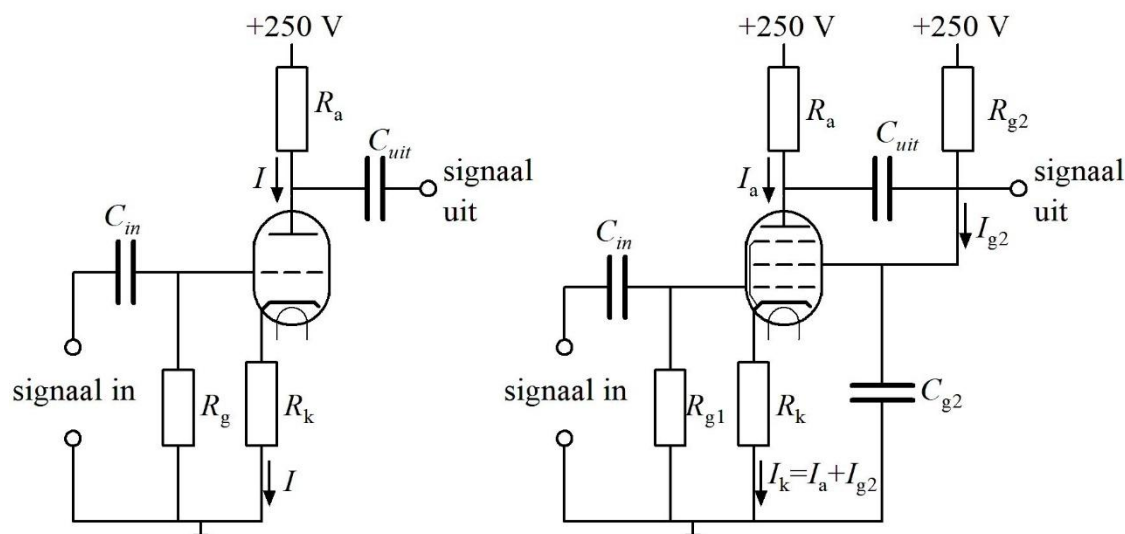
In Figuur 8.3-6 zien we twee versterkerschakelingen, één met een FET (links) en één met een triode (rechts).



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 voedingscircuit 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 ogenschijnlijk 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.

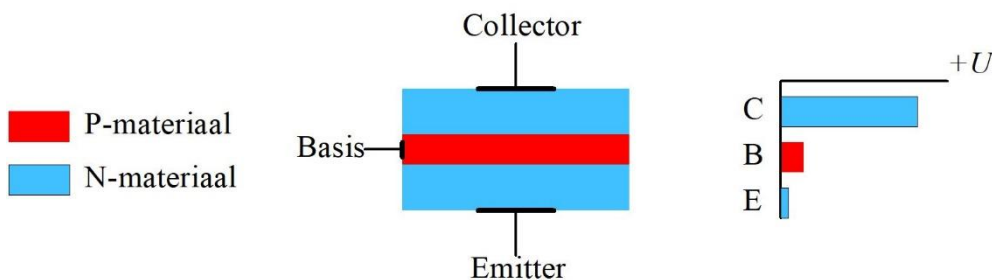
De elektronenstroom in de penthode splitst zich in anode- en schermroosterstroom. Voor wie voorkeur heeft voor de technische stroomrichting: de anode- en schermroosterstroom verenigen zich tot de kathodestroom, zoals in de figuur. De spanningsversterking van de schakeling is iets kleiner dan de verhouding 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*. *Bi* staat voor *twee*. Een FET heeft maar één PN-overgang en heet daarom ook wel *unipolaire transistor*. *Uni* staat voor *één*.

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 ertussen heet een PNP-transistor. De ladingdragers bij een NPN-transistor zijn elektronen, die bij een PNP-transistor gaten. Een NPN werkt net 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.

