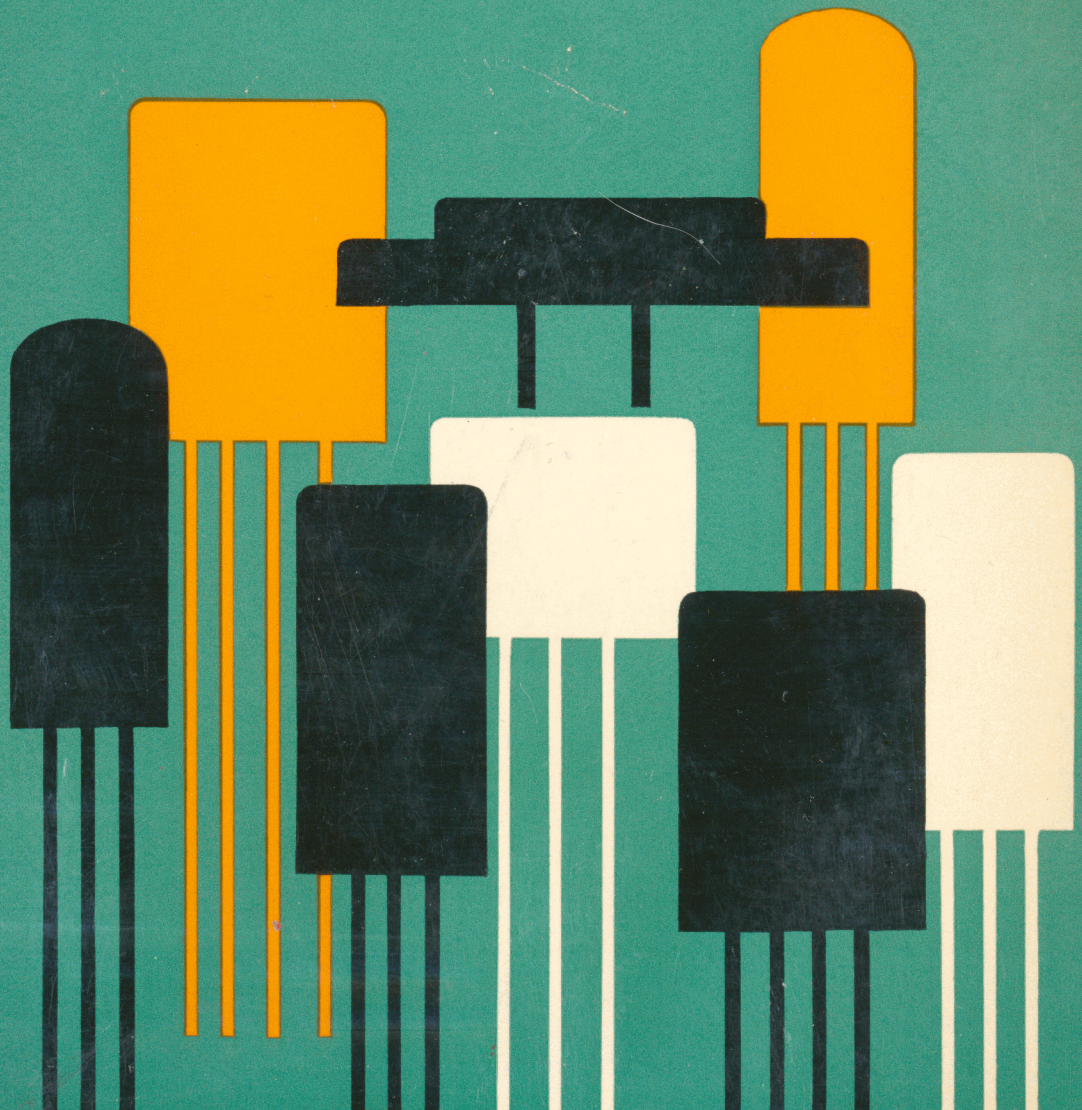
E. Aisberg

Zo... werkt de transistor



ZO .... WERKT DE TRANSISTOR!

Oorspronkelijke titel: le Transistor? . . . Mais c'est très simple!

E. AISBERG

Zo . . . werkt de Transistor!

Het Hoe en Waarom van de Transistor in woord en beeld

Scannen en grafische bewerkingen: PE1ABR

MET KANTLIJNTEKENINGEN VAN
POL FERJAC

3e DRUK

N.V. UITGEVERSMAATSCHAPPIJ Æ. E. KLUWER
DEVENTER - ANTWERPEN

Van dezelfde auteur verschenen:

Zo .... werkt de radio (vijftiende druk)
Zo .... werkt de televisie (vierde druk)
Zo .... gaat TV-storingzoeken (tweede druk)

„Het is beter een goed boek te vertalen dan een middelmatig boek te schrijven."

WOORD VOORAF

Wat hadden we toch weinig moeite om de in rustig tempo verlopende ontwikkeling van de radiotechniek bij te houden, tot aan die dag in 1948, toen door de komst van de transistor alles op zijn kop werd gezet! Dat gaf een revolutionaire ommekeer . . .
In luttele jaren zagen halfgeleidertoepassingen kans zich een blijvende positie te verwerven op de belangrijkste gebieden van de elektronica. Er begon een geheel nieuwe techniek te ontstaan naast de vanaf dat ogenblik als klassiek te beschouwen techniek van de „buizenjongens". En zij hebben heel wat moeite gehad om over te schakelen naar de nieuwe ideeën en begrippen, nodig voor het werken met die kristaltrioden.
We hebben ons afgevraagd of er leerboeken bestaan, die van nut kunnen zijn bij de overschakeling van buizen naar transistoren.
Op het gebied van de transistoren bestaat een groot aantal uitstekende vakwerken op hoog technisch niveau, maar het lezen hiervan vereist een gevorderde kennis van de wiskunde en van de natuurkunde van de vaste stof, welke kennis dikwijls niet eenvoudig verkregen kan worden. Daarentegen bestaat er slechts een zeer gering aantal goede boeken op middelbaar niveau, geschikt voor die beoefenaars van de radiotechniek, die verder willen komen op transistorgebied en die er zoveel van willen leren dat ze zonder moeite de opzet van moderne schema's met die „driepootjes" kunnen begrijpen.
Toch bestaat er een pijnlijke behoefte aan dergelijke boeken voor beginners. Mijn dagelijks contact met talloze vaklieden en amateurs heeft ook aangetoond, dat de meeste boeken te weinig elementaire transistortheorie geven. Dit is de reden dat we hebben gepoogd een boek te schrijven, bestemd voor hen die reeds fundamentele kennis bezitten op het gebied van de radiotechniek (al is het maar op het niveau van „Zo . . . werkt de radio") en die zich zonder al te veel moeite willen inwerken in de bijzonderheden van de transistortechniek.
Het schrijven van zo'n boek bleek geen gemakkelijke taak. Transistoren brengen een aantal problemen mede, welke op een ander gebied liggen dan bij de elektronenbuizen. De onderlinge samenhang van alle parameters, de lage ingangsweerstand, de thermische eigenschappen, het zijn evenzovele hinderpalen op de weg naar begrip van deze nieuwe techniek. Dat is dan ook de reden waarom het aanvankelijk in de bedoeling lag dit boek te noemen „Wat moeilijk is toch zo'n transistor" („Le transistor? . . . mais ce n'est pas si simple!". Een zin uit de eerste paragraaf geeft hier overigens de verklaring voor.) Maar hoe meer we schreven over de gesprekken die Vraagal en Weetal, de twee hoofdpersonen uit dit boek, hielden, des te meer werden we ervan overtuigd dat hun zienswijze alle moeilijkheden deed verdwijnen. Het scheen ons dan ook gerechtvaardigd een titel te gebruiken, die overeenstemming vertoont met die van onze boeken over radio en televisie.
Wil dit nu zeggen dat de inhoud van de volgende bladzijden zonder enige moeite kan worden begrepen? Zeker niet. Het zal de lezer heel wat aandacht kosten en hij zal niet verder komen als hij zich de fundamentele begrippen niet goed eigen maakt.

Moge de lichtvoetige humor, waarmee de kanttekeningen zijn gemaakt, door zijn geestigheid niet de valse schijn wekken dat dit gebied erg eenvoudig te betreden is! Deze schetsen zijn een steun bij de begripsvorming, ze vullen de tekst aan en geven een houvast waarvan we de didactische waarde niet te gering mogen schatten. Maar om kennis te verwerven moet gestudeerd worden, gestudeerd met hardnekkigheid, met toewijding en — vooral — regelmatig.

Sommigen zullen in ons verhaal onderwerpen aantreffen die ze reeds kennen, zoals de constructie van de belastingslijn of het probleem van de optimale vermogensoverdracht. Des te beter voor hen! Anderen zullen daarentegen heel wat moeite hebben om zich de in dit boek veel gebruikte karakteristieken in het hoofd te prenten.

Men moet geen volledige strenge transistortheorie verwachten. Evenmin zal men er volledige gegevens voor het zelf bouwen van verschillende apparaten in aantreffen. Ons doel was slechts het verdiepen van het begrip. We hebben ons best gedaan om uit de grote hoeveelheid gegevens en schema's van een nog in volle ontwikkeling verkerende techniek het wezenlijke naar voren te halen, met verwaarlozing van datgene wat ons van voorbijgaand belang scheen.

De twee personen waarvan de levendige gesprekken zijn vastgelegd op de volgende bladzijden, hebben niets geleerds of ernstigs. Ze houden zich beslist aan de raadgeving van Montesquieu, die de uitspraak deed dat „de ernst het geluk van de dommen uitmaakt". Laten we daarom hopen dat de lezer, naarmate hij deze bladzijden verder bestudeert, het genoegen mag smaken zich tegelijkertijd te ontspannen en zijn kennis uit te breiden. Dat is wat we hem zouden willen schenken.

E. A.

VOORBERICHT VAN DE VERTALER

Bij de eerste druk

De huidige transistor is tot stand gekomen door intensieve samenwerking van geleerden en technici uit tal van landen. Hierdoor heeft de transistor in minder dan tien jaar tijd een positie bereikt, die de radiobuis ernstig concurrentie aandoet. Voor alle beginners op het terrein van de radiotechniek is de noodzaak ontstaan, zowel de werking van radiobuizen als van transistoren te leren begrijpen.
En al diegenen die reeds lang ervaring in de buizentechniek hebben, zullen zich in de transistortechniek moeten gaan verdiepen, ook al valt hun dat zwaar. Juist zij die hun studietijd al geruime tijd achter de rug hebben, zullen hierbij verlangend uitzien naar een boek dat zich laat lezen als ontspanningslectuur, maar dat toch technisch verantwoord is.
De bekende Franse schrijver van radioboeken, Aisberg, heeft naast zijn prettig leesbare boeken over Buizenradio en Televisie ook een soortgelijk boek over Transistorradio het licht doen zien. De radiotechniek is, dankzij de reeds genoemde internationale samenwerking, gelukkig zo „grenzenloos", dat het op geen enkel punt nodig was de tekst speciaal voor Nederland te bewerken. Wel zijn in overleg met de schrijver enige verduidelijkingen aangebracht. Dit overleg verliep op dezelfde gemoedelijke wijze als de gesprekken tussen Weetal en Vraagal die in dit boek beschreven zijn.

Januari 1963 De uitgeefster

Bij de tweede druk

Deze druk is gelijk gebleven aan de vorige.

September 1963 De uitgeefster

Bij de derde druk

Deze druk is behoudens enkele verbeteringen gelijk gebleven aan de vorige druk.

Juli 1966 De uitgeefster

Scannen en grafische bewerkingen: PE1ABR

INHOUD

Woord vooraf
Inleiding

Eerste praatje: **Hoe het bij de atomen toegaat** 1

Halfgeleiders. – Werking en voordelen van de transistor. – Invloed van de temperatuur op transistoren. – Grenzen ten aanzien van frequentie en vermogen. – Moleculen. – Atomen. – Protonen, neutronen en elektronen. – Verdeling van de elektronen op schillen. – Ionisatie. – Chemische waardigheid. – Kristalstructuur.

Tweede praatje: **De overgangen** 14

Intrinsieke geleidendheid. – Fotoweerstand- en foto-emissiecellen. – Verontreinigingen. – Donors. – Gaten. – Acceptors. – P- en N-halfgeleiders. – Overgangen. – Potentiaalwal. – Doorlaat- en keerspanning. – Zenerspanning. – Dioden. – Toepassing van halfgeleiders in gelijkrichterschakelingen.

Derde praatje: **Transistor, ik groet u zeer** 24

P-N-P- en N-P-N-transistoren. – Lekstroom. – Basisstroom. – Transistorwerking. – Stroomversterking. – Overeenkomst tussen buis en transistor. – Ingangs- en uitgangsimpedantie. – Spanningsversterking. – Voeding van transistoren.

Vierde praatje: **Wat gebeurt er in een transistor** 32

Beweging van ladingen. – Meerderheidsladingdragers. – Werking van de P-N-P-transistor. – Drie-vijf-verbindingen. – Het aanbrengen van de verbindingsdraden. – Transistorsymbolen. – Overzicht van de te onthouden begrippen.