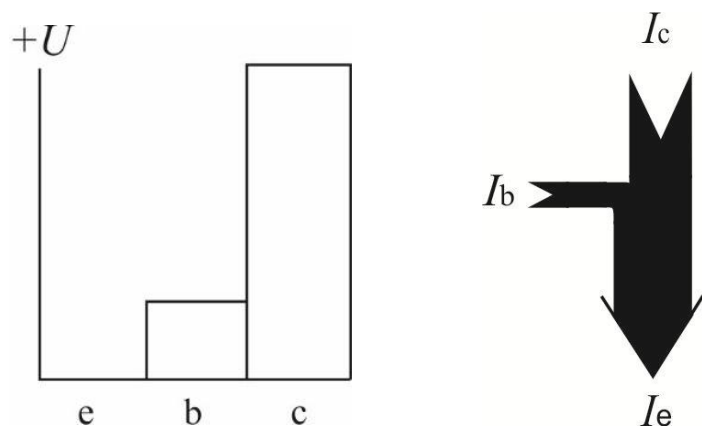


Figuur 8.4-1. Opbouw van een NPN-transistor met namen van de elektroden en geschematiseerde spanningsverdeling.

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.

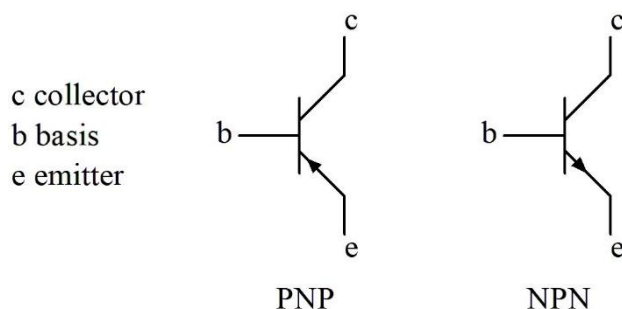
Eigenlijk zien we twee dioden die hun anode, in dit geval de basis, delen. De andere elektroden heten emitter (*uitzender*) en collector (*verzamelaar*). De emitter-basisdiode geleidt. Er stromen elektronen van emitter naar basis. Dat verklaart de naam 'emitter'.

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 basis-collector-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 brengt dat in beeld. 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 β , de Griekse letter voor b. Ook gebruikelijk is het symbool h_{FE} . Dat hoort tot de zogenoemde h -parameters. Die zijn geen examenstof. Alleen deze onthouden dus. Vergelijking::

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

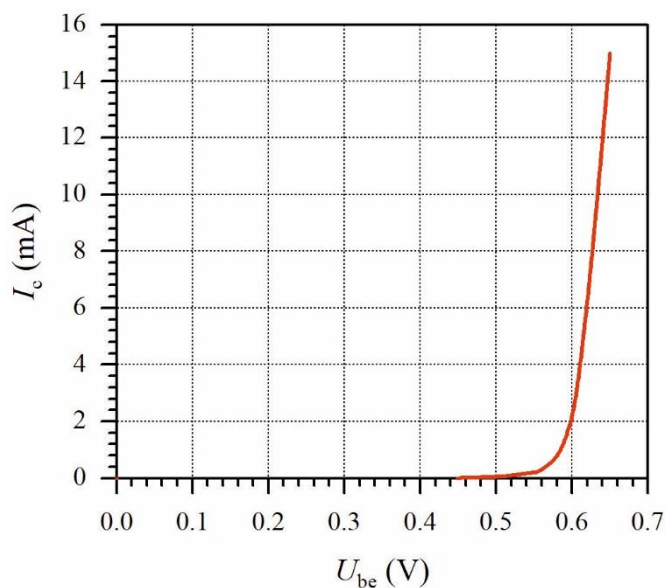
De waarde van β verschilt per type transistor en kan tussen ongeveer 5 en 1000 liggen. Binnen één type kan de waarde gemakkelijk met een factor 2 variëren. Ook is β vrij sterk temperatuurafhankelijk. Dat kan lastig zijn als een transistor tijdens gebruik warm wordt.

Kort samengevat is een transistor een ding waarmee je met een kleine basisstroom een grote collectorstroom stuurt. Het is dus een stroomversterker. Daarin verschilt de transistor van FET en buis, waarin een spanning een stroom stuurt.

In de praktijk is het verschil niet zo groot als het nu misschien lijkt. De basisstroom kan (mede) worden bepaald door een spanning over een weerstand en de collectorstroom kan, net als de drain- of anodestroom bij FET of buis, via een weerstand weer worden omgezet in een spanning.

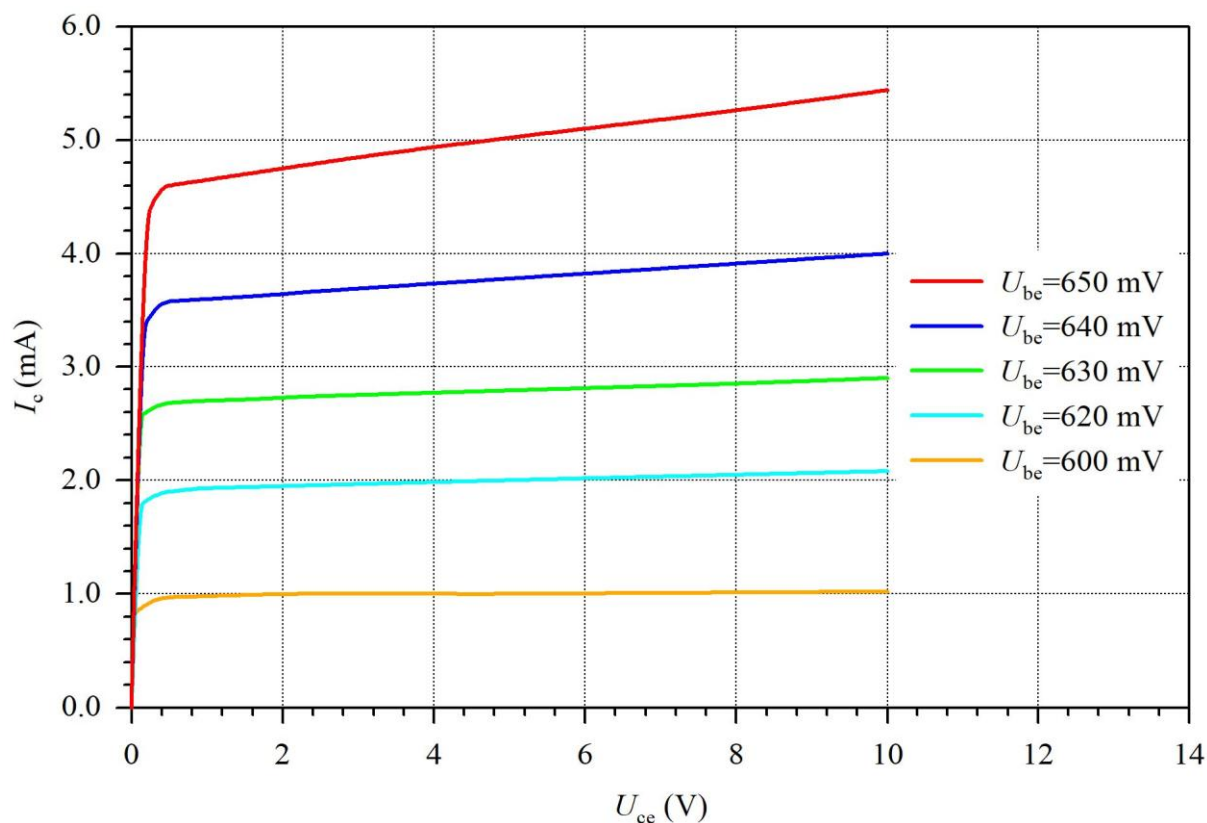
Een groot verschil is dat door een buis of FET een stroom loopt, ook als de gate- of stuurroosterspanning 0 V is. Een transistor spert als de emitter-basis- junctie niet geleidt. Er moet een stroom tussen basis en emitter lopen om de transistor te kunnen laten werken. De emitter-basisjunctie is tenslotte 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 knippunt van de grafiek in de buurt van $U_{be} = 0,2$ V liggen, hier tussen 0,5 en 0,6 V. De grafiek doet denken aan de steilheidskarakteristiek van FET en penthode, maar is steiler.