Vijfde praatje: **Het een en ander over de fabricage** 40

Zuivering door middel van zonesmelten. – Radiofrequente verwarming. – Het trekken van een éénkristal. – Het zagen ervan. – Getrokken transistoren. – Legeringstransistoren. – Problemen bij het vervaardigen van vermogenstransistoren. – Het toepassen van diffusie. – Looptijd. – De rol van de emitter-collector-capaciteit. – Tetrodetransistor. – Oppervlaktekeerlaagtransistoren. – Dubbele-diffusiemethode. – Drifttransistoren. – P-N-P-transistoren. – Mesatransistoren. – Transistoren met veldeffect.

Zesde praatje: **Grafieken en nog eens grafieken** 51

Schakeling voor het opnemen van karakteristieken. – $I_b = f(U_b)$-krommen en $I_c = f(U_b)$-krommen. – Steilheid. – Stroomversterking. – Ingangsweerstand. – Verband tussen steilheid, inwendige weerstand en stroomversterking. – Verzadiging. – Karakteristieken. – Overeenkomst met de pentode. – Maximaal toegestaan vermogen. – Uitgangsweerstand. – Het aflezen van de parameters uit de karakteristieken.

Zevende praatje: **Rechten en krommen** 62

Statische en dynamische karakteristieken. – Het trekken van de belastingslijn. – Het werkpunt. – Stroom-, spannings- en vermogensversterking. – Maximale uitsturing. – Kniespanning. – Keuze van de belastingsimpedantie. – Dynamische steilheid. – Het instellen van de basisgelijkspanning.

Achtste praatje: **Wil je de wereld verbeteren? Begin dan bij jezelf** 71

De voordelen van tegenkoppeling. – Stroom en spanningstegenkoppeling. – Schema's met buizen en transistoren. – Invloed van de tegenkoppeling op in- en uitgangsweerstand. – Fazevervorming bij gebruik van transistoren. – Inwendige tegenkoppeling. – De invloed van de temperatuur op de vervorming. – Compensatie hiervan door tegenkoppeling. – Gebruik van temperatuur-afhankelijke weerstanden.

Negende praatje: **Emitter-, basis- en collectorschakeling** 82

Schakelingen van een buis met gemeenschappelijke kathode, rooster of anode. – Schakelingen van een transistor met gemeenschappelijke emitter, basis of collector. – Stroom- en spanningsversterking in de drie fundamentele schakelwijzen. – Bijbehorende in- en uitgangsweerstanden. – Overzichtstabel van de kenmerkende eigenschappen.

Twee brieven: **Aanpassingsmoeilijkheden** 91

Spanningsbronnen en belastingen. – Elektromotorische kracht en inwendige weerstand. – Klemspanning. – Spanningssturing. – Stroomsturing. – Voorwaarde voor maximale vermogensoverdracht. – Impedantie-aanpassing. – Gebruik van een transformator. – Gunstigste transformatieverhouding.

Tiende praatje: **Verschillende koppelmethoden** 97

Fundamentele transistorschakelingen met N-P-N-transistoren. – Voor- en nadelen van transformatorkoppeling. – Geluidssterkteregeling. – RC-koppeling. – Waarde van de koppelcondensator. – Gelijkstroomkoppeling. – Gelijkstroomversterkers. – Schema's met complementaire transistoren. – Serieschakelingen van transistoren.

Elfde praatje: **Rendement en vermogen** 109

Keuze van het werkpunt. – Stroombesparende schakeling met glijdend werkpunt. – Balans-B-trap. – Faze-omkering met transformatoren. – Fazeomkeerschakelingen. – Fazeomkeerschakeling met een transistor. – Balanstrap met complementaire transistoren. – Uitgevoerd schema van een uitgangstrap.

Twaalfde praatje: **Het radiofrequente gebied** 119

Afsnijfrequentie. – Koppeling met afgestemde kringen. – Demping. – H.F.- en M.F.-trappen. – Collector-basis-capaciteit. – Neutrodynisatie. – Automatische fadingcompensatie. – Variaties van de inwendige capaciteiten en weerstanden. – Versterkte regeling.

Dertiende praatje: **Van H.F. naar M.F. en tenslotte naar L.F.** 127

Diodedetectie. – Detectiedrempel. – Uitgevoerde schema's. – Detectie met een transistor. – Detector met terugkoppeling. – Oscillatorschema's. – Frequentietransformatie met en zonder afzonderlijke oscillator.

Veertiende praatje: **Treintje spelen** 134

Volledig ontvangerschema. – Ferrietantenne. – Verschillende toepassingsmogelijkheden voor transistoren. – Gelijkstroomomvormer. – De toekomst van de transistor.

ENIGE NUTTIGE GEGEVENS VOOR DE LEZERS VAN DIT BOEK

Symbolen voor eenheden		Decimale factoren
m — meter	W — watt	M — mega (1 000 000)
g — gram	F — farad	k — kilo (1 000)
s — seconde	H — henry	m — milli (0,001)
V — volt	Hz — hertz (periode	μ — micro (0,000 001)
A — ampère	per seconde)	n — nano (0,000 000 001)
Ω — ohm		p — pico (0,000 000 000 001)

Wanneer men de decimale factoren voor die van de eenheden plaatst, verkrijgt men de verschillende veelvouden en gedeelten van die eenheden, volgens onderstaand voorbeeld:

mm — millimeter	mV — millivolt	pF — picofarad
μs — microseconde	μV — microvolt	kHz — kilohertz
mA — milliampère	MΩ — megohm	MHz — megahertz
μA — microampère	μF — microfarad	mW — milliwatt

RICHTING VAN DE STROOM

De elektrische stroom wordt geleverd door een verplaatsing van elektronen. Deze lopen *in de uitwendige keten van de negatieve naar de positieve pool.* Deze stroomrichting wordt in het gehele boek aangehouden (dit in tegenstelling met het normaal gebruikelijke, waarbij aangenomen wordt dat de stroom van positief naar negatief gaat). Wanneer de stroom door een weerstand loopt, ontstaat hierover een spanningsverlies. Het uiteinde van de weerstand waar de stroom *binnenkomt,* is *negatief* ten opzichte van het uiteinde waar de stroom uitgaat.

IN DIT BOEK GEBRUIKTE SYMBOLEN

Bij de gesprekken over de verschillende eigenschappen van transistoren, vinden we de volgende symbolen:

I_e — emitterstroom
I_b — basisstroom
I_c — collectorstroom
U_b — basisspanning
U_c — collectorspanning
r_i — ingangsweerstand
r_u — uitgangsweerstand

α — stroomversterking in basisschakeling
β — stroomversterking in emitterstroomschakeling
γ — stroomversterking in collectorschakeling
μ — factor welke de inwendige terugwerking aangeeft

De spanningen zijn aangegeven met U.

Δ staat altijd voor een zeer kleine verandering van de grootheid waaraan deze Griekse letter (delta) vooraf gaat.

De lezers behoeven zich hier voorlopig nog geen zorgen over te maken, want er is nog gelegenheid genoeg om deze symbolen te leren gebruiken!

Laten we nu eens gaan luisteren naar wat Weetal en Vraagal te zeggen hebben . . .

DE PERSONEN

Weetal, jong leraar in de elektronentechniek heeft de grondbeginselen van de radiotechniek geleerd van zijn oom Radiolus en is altijd bereid te voldoen aan de onuitputtelijke nieuwsgierigheid van zijn vriend....
Vraagal, die zijn eerste leerling werd. Hun gesprekken zijn weergegeven in de twee boeken („Zo... werkt de radio" en Zo... werkt de televisie"). Wie deze boeken gelezen heeft, weet dat al mankeert het Vraagal soms aan kennis van bepaalde grondbeginselen, hij dit vergoedt door zijn buitengewone vlotheid van begrip. Vraagal werkt tegenwoordig bij een fabriek van radio-ontvangers.

EERSTE PRAATJE

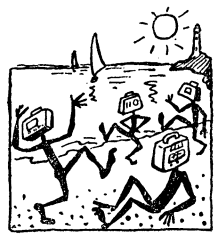
HOE HET BIJ DE ATOMEN TOEGAAT

Het is niet mogelijk een eenvoudig inzicht in de werking van transistoren te krijgen, zonder wat dieper in te gaan op bepaalde begrippen uit de natuur- en de scheikunde over de samenstelling van en het onderlinge verband tussen de atomen. Hierover gaat dan ook het hieronder volgende gesprek tussen onze beide vrienden.

Samenvatting: Halfgeleiders. — Werking en voordelen van de transistor. — Invloed van de temperatuur op transistoren. — Grenzen ten aanzien van frequentie en vermogen. — Moleculen. — Atomen. — Protonen, neutronen en elektronen. — Verdeling van de elektronen op schillen. — Ionisatie. — Chemische waardigheid — Kristalstructuur.

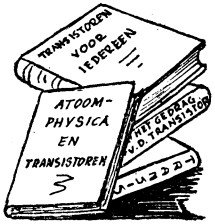
Vraagal als slachtoffer van de transistoren

Weetal. — Prettig je weer te zien, beste vriend. Heb je een goede vakantie gehad?
Vraagal. — Nee, jammer genoeg niet.
W. — Slecht weer gehad met regen en storm?
Vr. — Nee, helemaal niet, het weer was fantastisch mooi. Maar op het strand kon je geen rust vinden, want van alle kanten kwamen er vakantiegangers met loeiende transistorontvangers. Bestookt door het gekrijs van zangeressen en van wilde dansmuziek werden mijn zenuwen danig op de proef gesteld. En daarbij komt nog, dat ik graag wilde weten, hoe die transistorapparaten kans zagen zoveel herrie te maken, zodat ik geprobeerd heb er een paar boeken over te lezen, in de hoop enige kennis te verwerven over theorie en toepassingen van de transistor... Maar ik heb er niets van begrepen!



W. — Ik begrijp hoe bitter gestemd je je voelt na die mislukking. Maar laat je liefde voor de techniek er niet onder lijden: De transistoren zijn naar mijn mening niet zo eenvoudig te begrijpen. Toen Lord Hailsham in mei 1959 in Londen het Internationaal Congres over Transistoren opende zei hij: „Ik denk niet dat er zelfs in de meest ge-

industrialiseerde landen één op de tienduizend personen in staat is uit te leggen wat een transistor is, of zelfs wat halfgeleiders zijn."



Vr. — Dat troost me des te meer, omdat ik denk wel te kunnen zeggen wat een halfgeleider is.

W. — Bravo, Vraagal! Vooruit dan maar: laat maar zien wat je er van weet.

Beestjes met drie poten

Vr. — Wel, een materiaal wordt halfgeleider genoemd als het veel meer weerstand heeft dan bij geleiders het geval is, maar ook weer veel minder weerstand dan bij isolatoren.

W. — Dat is een juiste, maar door zijn vaagheid nog geen erg mooie definitie. Laten we, om het wat nauwkeuriger te zeggen, vaststellen dat een halfgeleider zoals germanium een soortelijke weerstand heeft, die 300 miljoen maal zo hoog is als die van koper. Maar deze waarde ligt nog bijna een biljoen keer onder die van glas.

Vr. — Waaruit volgt, dat germanium in de schaal van de soortelijke weerstanden veel dichter bij de geleiders ligt dan bij de isolatoren?

W. — Ja. En omdat het germanium een bijzondere manier van stroomgeleiding vertoont, is het mogelijk er van die beestjes met drie pootjes van te maken.

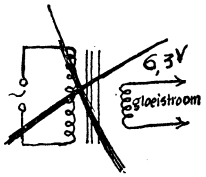
Vr. — Waar heb je het nu weer over?

W. — Dat is een naam die je aan de transistoren (of kristaltrioden) zou kunnen geven, want ze zijn uitgerust met drie aansluitdraadjes.

Vr. — Waaruit ik dus mag besluiten, dat de transistor de elektronenbuis kan vervangen. Kan hij dat op alle punten? En wat zijn de voordelen?

W. — Ik word bedolven onder al je vragen... Ja, vriend Vraagal, de transistor kan net als een elektronenbuis signalen versterken of detecteren; hij kan ook elektrische trillingen opwekken; en je kunt hem ook als menger gebruiken en er alle andere grapjes mee uithalen die we met elektronenbuizen gewend zijn. Wat de voordelen betreft, dat zijn er heel wat. Om maar mee te beginnen: *de afwezigheid van een gloeidraad.*

Vr. — Dat is reuze! Je hebt dus geen aparte gloeistroombron meer nodig, zoals bij de radiobuizen?



W. — Nee, en daarom beginnen transistoren ook direct te werken nadat ze ingeschakeld worden, terwijl je bij buizen eerst nog de nodige tientallen seconden moet wachten voordat hun kathoden voldoende warm zijn geworden om genoeg elektronen te emitteren.

Vr. — Ik denk ook, dat de afwezigheid van een gloeidraad een *zuiniger gebruik van de voedingsenergie* zal meebrengen. Want in vacuümbuizen gaat aardig wat energie in warmte verloren.