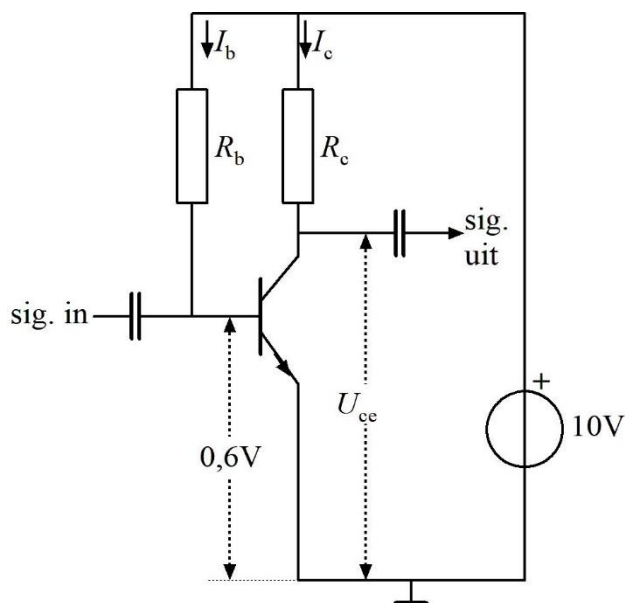
Figuur 8.4-5. I_c/U_{ce} -karakteristieken van de NPN Si-transistor BC107 (data Philips).

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 het 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), maar de ingang (emitter-basis circuit) is laagohmig. Ook al werkt hij anders dan FET of buis, het recept voor spanningsversterking is bij de transistor eigenlijk ongeveer hetzelfde. Het belangrijkste verschil is dat de transistor basisstroom van buitenaf nodig heeft om te kunnen werken. Doordat β 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 voedingsspanning.

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 voedingsspanning 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. Die waarde van 1 V kan overigens tussen typen transistor iets verschillen. De



collectorspanning kan niet hoger zijn dan de voedingsspanning, 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 μA . De basisspanning is ongeveer 0,6 V. Over de basisweerstand R_b moet dan 9,4 V staan. Bij de al gevonden 22,5 μA betekent dit $R_b = U/I = 9,4 \text{ V}/22,5 \mu\text{A} \approx 0,42 \text{ M}\Omega = 420 \text{ k}\Omega$.

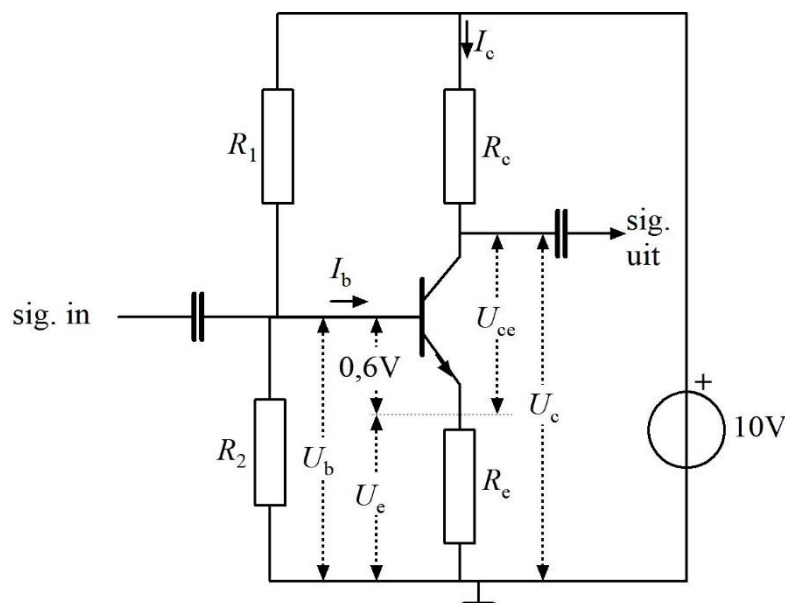
Let op: bij gebruik van V en μA krijg je $\text{M}\Omega$ uit de wet van Ohm!