W. — Dat klopt. Bij transistoren komt die betreurenswaardige verspilling, waarbij elektrische arbeid wordt omgezet in onnutte warmte, niet voor. Daar waar een elektronenbuis gemakkelijk 2 of 3 W opneemt, doet een transistor het best met 30 mW, dat is dus *honderd maal minder vermogen.* In plaats van de circa 200 V, die de buizen in een ontvanger nodig hebben, is de transistor verder best tevreden met een spanning van nog geen 10 V.

Vr. — Dat betekent dus, dat een of twee ouderwetse zaklantaarnbatterijtjes voldoende zijn om de matige honger van een transistorontvanger te stillen.

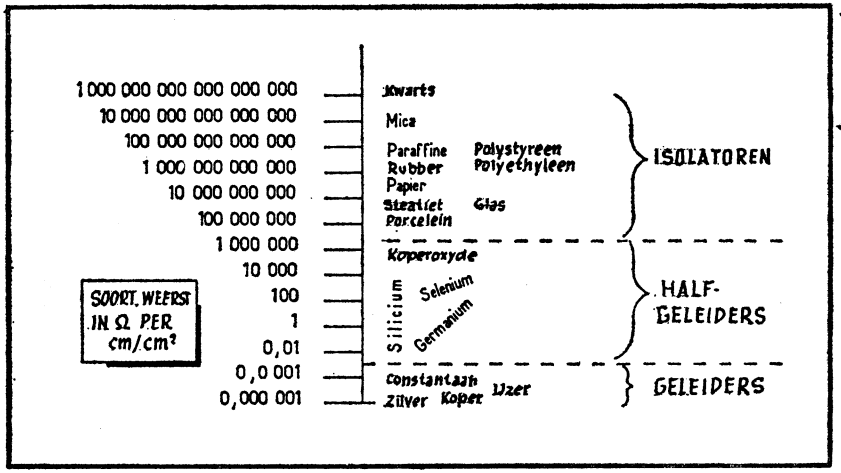


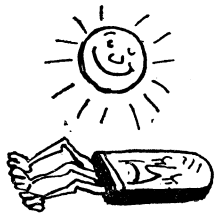
Fig. 1. Overzicht van een aantal belangrijke geleiders, halfgeleiders en isolatoren, gerangschikt naar hun soortelijke weerstand. De soortelijke weerstand van halfgeleiders kan in een zeer groot gebied liggen, reden waarom ze op de schaal als een meer of minder brede strook zijn aangegeven.

W. — Ja, dat is juist de voedingsbron die wordt toegepast bij die draagbare radiotoestelletjes, die je het leven op het strand hebben vergald.

Vr. — Heb ik het bij het rechte eind als ik zeg dat transistoren sterker zijn en langer meegaan dan elektronenbuizen, omdat ze niet zo'n breekbare gloeidraad hebben en geen kathode waarvan de elektronenemissie kan teruglopen?

W. — Ook dat klopt. De transistor onderscheidt zich én door zijn mechanische sterkte (want het gaat om een doosje met een stukje germanium- of siliciumkristal, voorzien van drie draadjes), én door zijn kleine gewicht en zeer geringe afmetingen.

Vr. — Dat is prachtig! Alleen maar voordelen en geen nadelen!

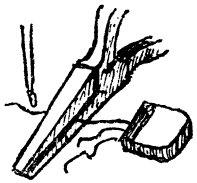


De keerzijde van de medaille

W. — Het is altijd gevaarlijk om te snel je mening uit te spreken. Jammer genoeg heeft de transistor ook bepaalde bezwaren. Het meest ernstige hiervan is, dat hij heel slecht tegen warmte kan. Bij omgevingstemperaturen boven 55 °C doet hij het niet erg goed meer en wanneer hij warmer wordt dan 85 °C, is het met zijn goede eigenschappen gedaan, zelfs als hij weer afgekoeld is. [1]) Dat is tenminste zo met germanium-

[1] Sommige vermogenstransistoren kunnen temperaturen tot 100 °C verdragen. Dit bereikt men door toevoeging van een betrekkelijk hoog gehalte aan verontreinigingen.

transistoren. Siliciumtransistoren verdragen zonder bezwaar heel wat hogere temperaturen: 150 °C bezorgt hun geen angst. Want in silicium zijn de elektronen van de buitenschil heel wat steviger aan de kern gebonden, zoals je later wel zult zien.



Vr. — Ik beloof je nooit met mijn soldeerbout aan een transistor te komen.

W. — Daar doe je goed aan. Of je moet bij het solderen aan de draadjes van een transistor voorkomen dat de warmte van de soldeerbout het lichaam van de transistor bereikt.

Vr. — En hoe doe je dat?

W. — Dat gaat heel goed, door het stukje van het aansluitdraadje tussen de transistor en de punt van de bout in de bek van een tang te nemen... Verder maken de transistorfabrikanten de aansluitdraden van slecht warmtegeleidend materiaal (gelukkig kan de stroom er nog wel door!).

Vr. — Zijn er nog andere verwijten, die je de transistor zou willen maken?

W. — Jammer genoeg wel. Namelijk zijn beperkingen in frequentie en vermogen. Hij doet het niet meer boven een paar duizend MHz...

Vr. — Dat is nog niet zo gek, als je er aan denkt dat een MHz een miljoen trillingen per seconde is.

W. — En hij werkt ook niet goed meer bij grote vermogens. Want de warmte die dan in het transistorlichaam wordt opgewekt, kan niet voldoende worden afgevoerd, zodat de inwendige temperatuur te hoog wordt.

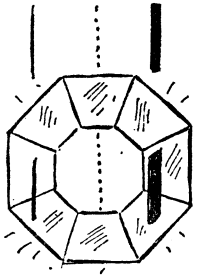
Vr. — Denk je dat deze bezwaren een beletsel zullen vormen bij de invoering van de transistor?

W. — Beslist niet. Vanaf 1948, toen drie Amerikaanse natuurkundigen, Bardeen, Brattain en Shockley de transistor uitvonden (zij kregen er de Nobelprijs voor), is de transistor steeds verder verbeterd. Op de meeste plaatsen vervangt hij nu al met voordeel de vacuümbuis. Om verschillende redenen denk ik echter niet, dat men het eens helemaal zonder vacuümbuizen zal doen.

Bij het begin beginnen

Vr. — Nu het leven me niet meer onmogelijk gemaakt wordt door het kabaal van al die ontvangertjes op het strand, voel ik meer dan ooit behoefte om te begrijpen hoe transistoren werken en op welke manier ze toegepast worden.

W. — Merkwaardig genoeg: zo eenvoudig als de transistorschakelingen in de gewone schema's eruit zien, zo ingewikkeld zijn de verschijnselen die zich afspelen in die uiterst kleine kristaltrioden.



Vr. — Omdat je het woord trioden gebruikt, veronderstel ik dat er in de transistor een kathode, een rooster en een anode zitten.

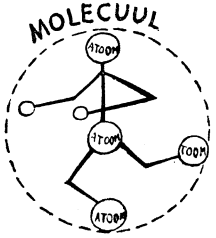
W. — Inderdaad zijn er gebieden in de transistor, die in zekere zin een overeenkomstige rol spelen als de elektroden van een triode: uitzenden van een elektronenstroom, regelen van de sterkte en opvangen. En als je een beetje op wilt schieten, kan ik je wel een korte verklaring geven van de toepassing van transistoren zonder nader in te gaan op de grondslagen van de werking. Voel je daar iets voor?

Vr. — Nee, ik wil liever een duidelijk begrip hebben van wat er in werkelijkheid gebeurt. Je hebt me geleerd datgene wat er zich bij de te onderzoeken verschijnselen afspeelt te analyseren en te beredeneren. Laten we proberen aan die goede gewoonte vast te houden.

Moleculen en atomen

W. — Je hebt gelijk. Maar we zullen moeten beginnen met het begin, dat wil zeggen bij de samenstelling van de stof.

Vr. — Dat lijkt me . . . een onderwerp dat we goed kennen. Het kleinste deeltje van een stof dat nog alle chemische eigenschappen ervan bezit, heet volgens mijn natuurkundeboek een *molecule.*



W. — En dan vergeet je nog te zeggen, dat we vandaag een half miljoen verschillende soorten moleculen kennen, die alle bestaan uit verschillende combinaties van zo'n 100 enkelvoudige elementen.

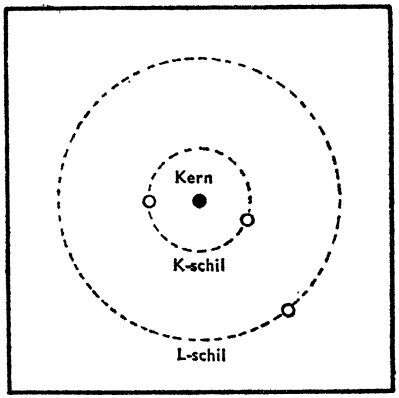
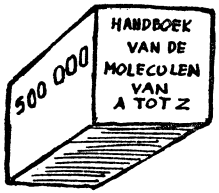


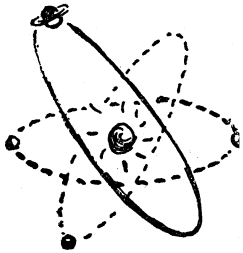
Fig. 2. Het lithiumatoom bevat twee elektronen welke op de K-schil om de kern lopen en één elektron op de L-schil.



Vr. — Maar mijn boek zegt ook, dat de moleculen op een zekere afstand van elkaar staan (waardoor de samendrukbaarheid van alle lichamen wordt verklaard en dat het ene molecuul het andere aantrekt (gelukkig maar, want anders zou alles in stof uiteenvallen!) en dat ze bezield zijn met een ongeordende beweging, waarvan de snelheid met de temperatuur toeneemt.

W. — Bravo, Vraagal! Je verdient je naam minder en minder . . . Als we nu de moleculen in stukjes hakken, vallen ze uiteen in atomen, dat zijn elementaire deeltjes van enkelvoudige stoffen (of elementen). Ieder atoom, dat weet je . . .

Vr. — . . . is een miniatuur-zonnestelsel met als zon de kern bestaande uit *protonen* (positieve elementaire ladingen) en *neutronen,* en als planeten de *elektronen* of negatieve elementaire elektrische ladingen.

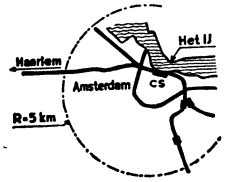


W. — Je praat alsof het gedrukt staat. Maar je moet altijd oppassen voor vergelijkingen. Terwijl alle planeten van een zonnestelsel in hetzelfde vlak rondwentelen, lopen de elektronen met hun banen in verschillende vlakken. En die banen zijn niet aan het toeval overgelaten: ze kunnen uitsluitend liggen op wat men schillen genoemd heeft: de K-, L-, M-, N-, O-, P- en de Q-schil. Deze zeven schillen kunnen voorgesteld worden als concentrische bollen met de kern als middelpunt. Ze hebben een straal evenredig met de tweede macht van hun nummer.

Vr. — Wacht even, Weetal! Het wordt een beetje ingewikkeld voor me.

W. — Het is heel eenvoudig: De K-schil is schil nummer 1. Hieruit volgt dat schil L, die het nummer 2 draagt, een straal heeft die $2^2 = 4$ maal zo groot is. De schil M krijgt dan een straal die $3^2 = 9$ maal zo groot is, enz.

Vr. — Waarmee dan tenslotte de straal van de zevende schil, die je Q genoemd hebt, $7^2 = 49$ maal zo groot is, als die van de K-schil. Is het niet?
W. — Goed begrepen. Verder is het arbeidsvermogen van een elektron evenredig met het nummer (men noemt dit het quantengetal) van de schil waarop het zich bevindt.
Vr. — En die al maar grotere afstanden van de schillen tot de kern, hoe groot zijn die in werkelijkheid?
W. — De K-schil is bij koolstof 5 miljardste cm van de kern verwijderd. Maar ik ben bang dat je dat helemaal niets zegt. Stel je dan maar voor, dat een fee met tikje van haar toverstaf alles 10 maal groter zou kunnen laten worden. Als die fee zo 14 tikjes gaf op een koolstofatoom (met 6 protonen en 6 neutronen in de kern en 6 elektronen er omheen, waarvan 2 op schil K en 4 op schil L) . . .
Vr. — Dan zou ons atoom 10^{14} maal groter zijn geworden en misschien wel net zo groot zijn als de aardbol, zodat je niet zou weten waar je het onder zou moeten brengen. Dat zou geen aardige fee zijn!



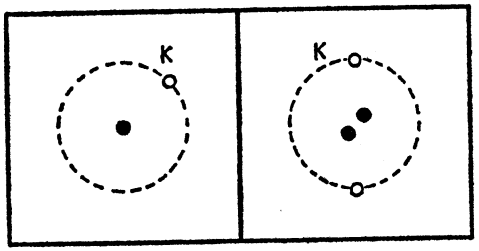


Fig. 3. De twee eenvoudigste atomen: links waterstof en rechts helium.

W. — Helemaal niet. Want de protonen zouden niet groter zijn dan gewone appels, terwijl de elektronen (al is hun massa 1837 maal geringer dan die van de protonen) de afmetingen zouden hebben van een voetbal. Als de kern zich zou bevinden voor het Centraalstation te Amsterdam, zouden de beide elektronen op de K-schil daar 5 km vandaan rondwentelen, dat is zo ongeveer aan de buitenrand van de stad. Wat betreft de vier elektronen op de buitenschil, die zou je kunnen vinden op 20 km van de kern, laten we zeggen in Haarlem.

Vraagal wordt duizelig

Vr. — Maar wat zit er dan tussen die appels en die voetballen?
W. — Niets! Leegte. En niet te vergeten aantrekkingskrachten van elektrisch, magnetisch of zwaartekrachtskarakter, die het hele systeem in evenwicht houden. Door de aantrekkingskracht tussen de tegengestelde ladingen wordt voorkomen, dat elektronen uit de omgeving van de kern wegvliegen door de centrifugale krachten die proberen hen los te maken.
Vr. — Je maakt me bang. Want het bouwwerk van het atoom bevat zoveel leegte en zo weinig vaste stof.
W. — Ja mijn vriend. En als je alle kernen en alle elektronen, waaruit je lichaam bestaat, zou samenpersen totdat ze stijf tegen elkaar lagen, dan zou je een korreltje overhouden dat nog altijd jouw 70 kg woog, maar dat maar net in een microscoop te zien was.
Vr. — Je bezorgt me steeds meer kippevel wanneer je me eraan herinnert dat ook

ik uit atomen besta. En nu je me hebt geopenbaard wat een grote leegte er in mij heerst, voel ik me ontzettend duizelig.
W. — Dan zouden we er goed aan doen over te gaan tot andere atomen dan die van jouw lichaam. En om die eenvoudiger voor te stellen, zullen we maar afspreken om iedere schil als een cirkel te tekenen. Je ziet zo, dat het meest eenvoudige atoom

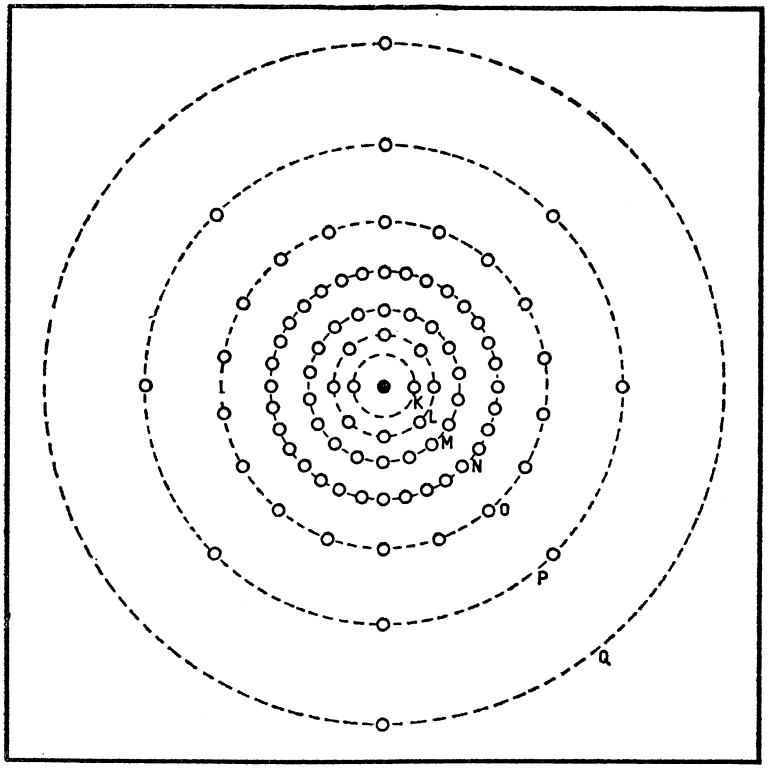


Fig. 4. Voorstelling in het platte vlak van een radiumatoom, waarbij aangegeven is hoe de elektronen over de schillen verdeeld zijn. In werkelijkheid liggen de elektronenbanen niet alle in hetzelfde vlak.

dat van waterstof is, dat uit slechts één proton en één elektron op de K-schil bestaat. In helium wentelen twee elektronen op dezelfde baan om twee protonen van de kern.
Vr. — Is er ook een element met drie elektronen op de K-schil?

Beperkt aantal plaatsen

W. — Dat bestaat niet. Want die schil kan niet meer dan 2 elektronen bevatten, wil het atoom stabiel zijn. Op dezelfde manier is op de L-schil maar plaats voor 8 elektronen, op de M-schil voor hoogstens 18, op de N-schil voor 32, op de O-schil voor niet meer dan 50, op de P-schil voor maximaal 72 en tenslotte zou de Q-schil theoretisch 98 elektronen kunnen bevatten.

Vr. — Ik begrijp niet hoe je al die getallen zo maar uit je hoofd kunt opzeggen.
W. — Dat is heus niet zo erg knap van me, want er bestaat een heel eenvoudige betrekking voor het maximumaantal elektronen op elke schil:

$$\begin{aligned}
\text{Schil K: } & 1^2 \times 2 = 2 \\
\text{Schil L: } & 2^2 \times 2 = 8 \\
\text{Schil M: } & 3^2 \times 2 = 18 \\
\text{Schil N: } & 4^2 \times 2 = 32 \\
\text{Schil O: } & 5^2 \times 2 = 50 \\
\text{Schil P: } & 6^2 \times 2 = 72 \\
\text{Schil Q: } & 7^2 \times 2 = 98
\end{aligned}$$

Vr. — Dat zijn er samen 280. Bestaan er atomen met zo'n groot aantal elektronen?
W. — Nee, op de K-, L-, M- en N-schil komen de genoemde aantallen wel voor, maar op de O-schil blijft het aantal in de praktijk beperkt tot 18, op de P-schil tot 32 en op de Q-schil is het maximum bereikte aantal 10.
Vr. — Ik vind dat allemaal wel leuk, maar ik krijg zo'n gevoel dat je nu toch wel wat al te diep in de atoom- en kernfysica duikt.
W. — Helemaal niet, we zullen een afspraak maken waardoor de studie van al deze vraagstukken een stuk eenvoudiger wordt. Als je daar geen bezwaar tegen hebt, houden we van nu af aan slechts rekening met de elektronen op de buitenschil van een atoom.
Vr. — Vooruit dan maar. Je hebt me zojuist met een zeker sadisme de aanwezigheid onthuld van dat grote aantal schillen die het atoom op een soort ui doen lijken. En nu verbied je me die ui uit elkaar te plukken! Wil je soms niet hebben, dat ik ga huilen? . . .

Neutrale en geïoniseerde toestand

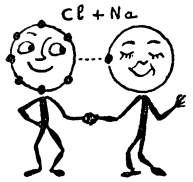
W. — De afspraak die we moeten maken, is geheel en al verantwoord. Want waar gaat het per slot van rekening om? Om de verdeling van de elektrische lading over de atomen. Of anders gezegd: een atoom bevat in de normale toestand evenveel elektronen als protonen, zodat de negatieve ladingen van de eerstgenoemde evenwicht maken met de positieve ladingen van de laatste. Een dergelijk atoom is ongeladen. Maar het kan gebeuren, dat uitwendige krachten er een of meer elektronen uit losmaken. In dat geval is het evenwicht verbroken: de negatieve ladingen van de elektronen zijn tezamengenomen niet opgewassen tegen de positieve lading van de kern. Daarom is het atoom positief. Men noemt het dan een positief ion.

Vr. — En als het tegengestelde gebeurt en het atoom krijgt om de een of andere reden extra elektronen, dan wordt het negatief. Ik veronderstel dat men het dan een negatief ion kan noemen.
W. — Zeer juist opgemerkt. Anders gezegd, verliezen of aanwinsten van elektronen (ionisatieverschijnselen) beginnen altijd op de buitenschil, dat wil zeggen daar waar de aantrekking van de kern het minst sterk is.
Vr. — Ja, ik begrijp dat wij, als de zaak er zo voor staat, alleen naar de elektronen van de buitenschil behoeven te kijken.

Huwelijksproblemen

W. — Er is nog een andere reden voor. De buitenschil bepaalt namelijk de chemische waardigheid van de elementen. Een atoom is pas tevreden met zijn bestaan als het 8

elektronen op zijn buitenschil heeft. In die toestand is het stabiel en denkt er niet aan verder elektronen af te staan of erbij te verwerven. Zo bevat bijvoorbeeld neon 8 elektronen op de buiten(L)schil en dat gas voelt zich daarmede zo gelukkig, dat het in het geheel geen behoefte heeft om met enig ander element in verbinding te treden. Maar fluor, dat op diezelfde buitenschil slechts 7 elektronen bevat, wil maar al te graag een verbinding aangaan met een ander element, dat in staat is er een elektron aan af te staan, zodat de buitenschil met 8 elektronen kan worden volgemaakt.
Vr. — En hoe vinden dergelijke huwelijken plaats?



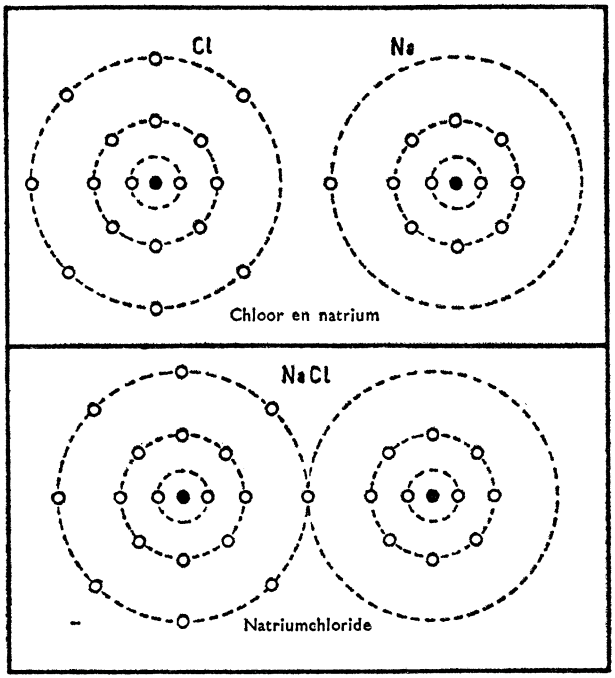
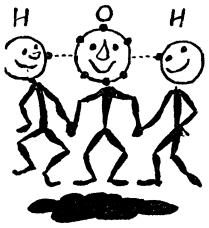


Fig. 5. Huwelijk tussen een chlooratoom (Cl) en een natriumatoom (Na). Hierbij ontstaat natriumchloride (NaCl), dat als een ionenbinding beschouwd kan worden (Na^+ met Cl^-).

W. — Welnu, neem het geval van chloor dat op zijn buiten(M)schil slechts 7 elektronen heeft en natrium dat 2 elektronen op de K-schil, 8 op de L- en maar 1 op de M-schil heeft. Dat is het voorbeeld van een ideale combinatie. Wanneer natrium zich met chloor verbindt en daarbij zijn ene elektron van de buitenschil afstaat, wordt de buitenschil van het chloor volledig bezet met 8 elektronen. Hiermede wordt meteen bereikt, dat in het natriumatoom de L-schil met zijn 8 elektronen de positie van buitenschil verkrijgt, waarmee het atoom volmaakt stabiel is geworden.
Vr. — Maar zal dan het chloor met dat boventallige elektron negatief geïoniseerd zijn, terwijl het Na-atoom dat een elektron kwijt geraakt is een positief ion is geworden?
W. — Goed gesnapt. En de onderlinge aantrekking van beide ionen zal maken dat het molecuul, zoals de huwelijksgemeenschap wordt genoemd een stabiel geheel blijft vormen.

Vr. — En hoe heet dat molecuul dan?
W. — Natriumchloride, wanneer je het in de apotheek koopt. Maar je kruidenier verkoopt je hetzelfde spul onder de naam keukenzout.
Vr. — Dat dacht ik al... En ik veronderstel, dat op dezelfde manier alle andere huwelijksgevallen van atomen kunnen worden uitgelegd. Hoe gaat dat bijvoorbeeld bij water in zijn werk?



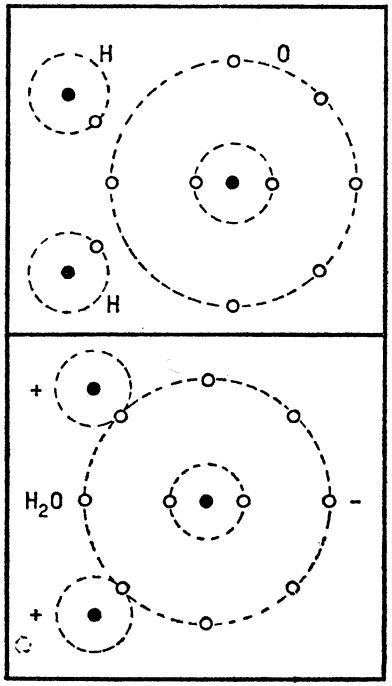
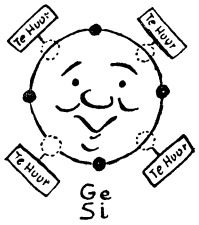


Fig. 6. Twee waterstofatomen (H) leveren ieder een elektron, waarmede het totale aantal elektronen op de L-schil van zuurstof (O) op 8 gebracht wordt. Hierbij ontstaat een watermolecuul (H_2O).