Het recept samengevat:

1. Bepaal de gewenste collectorspanning uit de voedingsspanning en de minimaal benodigde collector-emitterspanning U_{ce}
2. Bepaal de collectorstroom uit collectorweerstand en verschil tussen voedingsspanning en de zojuist gevonden collectorspanning.
3. Bepaal de basisstroom uit collectorstroom en β (h_{FE} kan ook; is hetzelfde als β)
4. Bepaal de basisweerstand uit voedingsspanning 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 β 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 β . 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 dan de enkele basisweerstand is dan 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 . Maar let op, de emitterweerstand R_e doet ook mee, al is het beperkt. Oorzaak: de basisstroom is gelijk aan de emitterstroom gedeeld door $(\beta+1)$. Dan lijkt R_e via de basis $\beta+1$ keer vergroot. Omdat $\beta \gg 1$ en in de praktijk geen nauwkeurig getal is, mag je voor $\beta+1$ ook β schrijven. De onderste helft van de spanningsdeler is dan de vervangingsweerstand van de parallel geschakelde R_2 en βR_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 tussen basis en massa (0 V), is $\beta+1$ keer zo groot als de emitterweerstand. Afgerond: β keer, want β is veel groter dan 1 en onnauwkeurig.

Nu het bepalen van de transistorinstelling. Bij een stroomvoerende transistor veroorzaakt de emitterweerstand R_e een emitterspanning $U_e > 0V$. Die gaat ten koste van de ruimte voor het versterkte signaal op de collectorspanning U_c . We nemen U_e daarom niet te groot, zeg 1 V. Als R_e 1 k Ω is, moet de emitterstroom 1 mA zijn. Om de transistor goed te laten werken, gaan we uit van Figuur 8.4-5: minimaal 1 V over de transistor. Die 1 V is inclusief de basis-emitterspanning. Dat maakt 2 V van de 10 V over transistor en R_e . Dan is er 8V = 2x 4V over voor de spanningsruimte op de collector. Dat betekent een collectorspanning U_c van 2 V + 4 V = 6 V. Dan kan U_c evenveel omhoog als omlaag. Over de collectorweerstand R_c moet dan 10 V – 6 V = 4 V staan. Bij een stroom van 1 mA is dat bij verwaarlozing van de basisstroom 4 k Ω . Spanningsversterking: bijna 4 (4 k Ω / 1 k Ω).

Nu de spanningsdeler. Als $\beta = 200$, dan is $\beta R_e = 200 \text{ k}\Omega$. Als we R_2 flink kleiner nemen dan βR_e , bijvoorbeeld $20 \text{ k}\Omega$, dan is het effect van βR_e verwaarloosbaar. Dus $R_2 \approx 20 \text{ k}\Omega$. Daarover staat 1 V emitterspanning plus ongeveer $0,6 \text{ V}$ basis-emitterspanning, is ongeveer $1,6 \text{ V}$. Over R_1 staat de voedingsspanning van $10 \text{ V} - 1,6 \text{ V} = 8,4 \text{ V}$. Dan is $R_1/R_2 = 8,4/1,6$. $R_2 \approx 20 \text{ k}\Omega$, dus $R_1 \approx 8,4 \cdot 20 \text{ k}\Omega / 1,6 \approx 52,5 \text{ k}\Omega$.

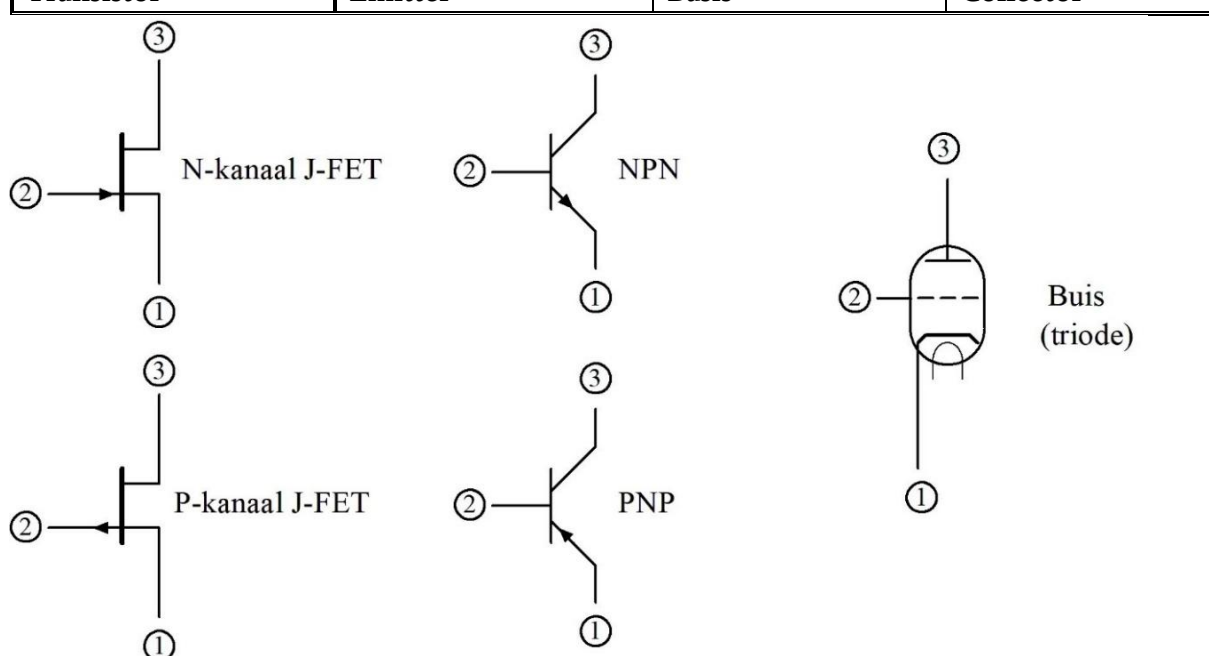
8.5 De drie basisschakelingen

8.5.1 Inleiding

In het voorgaande hebben we enkele versterkerschakelingen gezien. Er zijn er meer. Die gaan we systematisch bespreken. Met elk van de drie soorten versterkende elementen zijn er drie vergelijkbare schakelingen mogelijk. Steeds geldt hetzelfde principe: laagohmig waar de ladingdragers het element ingaan en hoogohmig waar ze er uitkomen. Er zijn drie soorten schakelingen per element. Tabel 8.5-1 geeft de overeenkomstige aansluitingen, Figuur 8.5-1 de schemasymbolen en de overeenkomstige nummers in de tabel.

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 figuren onder de tabel tonen de schemasymbolen voor de vijf elementen. Elk symbool heeft drie aansluitingsnummers: 1, 2, en 3. Voor de J-FET's (N-kanaal en P-kanaal) is 1 de source/emitter, 2 de gate/basis, en 3 de drain/collector. Voor de NPN en PNP transistoren is 1 de emitter, 2 de basis, en 3 de collector. Voor de buis (triode) is 1 de kathode, 2 de rooster, en 3 de anode.

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 weinig 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.