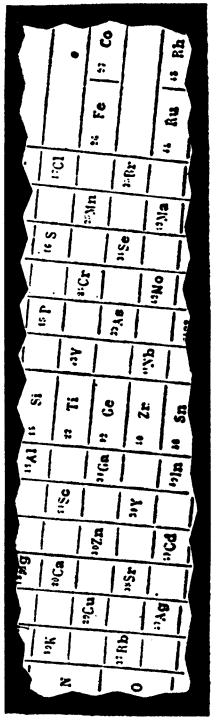
W. — Heel leuk. Het zuurstofatoom heeft 2 elektronen op de K-schil en 6 op de L-schil. Er is dus op die laatste schil nog plaats voor 2 andere elektronen. En de zuurstof ontleent die aan 2 atomen waterstof, want zoals je misschien nog wel weet, heeft waterstof maar 1 elektron per atoom.



Vr. — Maar nu begrijp ik, waarom een watermolecuul is samengesteld uit één zuurstofatoom en twee waterstofatomen.
W. — De buitenschil wordt dikwijls valentieschil genoemd, want aan het aantal elektronen op deze schil valt te zien, welke verbindingen het atoom bereid is aan te gaan. En men noemt het aantal elektronen dat de buitenschil te kort komt voor de stabiele toestand, of het aantal elektronen dat aan een of meer andere atomen kan worden afgestaan om het afstaande atoom stabiel te maken, de chemische waardigheid of de valentie.
Vr. — Neem me niet kwalijk, maar dat begrijp ik niet helemaal.
W. — Indien de buitenschil 6 of 7 elektronen bevat, zijn er nog 2, resp. 1 tekort voor het juiste aantal 8. Men noemt dergelijke atomen *tweewaardig* of *eenwaardig*. Maar indien de buitenschil slechts 1, 2 of 3 elektronen bevat, zal het atoom

Atoom-nummer	Naam van het element	Symbool	Aantal elektronen op iedere schil				
			K	L	M	N	O
13	Aluminium	Al	2	8	**3**		
14	Silicium	Si	2	8	**4**		
31	Gallium	Ga	2	8	18	**3**	
32	Germanium	Ge	2	8	18	**4**	
33	Arseen	As	2	8	18	**5**	
49	Indium	In	2	8	18	18	**3**
51	Antimoon	Sb	2	8	18	18	**5**

Fig. 7. Verdeling van de elektronen over de schillen voor enige voor transistoren van belang zijnde elementen. Het aantal elektronen op de buitenschil dat met de valentie overeenkomt, is vet gedrukt. Het totale aantal elektronen per atoom wordt het atoomnummer genoemd.



bereid zijn die af te staan en dan hebben we te doen met eenwaardige, tweewaardige of *driewaardige* elementen.

Vr. — En als de buitenschil 4 elektronen bevat?

W. — In dat geval zou het atoom zich heel gelukkig voelen wanneer het in verbinding kon treden met een ander atoom dat ook 4 elektronen op zijn buitenschil heeft om daarmee een valentiebinding aan te gaan. Een dergelijk atoom is dus *vierwaardig*. Dat is klaarblijkelijk het geval met de atomen van germanium en van silicium, die in transistoren worden gebruikt; en dat is ook het geval met koolstof. Ook kan een atoom met 5 elektronen op de buitenschil nog *vijfwaardig* zijn. En wanneer wij terugkeren naar de transistoren, dan laat ik je nog enige elementen zien, die bij de samenstelling ervan worden gebruikt. Enerzijds maakt men gebruik van de driewaardige elementen aluminium, indium en gallium en anderzijds van vijfwaardig arseen en antimoon.

De samenleving van de atomen

Vr. — Gaan we nu alle chemische elementen stuk voor stuk bekijken?

W. — Nee, wees maar gerust. Je bent nu goed thuis met alle elementen die een belangrijke rol spelen bij de vervaardiging van transistoren. Maar we zouden iets belangrijks vergeten als we alleen maar het individuele gedrag van de atomen bestudeerden. We moeten ons juist in hun gemeenschapsleven verdiepen. Je moet niet vergeten dat de atomen in een bepaald verband leven, met uitzondering van verbeten individualisten zoals neon, dat zich met zijn volledig met 8 elektronen bezette schil met klem tegen iedere verbinding verzet. In hun onderlinge rangschikking vertonen ze een zekere mate van organisatie. Behalve bij sommige amorfe stoffen, zoals glas, zijn de atomen in vaste stoffen zeer ordelijk gerangschikt: de atomen liggen in een vast patroon, dat we kristalrooster noemen.

Vr. — Hoe houden de atomen elkaar eigenlijk vast?

W. — Dat is niet bij alle stoffen gelijk. Bij natriumchloride bijvoorbeeld, zagen we

al dat de elektronen van het ene atoom door de kern van het andere worden aangetrokken. Maar bij de materialen die we straks tegenkomen, vindt de aantrekkende werking plaats tussen de elektronen van de buitenschil (men noemt die wel *valentie-elektronen*). Dat is bijvoorbeeld het geval bij germanium en bij silicium. Daar is ieder atoom met zijn 4 buitenelektronen aan 4 maal 1 valentie-elektron van 4 andere atomen gebonden. Ik teken nu slechts één atoom, dat aan zijn 4 naburen gekoppeld is. En ieder daarvan is op zijn beurt weer aan 4 atomen gebonden (waarvan een het middelste atoom uit de getekende figuur is), enzovoort. Het lijkt er op die manier op alsof ieder atoom 8 buiten-elektronen heeft, waarmee het zoals we al zagen heel stabiel wordt. Probeer maar eens je zo'n regelmatige rangschikking van de atomen in de ruimte voor te stellen.

Vr. — Dat wordt iets fantastisch. Al die bollen in de ruimte, ieder met vier armen reikend naar zijn naasten... Het lijken wel Hindoe-goden. Hebben alle vaste stoffen een dergelijke kristalstructuur?

W. — Nee, Vraagal. Er zijn nog wel een aantal elementen die in dezelfde vorm gekristalliseerd zijn, zoals bijvoorbeeld koolstof. Men noemt grote koolstofkristallen...

Vr. — ... diamanten. Dat wist ik gelukkig. 't Is maar goed dat ze transistoren van germanium maken en niet van diamant, want anders zouden ze aardig wat gaan kosten.

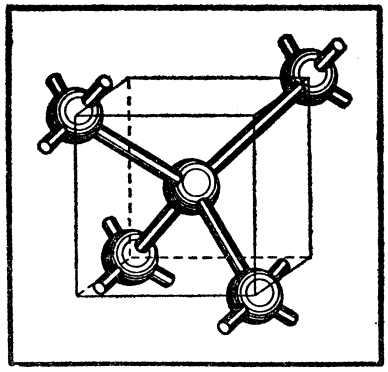
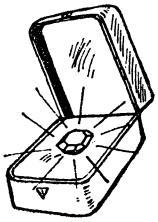


Fig. 8. Het in het midden van de figuur getekende germaniumatoom is met zijn valentie-elektronen aan vier andere atomen gebonden. (De ingetekende kubus geeft de onderlinge ligging van de atomen in de ruimte weer.) Het kristalrooster van silicium en dat van koolstof (diamant) vertonen dezelfde opbouw.



W. — Dat is zo, afgezien van de problemen om kunstmatige diamant te vervaardigen... Maar er zijn nog diverse andere kristalvormen, waar we het nu niet over zullen hebben. Wel belangrijk voor ons is het gedrag van de elektronen op de buitenschil.

Vr. — Je hebt al verteld, dat die het gemakkelijkst van het atoom losgemaakt kunnen worden, omdat ze het verst van de kern af liggen.

W. — Precies. Maar dat gebeurt alleen maar bij die stoffen die 1, 2 of 3 elektronen op de buitenschil hebben. Dat is het geval bij alle metalen. Goud, zilver en koper hebben maar één buitenelektron. IJzer, zink en kobalt hebben er twee en aluminium heeft drie buitenelektronen. Die elektronen kunnen heel gemakkelijk van het atoom worden losgemaakt en dan deel uitmaken van de stroming van vrije elektronen, die we elektrische stroom noemen. Bij de metalloïden is het heel anders. Die hebben

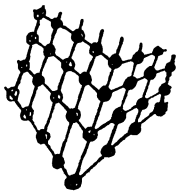
wel een flink aantal elektronen op hun buitenschil, maar de elektronen krijgen geen kans om te gaan zwerven, zoals hun collega's bij de metalen. Daarom zijn de metalloïden isolatoren.
Vr. — Maar germanium dat 4 elektronen op de buitenschil heeft, is dat ook een isolator?
W. — Ja en nee, mijn vriend. De volgende keer zal ik je uitleggen wat ik met dat dubbelzinnige antwoord bedoel.

TWEEDE PRAATJE

DE OVERGANGEN

Ook al bevatten halfgeleiders slechts een geringe hoeveelheid verontreinigingen, ze krijgen hierdoor toch volkomen andere elektrische eigenschappen. In dit praatje verdiepen onze vrienden zich in de verschijnselen die optreden, wanneer vreemde atomen in een kristalrooster binnendringen.

Samenvatting: Intrinsieke geleidendheid: — Fotoweerstand- en foto-emissiecellen. — Verontreinigingen. — Donors. — Gaten. — Acceptors. — P- en N-halfgeleiders. — Overgangen. — Potentiaalwal. — Doorlaat- en keerspanning. — Zenerspanning. — Dioden. — Toepassing van halfgeleiders in gelijkrichterschakelingen.



Het leven in de huiselijke kring van de atomen

Vraagal. — Ik heb heel wat nagedacht over die kristalroosters en ik ben zelfs naar de leeszaal geweest om een boek te halen over kristallografie. Daarin staan mooie afbeeldingen van kristalstructuren, die opgebouwd zijn uit bolletjes en staafjes. De bolletjes stellen de atomen voor en de staafjes de chemische bindingen (valentiebindingen).

Weetal. — Ik ben blij dat je je vrije tijd zo nuttig hebt besteed. En hoe stel je je nu een germaniumkristal voor?

Vr. — Een germaniumkristal zou je kunnen vergelijken met een flatgebouw. In

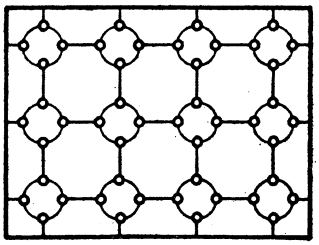
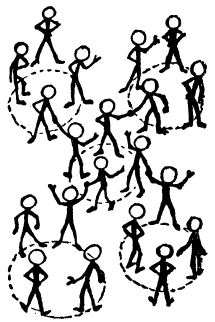


Fig. 9. De kristalstructuur van germanium kan in een plat vlak worden aangegeven door de hiernaast getekende voorstelling. In werkelijkheid bevinden zich de atomen niet in een plat vlak maar in de ruimte. De vlakke voorstelling kan toch voordeel opleveren wegens zijn overzichtelijkheid.

iedere flat woont een gezin met vier kinderen; en ieder van die kinderen is getrouwd met een buurjongen of buurmeisje. Op die manier bestaan er tussen ieder gezin en de vier naburige gezinnen huwelijksbanden.



W. — Het beeld, dat je gegeven hebt, stemt goed met de werkelijkheid overeen. Het kan mij ook helpen bij mijn verdere uitleggingen. In dat flatgebouw zou alles zo volkomen in evenwicht zijn, dat er vrijwel geen verandering mogelijk was. Iedereen zou rustig bij zijn partner moeten blijven. En in het germaniumkristal moeten alle elektronen ook bij hun atoom blijven, want ze zijn daaraan stevig door valentiebindingen gekoppeld.

Vr. — Maar zou er ook bij germanium niet iets kunnen plaats vinden, dat overeenkomt met menselijke hartstocht?

Af en toe een echtscheiding

W. — Je hebt zeker net het een of andere romannetje gelezen... Maar misschien heb je wel gelijk. Net als de mensen af en toe last hebben van hun hartstochten,

worden de atomen door warmtebeweging heen en weer geslingerd. Soms komt het zelfs zover, dat een elektron hierdoor uit zijn binding wordt losgeslagen en vrijkomt. En je weet dat als er vrije elektronen zijn . . .

Vr. — . . . het materiaal de elektrische stroom gaat geleiden. Zijn er bij kamertemperatuur veel vrije elektronen in germanium?

W. — Nee, heel weinig. Nog geen twee elektronen op 10 miljard (dat is 10^{10}) atomen. Dat zou je kunnen vergelijken met maar één vrijgezel op de dubbele bevolking van de aarde.

Vr. — Ik vind dat geen leuk beeld! Maar als dat waar is, zal germanium wel heel slecht geleiden.

W. — Inderdaad. Daarom noemt men het ook een halfgeleider. Maar denk erom, dat één gram germanium tienduizendmiljard maal een miljard (of wel 10^{22}) atomen bevat, zodat er toch altijd nog twee duizend miljard (2×10^{12}) vrije elektronen in zitten. Dat zijn er nog aardig wat . . . En dat is wel genoeg om een klein stroompje door te laten.

Vr. — Je hebt het over miljarden maal miljarden elektronen en dan spreek je nog van een klein stroompje!

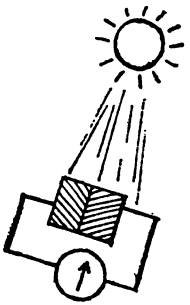
W. — Maar Vraagal, ben je dan vergeten dat een stroomsterkte van één ampère overeenkomst met een stroom van zes miljard maal miljard (6×10^{18}) elektronen per seconde? Dan kun je toch meteen vaststellen, dat die armzalige paar duizend miljard vrije elektronen in het uitgestrekte kristalrooster van het germanium nog maar een heel klein beetje geleidbaarheid kunnen opleveren. Die geleidbaarheid welke, zoals ik al zei, het gevolg is van de warmtebeweging, wordt *intrinsieke geleidendheid* genoemd.

Vr. — Het is dus eigenlijk net alsof er in dat keurige flatgebouw af en toe een echtscheiding of een nieuwe trouwpartij plaats vindt, waarbij enige personen in een andere woning terechtkomen.

W. — Dat lijkt er inderdaad wel op en, om bij je vergelijking te blijven, zouden we kunnen zeggen dat er zachtjes geroddeld werd over „het oplaaien van de hartstochten" (zo noemen ze dat in romans), waarmee het lieve leven begon.

Vr. — Ik voel al, waar je naar toe wilt. Als je de temperatuur van een germaniumkristal opvoert, wordt de warmtebeweging veel heftiger en komen er meer elektronen vrij. Dan moet ook de intrinsieke geleidendheid toenemen. Dat is dus net andersom als bij de metalen, waar de weerstand bij hogere temperatuur toeneemt.

W. — Vraagal, ik ben het helemaal met je eens! Dat verschijnsel is er dan ook de oorzaak van, dat germanium slecht bruikbaar is bij hoge temperatuur. Want van die intrinsieke geleidendheid hebben we alleen maar last. Silicium kan beter tegen de warmte, omdat daar de valentie-elektronen op de derde schil liggen en dus steviger aan de kern gebonden zijn dan bij germanium, waar zij op de vierde schil ronddraaien. Ik moet er nog bij vertellen, dat je het vrijkomen van elektronen nog een handje kunt helpen door in plaats van warmte-energie lichtenergie toe te voeren.



Vr. — Bedoel je daarmee, dat die heel kleine deeltjes lichtenergie, die ze fotonen noemen, kans zien om bij hun botsing elektronen uit het germanium los te maken?

W. — Dat is zo. Om die reden is het dan ook mogelijk fotocellen te maken; dat zijn apparaatjes waarvan de weerstand bij verlichting afneemt. De eerste fotocellen werkten met selenium, dat ook een halfgeleider is.

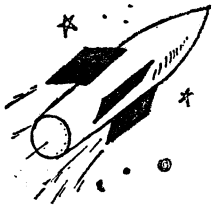
Vr. — In mijn belichtingsmeter zit zo'n cel . . .

W. — Dat is vast geen seleniumcel — selenium is een fotoweerstandsmateriaal — maar naar alle waarschijnlijkheid een cadmium- of een siliciumcel. Dat zijn foto-

emitterende materialen, waarmee bedoeld wordt, dat ze de lichtenergie direct in elektrische stroom omzetten.
Vr. — Worden dergelijke cellen niet bij sommige kunstmanen gebruikt om het zonlicht om te zetten in elektrische voedingsenergie?

Het staat niet om meer dan vier kinderen te hebben

W. — Dat is inderdaad zo, Vraagal. Maar we gaan nu weer verder met de kristalstructuur en veroorzaken een hevige opschudding in die nette maatschappij door er een gezin met vijf kinderen tussen te zetten.
Vr. — Wat wil je daar mee zeggen?
W. — Daarmee bedoel ik, dat in het meest zuivere germanium toch nog een heel gering aantal atomen voorkomt van andere elementen, die dus als verontreinigingen



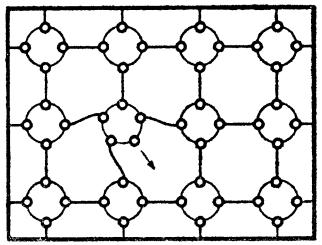
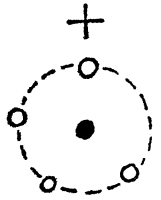


Fig. 10. De volmaakte orde van het kristalrooster is wreed verstoord door het binnentreden van een vijfwaardig verontreinigingsatoom. Het is nog niet duidelijk wat er met het vijfde elektron zal gebeuren.

werken. In het meest zuivere germanium komt toch nog één dergelijk atoom op een miljard atomen germanium voor.
Vr. — Dat is zo weinig, dat je je daar niet druk over hoeft te maken.
W. — Als je denkt die verontreinigingen te kunnen verwaarlozen, heb je het mis, want zelfs in die zeer geringe concentratie betekent dat nog altijd vijftigduizend miljard vreemde atomen op een kubieke centimeter zogenaamd zuiver germanium.
Vr. — Ik heb er niet aan gedacht, dat er in die kubieke centimeter vijftigduizend miljard maal een miljard atomen zitten... Maar wat stelt zo'n gezin met vijf kinderen voor? Bedoel je een atoom met vijf elektronen op de buitenschil?
W. — Precies. Een vijfwaardig atoom, arseen of antimoon bijvoorbeeld, komt in de nette samenleving van de germaniumatomen terecht... en daar heb je de poppen aan het dansen!

Vr. — Dat begrijp ik, want als vier kinderen van dat buitenissige gezin met vier buurkinderen getrouwd zijn, zit er voor numero vijf niets anders op, dan vrijgezel te blijven.
W. — Je begrijpt het, Vraagal. Als de eerste vier elektronen valentiebindingen met vier naburige atomen uit het kristalrooster aangegaan hebben, blijft het vijfde elektron zonder binding. En wanneer een of andere stem dat vrije elektron naar de andere kant van het kristal roept, zal het direct met grote vaart die kant opgaan.
Vr. — Als ik het goed heb, kun je stroom door zo'n kristal sturen, als je een elektrisch spanningsverschil aanbrengt tussen twee punten ervan. De vrije elektronen, die afkomstig zijn van de vijfwaardige atomen, worden dan namelijk door de positieve pool aangetrokken. Ze zullen daar dus naar toe stromen, terwijl bij de negatieve pool van de batterij een evengroot aantal elektronen in het kristalrooster terugkomt.
W. — Ja, zo gaat het inderdaad bij halfgeleiders met vijfwaardige verontreinigingen,

dat wil zeggen met een overmaat aan elektronen. Men spreekt dan van halfgeleiders van het *N-type* (negatief). De verontreinigingen worden dikwijls *donors* genoemd (want zij leveren vrije elektronen).
Vr. — Hoe hoog is in de praktijk het gehalte aan verontreinigingen?
W. — Op zijn hoogst één atoom op tien miljoen germaniumatomen, wat overeenkomt met een verhouding van één inwoner op de gehele bevolking van Nederland.
Vr. — Ja, en toch zijn dat al honderd maal meer verontreinigingen dan in het allerzuiverste germanium voorkomen. Maar wat gebeurt er dan toch met zo'n verontreinigingsatoom, bijvoorbeeld van arseen, waarvan het vijfde elektron weggetrokken is? Naar mijn mening is het niet langer neutraal, want het bevat nu minder elektronen dan protonen en is dus beslist positief.
W. — Ja dat is zo! Hoe gek het ook mag klinken, in N-germanium zijn de verontreinigingsatomen positief geïoniseerd.



Het stelen van kinderen

Vr. — En wat zou er in het kristal gebeuren, wanneer er in een van de in hetzelfde gebouw wonende gezinnen maar 3 kinderen waren of anders gezegd, indien in het kristalrooster van de halfgeleider atomen terecht zijn gekomen met maar drie elektronen op de buitenschil?
W. — De herrie die hierdoor zou ontstaan, is even erg als bij die gezinnen met teveel kinderen. Dat driewaardige atoom gaat verbindingen aan met drie naburige

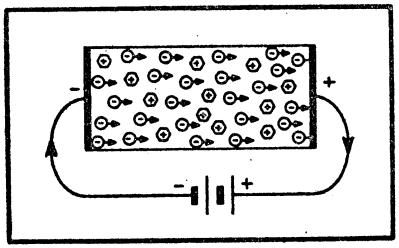


Fig. 11. Geleiding in een halfgeleider uit N-materiaal. De vrije elektronen (met – aangegeven) zijn losgemaakt uit vijfwaardige atomen, die daardoor positief geïoniseerd zijn (met + aangegeven).

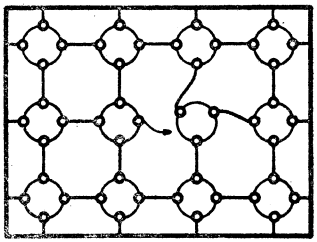
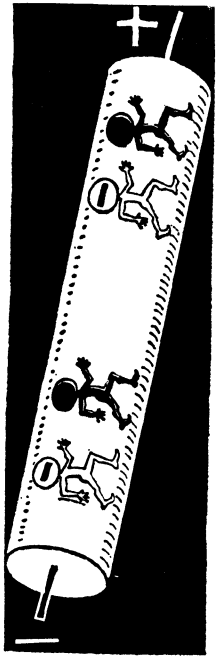


Fig. 12. Hier bevat het kristalrooster een driewaardige verontreiniging die probeert een naburig elektron te binden.

atomen, maar aan de vierde kant blijft een plaats voor een elektron open. Daar krijg je dus een gat, waarin best een elektron van een naburig atoom zou kunnen vallen.
Vr. — Daaruit volgt dan, dat het gezin met drie kinderen er veel voor voelt om er nog een kind bij aan te nemen, want vier kinderen is nu eenmaal traditie en ze willen niet afwijken van het algemeen geldend gedragspatroon. Maar wanneer ze een kind lenen van een naburig gezin, ontstaat er meteen weer een open plaats.
W. — Dat begrijp ik. En het kan zelfs voorkomen, dat het lenen of roven van kinderen aan het ene uiteinde van het kristal begint en helemaal naar het andere einde doorloopt.

Vr. — Dan zal je wel een spanningsverschil aan moeten brengen, denk ik?
W. — Natuurlijk. Maar let goed op wat er nu gaat gebeuren. Een elektron dat uit de richting van de negatieve pool komt, vult het gat van een driewaardig atoom bij de positieve pool, terwijl er aan de kant van de negatieve pool een nieuw gat bij het buuratoom ontstaat. Hierna herhaalt de historie zich. Het nieuwe gat wordt op zijn beurt weer gevuld door een ander elektron, zodat ook dit elektron dichter bij de positieve pool gekomen is, terwijl er weer een nieuw gat ontstaan is op een plaats dichter bij de negatieve pool. En wanneer op het eind van dat doorschuifproces het gat



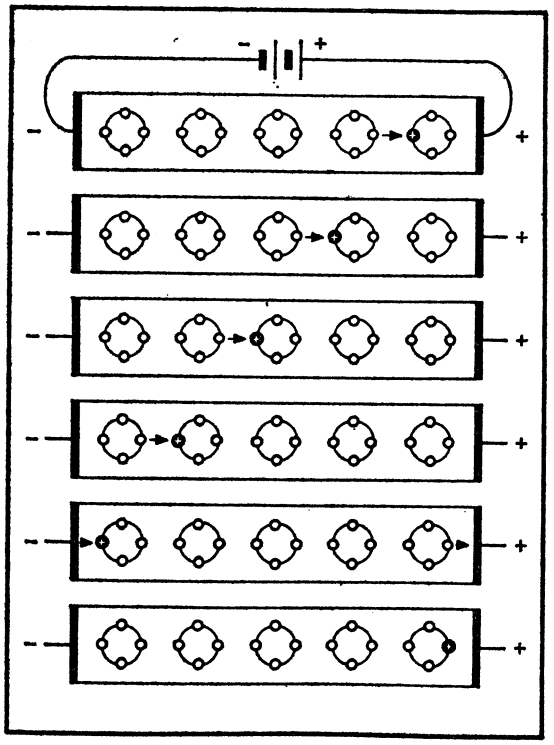
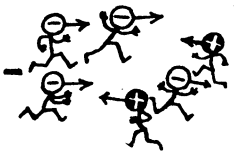


Fig. 13. In een halfgeleider van P-materiaal wordt ieder gat dat is geleverd door een driewaardig verontreinigingsatoom, gevuld door een elektron dat van de negatieve pool komt; dat elektron veroorzaakt daardoor een nieuw gat, dat ook weer gevuld wordt door een elektron uit het naburige atoom, enzovoort. In de tekening zijn een aantal opeenvolgende toestanden getekend, waarbij het gat (dat als positieve lading beschouwd kan worden) zich van de positieve naar de negatieve pool beweegt. Tenslotte wordt het vlak bij de negatieve pool gekomen gat gevuld door een elektron uit die pool; tegelijkertijd verlaat een ander elektron het atoom dat het dichtst bij de positieve pool ligt, zodat op die plaats weer een nieuw gat ontstaat. En alles begint weer van voren af aan!

de negatieve pool heeft bereikt, wordt het gevuld met een uit de spanningsbron afkomstig elektron, terwijl aan de positieve pool een elektron naar de spanningsbron loopt, zodat aan de positieve pool een nieuw gat ontstaat.