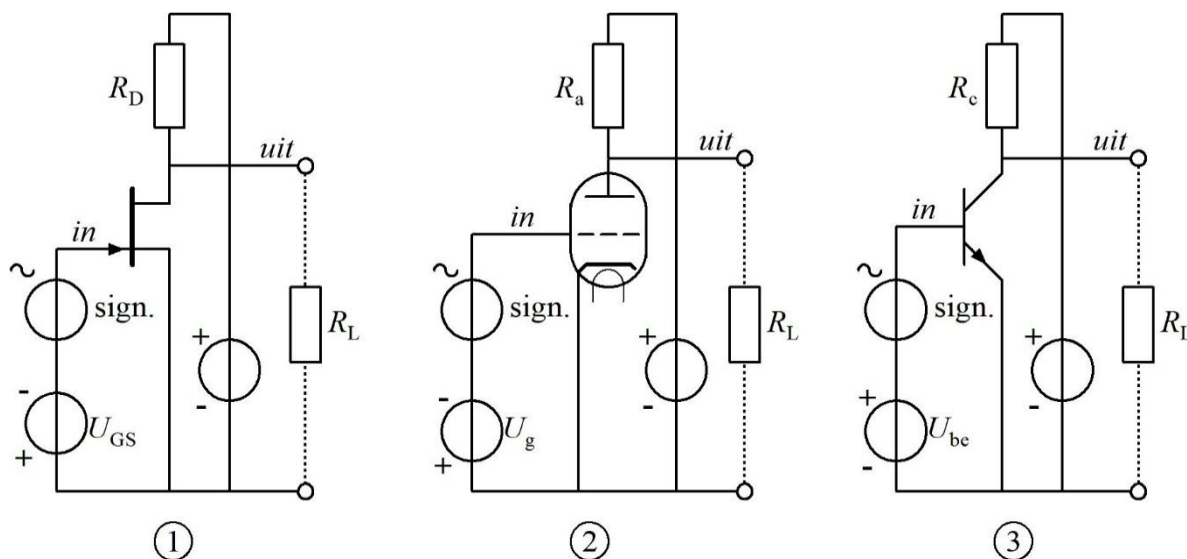
Comb.	Element	Ingang	Uitgang	Gemeenschappelijk, naam	Afkorting
A	FET	Gate	Drain	Gem. sources schakeling	GSS
	Buis	Rooster	Anode	Gem. kathodes schakeling	GKS
	Transistor	Basis	Collector	Gem. emitters schakeling	GES
B	FET	Source	Drain	Gem. gates schakeling	GGs
	Buis	Kathode	Anode	Gem. roosters schakeling	GRS
	Transistor	Emitter	Collector	Gem. basiss schakeling	GBS
C	FET	Gate	Source	Gem. drains schakeling	GDS
	Buis	Rooster	Kathode	Gem. anodes schakeling	GAS
	Transistor	Basis	Emitter	Gem. collectors schakeling	GCS

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 be $\textit{Lasting}$ of het Engelse $\textit{Load}$). 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). Signaalingangen zijn aangegeven met "in"; uitgangen met "uit".

De signaaluitgangen drain, anode en collector zijn alle drie hoogohmig, dat wil zeggen dat de stroom via drain, anode of collector weinig spanningsafhankelijk is.

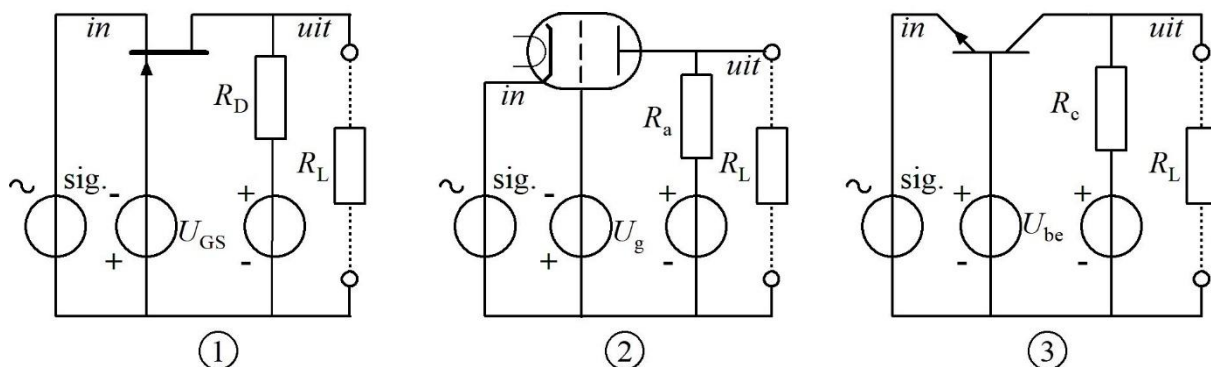
Bij de signaalingangen gate, rooster en basis is er verschil tussen FET en buis enerzijds en de transistor anderzijds. Bij FET en buis is de stroom door het element spanninggestuurd. De steilheid ligt in dezelfde orde van grootte, meestal 2-10 mA/V. Een transistor wordt in geleiding gebracht door basisstroom, die de basis-emitterovergang in geleiding brengt. Dat gebeurt, als de basis-emitterspanning ongeveer 0,6 V is.