Twee vloeistoffen

Vr. — Het resultaat hiervan is, dat de elektronen netjes naar de positieve pool lopen, terwijl de gaten naar de negatieve pool gaan, precies alsof het positieve ladingen waren.



W. — Ja, eigenlijk gaat alles alsof er in een halfgeleider met driewaardige verontreinigingen, positieve ladingen — het tegengestelde van elektronen — van de positieve pool naar de negatieve pool lopen.

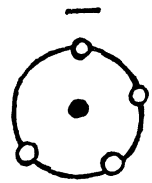
Vr. — Op die manier volgen de gaten dus de conventionele richting van de elektrische stroom, d.w.z. van + naar —, terwijl de elektronen in de tegengestelde richting lopen. Maar kun je in dit geval spreken van een stroom positieve ladingen?

W. — Waarom niet? De natuurkundige Syoner heeft lang geleden eens de veronderstelling uitgesproken, dat de elektrische stroom uit twee vloeistoffen zou bestaan, die in tegengestelde richting bewegen. Maar denk erom, dat een gat alleen maar een open plaats is, waar juist één elektron in kan.

Vr. — Ik veronderstel dat een halfgeleider met driewaardige verontreinigingen wel tot het *P-type* (positief) zal behoren?

W. — Inderdaad geeft men er die naam aan. Je weet best wat er met de verontreinigingsatomen gebeurt, wanneer elektronen van de nabijgelegen atomen de gaten opvullen?

Vr. — Dan worden die atomen negatief, omdat ze geïoniseerd worden, want ze hebben een elektron meer dan het aantal protonen in hun kern . . . het is wel merkwaardig dat de verontreinigingen in N-materiaal positief geïoniseerd worden en in P-materiaal negatief.



W. — Ik moet er nog aan toevoegen, dat de verontreinigingsatomen van het P-materiaal, zoals die van aluminium, gallium of indium, dikwijls *acceptors* genoemd worden, want ze nemen een elektron op, terwijl de atomen van N-materiaal juist elektronen leveren.

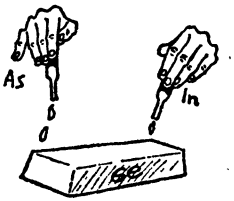
Vr. — Ik geloof dat ik aardig in de war kom met die donors en acceptors.

W. — Ik zal je een ezelsbruggetje leren: in het woord *donor* komt de letter N voor en in *acceptor* de letter P.

Vr. — Bedankt! Nu kan ik het gemakkelijk onthouden.

Een overgang waar niet door te komen valt

W. — Omdat je al weet, hoe het in die kristalsamenleving toe gaat, waar de rust soms wordt verstoord door die buitenissige gezinnen van donors of acceptors, zullen we nu eens gaan kijken wat er gebeurt als je een stuk N-halfgeleidermateriaal en een stuk P-materiaal bij elkaar hebt. Stel je maar voor, dat het me zou gelukken twee van dergelijke stukjes aan elkaar te plakken. Of liever, dat ik begon met een staaf zuiver germanium en dat ik daarvan de ene helft „vergiftigde" met donoratomen (bijvoorbeeld met arseen) en de andere helft met acceptoratomen (bijvoorbeeld met indium, als je daar geen bezwaar tegen hebt). Het grensgebied tussen deze twee soorten halfgeleidermateriaal noem je een N-P-overgang. De dikte van zo'n overgangslaag is van de orde van 0,3 mm. Maar ondanks zijn zeer geringe dikte speelt die overgangslaag een buitengewoon belangrijke rol.



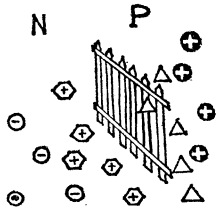
Vr. — Ik zie niet in, dat er iets bijzonders aan de hand is. In iedere helft van die staaf kunnen de elektronen zich bewegen, zonder zich wat aan te trekken van wat er in de andere helft gebeurt.

W. — Helemaal mis! Want door de normale warmtebeweging ontstaat er nu iets,

wat we nog niet eerder hebben gezien. De negatief geïoniseerde atomen uit het P-gebied zullen de vrije elektronen uit het N-gebied afstoten.

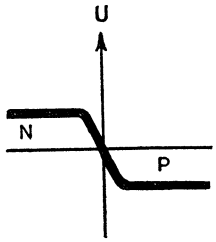
Vr. — Ik had echt niet gedacht aan de afstoting van gelijknamige ladingen . . . Maar dan moeten ook de positieve ionen uit het N-gebied, de gaten uit het P-gebied afstoten.

W. — Het is inderdaad waar, dat de gaten (die je als positieve eenheidsladingen kunt beschouwen) ook worden afgestoten. Eigenlijk trekken de positieve ionen uit het N-gebied elektronen uit het P-gebied in de richting van de overgang, waarop deze elektronen de nabijgelegen gaten vullen. Daardoor laten die elektronen zelf weer gaten over in de iets verder van de overgang gelegen atomen. En alles gebeurt net alsof de gaten zijn verhuisd naar de buitenkant van het P-gebied.



Vr. — En dichter bij de overgang zullen alle driewaardige atomen uit het P-gebied er een elektron bij krijgen en dus negatieve ionen vormen. Op dezelfde manier zullen in het N-gebied alle vijfwaardige atomen in de buurt van de overgang een elektron verliezen en dus positief worden. Het is wel een vreemde toestand: de overgang is een soort scheidsmuur geworden tussen de gebieden, waarvan het ene negatief en het andere positief is.

W. — Ja, je hebt dat heel goed beredeneerd: de overgang vormt een echte *potentiaalbarrière*. In dat dunne stukje halfgeleidermateriaal gaat de potentiaal van de geïoni-



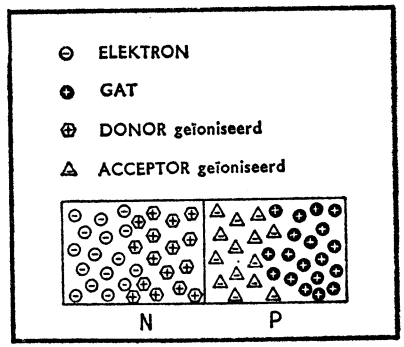


Fig. 14. N-P-overgang. In het P-gebied zijn de gaten in de omgeving van de overgang gevuld, maar verderop is dat niet het val. In het N-gebied zijn de vrije elektronen uit het overgangsgebied weggediffundeerd. Zij zijn oorspronkelijk afkomstig uit de met een + aangegeven verontreinigingsatomen. (Men dient de vier symbolen te onthouden, aangezien deze in het vervolg gebruikt worden.)

seerde atomen op eens van positief (in het N-gebied, denk daarom!) over naar een negatieve waarde (in het P-gebied). Maar de totale lading blijft nul, want in beide gebieden houden de positieve en de negatieve ladingen elkaar precies in evenwicht. Wanneer we het P-materiaal en het N-materiaal tegen elkaar brengen, hebben we eenvoudig een ladingsverplaatsing naar de uiteinden van ieder gebied teweeg gebracht, terwijl de lading eerst vrijwel gelijkmatig verdeeld was.

Vr. — Ik kan me de toestand heel duidelijk voorstellen. Maar wat kun je in de praktijk doen met die potentiaalbarrière in de P-N-overgang?

W. — Als je een spanningsverschil tussen de uiteinden aanlegt, blijkt dat meteen.

Elektronen en gaten in beweging

Vr. — Ik denk dat de stroom aan de ene kant door de vrije elektronen uit het N-materiaal onderhouden wordt en aan de andere kant door de gaten in het P-materiaal, waarbij beide in tegengestelde richting lopen.

W. — Dat is misschien wel waar, maar je slaat iets belangrijks over. Feitelijk moet je eerst nagaan, wat de gevolgen zijn van het aanleggen van spanningen. Laten we eerst maar eens aannemen, dat de positieve pool van de spanningsbron met het P-gebied verbonden is en de negatieve met het N-gebied.
Vr. — Goed, in het N-gebied zullen de vrije elektronen naar de overgang worden teruggeduwd door de elektronen uit de stroombron. Zij zullen door de overgang heen schieten en zullen dan de gaten vullen die de positieve pool van de spanningsbron in de richting van de overgang gedreven heeft.

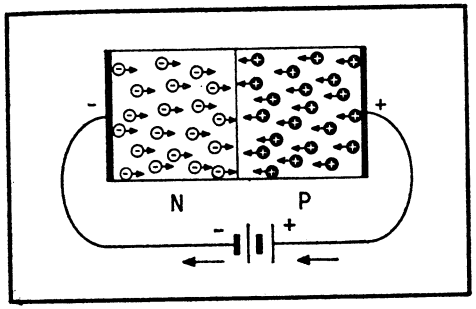


Fig. 15. Stroomdoorgang in een N-P-overgang. In de tekening zijn uitsluitend de bewegelijke ladingsdragers aangegeven: elektronen (met – aangegeven) en gaten (met + aangegeven). Om de tekeningen niet te vol te maken, zijn de donorionen uit het N-gebied en de acceptorionen uit het P-gebied weggelaten.

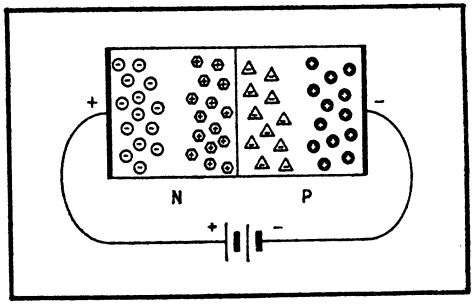
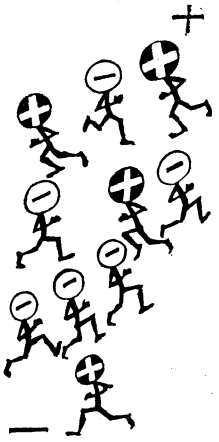


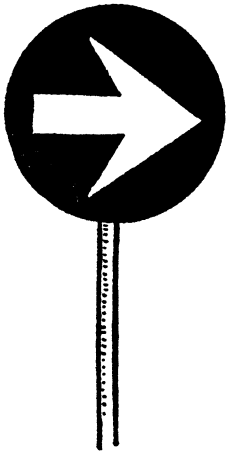
Fig. 16. Wanneer de N-P-overgang in keerrichting geschakeld wordt zien de bewegelijke ladingsdragers geen kans tegen de spanningsbarrière in te lopen, zodat er geen stroomdoorgang plaats vindt. De contactpotentiaal over de keerlaag is hoger dan in de schakeling van fig. 15.



W. — Laten we het wat beter benaderen en vaststellen, dat de positieve pool van de spanningsbron telkens één elektron aantrekt wanneer een ander elektron de overgang passeert en van het N-gebied in het P-gebied terechtkomt. En ieder elektron dat door de spanningsbron wordt aangetrokken, vormt een gat, dat weer gevuld wordt door een elektron dat iets meer uit de buurt van de overgang afkomstig is, waardoor daar weer een nieuw gat ontstaat. Zo zal het gat steeds verder naar de overgang lopen, waar het opgevuld wordt door een nieuw elektron uit het N-gebied.
Vr. — Daaruit volgt dus, dat ik het bij het rechte eind had, toen ik zei dat er stroom zou gaan lopen door de elektronen en gaten die elkaar tegemoet lopen.
W. — Ja, dat is ook zo, tenminste wanneer je de polariteit, net als wij dat straks gedaan hebben, zodanig kiest dat de positieve klem aan het P-gebied en de negatieve aan het N-gebied ligt. Maar als je de spanning andersom aansluit, gebeurt er heel wat anders.

Vr. — Waarom is dat? De elektronen uit de negatieve pool zullen de gaten uit het P-gebied verder van het uiteinde van de staaf trekken. En aan het andere uiteinde zal de positieve potentiaal van de bron nog meer vrije elektronen aantrekken. Wel verdraaid . . . ! Want daardoor zal de potentiaalbarrière alleen nog maar hoger worden . . . zodat er helemaal geen stroom meer kan lopen!

W. — Je hebt het nu zelf uitgekiend. Je ziet dus, dat er alleen maar stroom kan lopen, als de gelijkspanning wordt aangesloten met de positieve pool aan het P-gebied en de negatieve pool aan het N-gebied. Maar als je de polen verwisselt, loopt er geen of hoogstens een uiterst kleine lekstroom.