De 'steilheid' van een transistor, voorzover je daarvan kunt spreken, is veel groter dan die van FET of buis. Daardoor is de spanningsversterking bij een transistor vrijwel gelijk aan de verhouding collectorweerstand/emitterweerstand. De spanningsversterking bij FET en buis is iets kleiner dan de vergelijkbare verhouding sourceweerstand/drainweerstand, respectievelijk kathodeweerstand/anodeweerstand.

Een belangrijke eigenschap van combinatie A is **dat de wisselspanning op de signaaluitgang in tegenfase is met die op de signaalingang.**

8.5.3 Combinatie B. Gemeenschappelijke gate/rooster/basischakeling

De drie schakelingen staan in hun eenvoudigste vorm in Figuur 8.5-3.



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

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

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

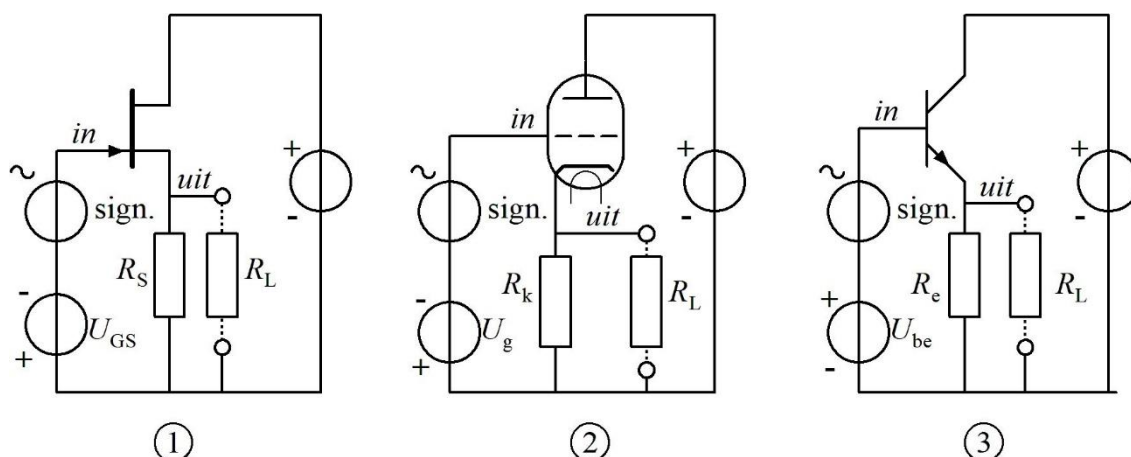
De stroomversterking is dus 1 en bij de transistor praktisch 1. De spanningsversterking is even groot als bij combinatie A (8.5.2), de GSS, GKS en de GES.

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). Signaalingangen zijn aangegeven met “in”; uitgangen met “uit”.

De signaaluitgang is de source, kathode of emitter. De spanningsversterking is bij FET en buis iets minder dan 1, voor de transistor vrijwel 1. Het kleine verschil zit in de steilheid. De stroomversterking is bij alle drie groot: voor FET en buis in theorie oneindig, voor de

transistor ongeveer gelijk aan β . De signaalspanning op de uitgang volgt vrijwel de spanning op de signaalingang. Een andere naam voor deze drie schakelingen is source-, kathode- of emittervolger. **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. De ingangsweerstand voor het signaal bij de gemeenschappelijke collectorschakeling (emittervolger) is gelijk aan $\beta+1$ (in de praktijk β omdat β 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 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	β
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	β
Faseverschil in/uit	0°	0°	0°