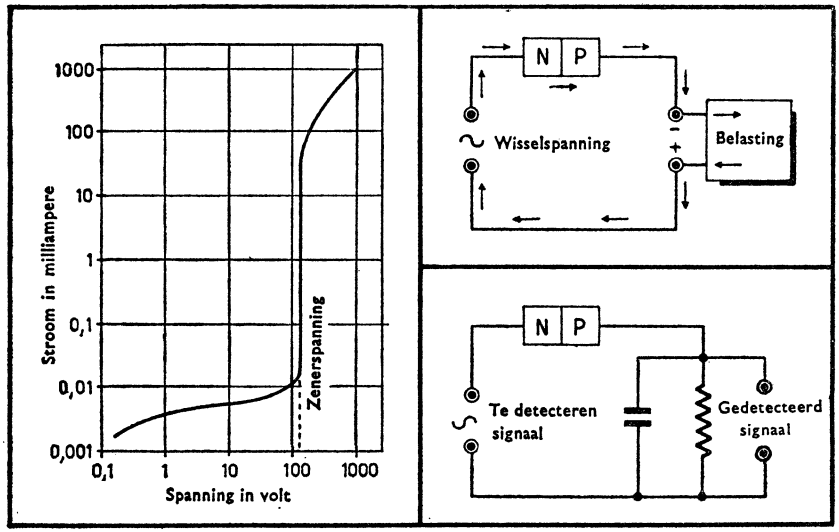
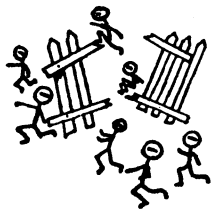


Fig. 17. (links). Waarde van de keerstroom als functie van de aangelegde spanning over de overgang. Men lette goed op de toegepaste logaritmische schalen (niet-lineair).

Fig. 18. (boven, rechts). De N-P-overgang kan op dezelfde manier als een vacuümdiode als gelijkrichter worden gebruikt, waarbij het extra voordeel ontstaat, dat geen gloeistroomvermogen nodig is! Het schema stelt een éénfaze-gelijkrichtschakeling voor.

Fig. 19 (beneden, rechts). Hier is een N-P-overgang als diode-detector geschakeld. De condensator wordt tot de topwaarde van de wisselspanning geladen, waarbij de weerstand ervoor zorgt, dat de condensator tijdig ontladen wordt, zodat de modulatie kan worden gevolgd.



Vr. — Ook als je de spanning heel hoog maakt?

W. — Zelfs dan, zolang de spanning een zekere grens niet overschrijdt. Als je daar overheen komt, slaat de potentiaalbarrière door en ontstaat er een lawine van elektronen: de lekstroom loopt dan opeens zeer snel op. Dit verschijnsel is door Zener beschreven en de keerspanning, waarbij het plaats vindt, draagt daarom de naam *zenerspanning*. Dit verschijnsel wordt in sommige schakelingen toegepast, maar voor de in dit boek behandelde schema's is het niet van belang. En we zullen dan ook maar doen alsof de overgang geleidend is in de doorlaatrichting en vrijwel isolerend in de keerrichting.

Eénrichtingsverkeer

Vr. — Maar zou je zo'n maar in één richting doorlatende P-N-overgang niet als gelijkrichter kunnen gebruiken?
W. — Natuurlijk, mijn goeie Vraagal. Want als je er wisselspanning op zet, zal er tijdens de ene helft van de periode stroom lopen en tijdens de andere helft niet.
Vr. — Net als bij iedere andere diode?

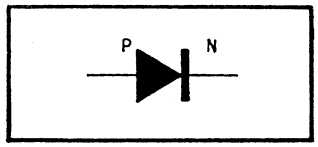
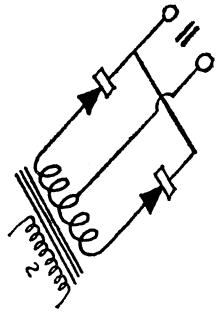


Fig. 20. Voor de halfgeleiderdiode wordt een pijlvormig symbool gebruikt, waarbij jammer genoeg als stroomrichting de richting van de positieve ladingen is gekozen. In werkelijkheid bewegen de elektronen zich dus in de tegengestelde richting...



W. — Juist, net zo. En daarom noem je zo'n P-N-overgang ook wel een halfgeleiderdiode. Hij kan, niet als iedere andere diode, als detector worden gebruikt. En het is zelfs een uitstekende detector. Bij heel hoge frequenties is hij zelfs beter dan een vacuümdiode.
Vr. — Kun je zulke dioden ook gebruiken voor het gelijkrichten van vrij sterke stromen, bijvoorbeeld in plaats van de gelijkrichtbuizen in een voedingsapparaat?
W. — Dat wordt vrij veel toegepast. Siliciumgelijkrichters, of gelijkrichters vervaardigd met koperoxyduul of seleen, hebben nog voordelen boven vacuümdioden. Zij zijn sterker en gaan veel langer mee.
Vr. — Als de zaken er zo voor staan, ben ik geneigd te roepen: „Leve de halfgeleiders!"

DERDE PRAATJE

TRANSISTOR, IK GROET U ZEER!

Nadat onze vrienden in het vorige praatje de eigenschappen van overgangen onderzocht hebben, gaan zij nu over tot de studie van de transistor. Al direct blijkt, dat deze op sommige punten heel veel op de hoogvacuümbuis lijkt, maar er toch ook op andere punten weer een groot verschil mee vertoont.
Weetal en Vraagal rafelen de versterkerwerking van de transistor uiteen en komen tot interessante gevolgtrekkingen aangaande de in- en uitgangsimpedantie.

Samenvatting: P-N-P- en N-P-N-transistoren. — Lekstroom. — Basisstroom. — Transistorwerking. — Stroomversterking. — Overeenkomst tussen buis en transistor. — Ingangs- en uitgangsimpedantie. — Spanningsversterking. — Voeding van transistoren.

Een flauwe grap

Weetal. — Dag Vraagal, waarom kom je te laat en kijk je ook nog kwaad?
Vraagal. — Er zijn van die... Weet je, dat je met een auto jouw straat niet meer in kan?
W. — In mijn straat is eenrichtingsverkeer voorgeschreven. Maar als je van de goeie kant komt...
Vr. — Er is geen goeie kant! Straatjongens, die vast denken dat ze reuze leuk zijn, hebben aan de andere kant een bord met „verboden in te rijden" geplaatst, zodat je nu van geen van beide kanten de straat meer in mag.
W. — Ik denk dat dat grapje bedacht is door iemand, die genoeg had van de herrie van het verkeer... Het maakt in ieder geval dat het hier lekker rustig is, wat we best kunnen gebruiken bij de studie van de transistor.
Vr. — Ik zou wel graag vlug willen weten hoe zo'n gevalletje met drie pootjes in elkaar zit.
W. — Nu dat is helemaal niet ingewikkeld. Een transistor bestaat uit twee in tegengestelde richting doorverbonden overgangen. Als voorbeeld zou je kunnen uitgaan van een N-P- en een P-N-overgang, met een gemeenschappelijke P-laag, wat een N-P-N-transistor zou opleveren.
Vr. — Ik denk dat als je er op dezelfde manier toe overging een P-N- en een N-P-overgang samen te voegen, je een P-N-P-transistor zou kunnen verkrijgen.

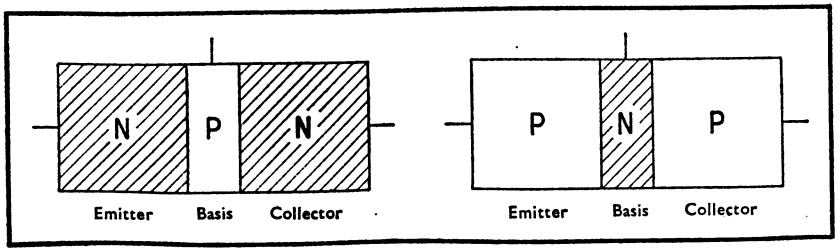
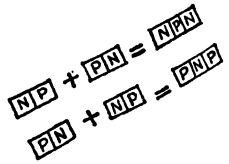


Fig. 21. De twee fundamentele typen transistoren: N-P-N en P-N-P.

W. — Uiteraard. Ik moet er nog bij vertellen, dat een van de beide buitengebieden emitter heet en het andere collector, terwijl het middengebied (dat heel erg dun moet zijn, dat wil ik je met klem op wijzen), basis wordt genoemd.



Vr. — Waaruit ik dus mag concluderen, dat een transistor een soort sandwich is met een dun plakje ham tussen twee dikke boterhammen.

W. — Als je daar zin in hebt.

Vr. — Laat ik je dan zeggen, dat die sandwich van jou net zo slecht te eten is als je straat te berijden.

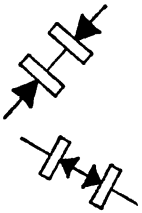
Een sandwich waar geen doorkomen aan is

W. — Wat wilde je voor gemeens zeggen, vriend?

Vr. — Heel eenvoudig, dat twee tegen elkaar in geschakelde overgangen in beide richtingen de stroomdoorgang beletten, op dezelfde manier als de twee bordjes „eenrichtingsverkeer" iemand geen kans geven je straat in te rijden, van welke kant hij het ook probeert.

W. — Ik vind die redenering van jou helemaal niet zo gek. Straks denk je nog, dat ik de schuld heb van dat flauwe grapje met die borden, alleen maar om je gemakkelijk uit te kunnen leggen hoe een transistor in elkaar zit... Het is inderdaad een feit, dat bij het aanleggen van een spanning over een transistor tussen emitter en collector, voor de ene zowel als voor de andere polariteit van die spanning één van beide overgangen altijd in de goede richting staat en best stroom wil doorlaten, maar de andere zal in de verkeerde richting staan en zich tegen stroomdoorgang verzetten.

Vr. — Indien we bijvoorbeeld een N-P-N-transistor links negatief maken en rechts positief, zal de linker (N-P-) overgang elektronen van links naar rechts door kunnen laten. Maar de rechter (P-N-) overgang zal de weg voor deze elektronen zonder meer versperren. Zouden er niet een paar slimme elektronen zijn, die toch kans zien erdoor te komen?



W. — Ja, die zijn er altijd wel. Zij vinden deze weg dankzij de warmtebeweging, die hun toestaat de potentiaalbarrière gevormd door de P-N-overgang te doorbreken. Deze elektronenstroom wordt lekstroom of verzadigingsstroom genoemd.

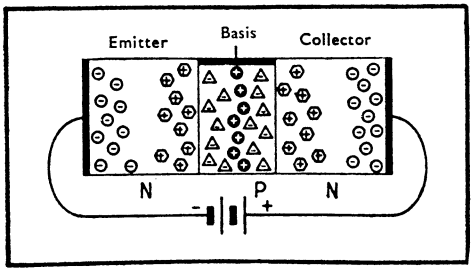
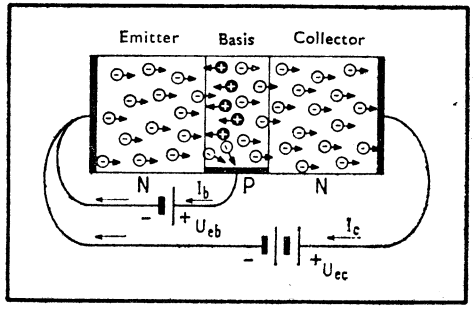


Fig. 22. Potentiaalwallen welke in een transistor worden gevormd door de elektronen, de gaten en de ionen (positieve bij de donoratomen en negatieve bij de acceptoratomen)

Vr. — Waarom gebruikt men die tweede naam? Is die stroom zo sterk?

W. — Helemaal niet... het is maar een heel klein stroompje en het hangt bijna niet van de waarde van de aangelegde spanning af. Wanneer je die verhoogt, blijft de stroom vrijwel gelijk. Onder verzadiging verstaat men het verschijnsel, dat alle vrije elektronen die bij de gegeven temperatuur in staat zijn om de potentiaalwal te overschrijden, aan die stroom deelnemen.

Vr. — Maar als de temperatuur toeneemt . . .?
W. — Dan zal de waarde van de verzadigingsstroom ook toenemen. Verder kan het gebeuren, dat die stroom bij hoge spanning een waarde bereikt, waarbij hij de overgang zo warm maakt, dat hierdoor de stroom sterk toeneemt . . .
Vr. — Waardoor op zijn beurt de verwarming weer toeneemt, en zo maar door.
W. — Ja, men zegt dan dat de transistor uit thermisch evenwicht is. En dat verschijnsel kan het einde van de transistor betekenen. Het is dan ook verstandig om niet te hoge spanningen aan te leggen en te zorgen voor een goede warmte-afgifte.
Vr. — Ik beloof je ventilatoren in mijn transistorapparaten in te bouwen. Maar ik zie het nut nog steeds niet in van halfgeleiders in de vorm van sandwiches.



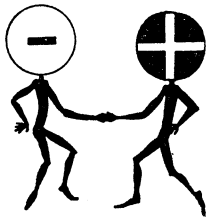
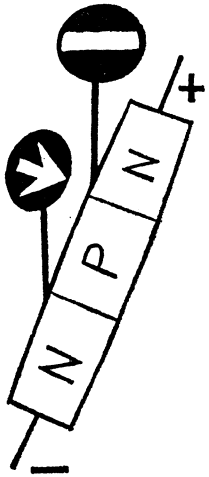


Fig. 23. Omdat de spanningsbron U_{eb} de elektronen van de emitter naar de basis trekt, ontstaat er een doorgang naar de collector.

Alles begint bij de basis

W. — Dat komt omdat je je nog niet met de ham hebt bezig gehouden . . . ik bedoel met het dunne middenlaagje tussen de twee overgangen dat we de basis genoemd hebben. Laten we eens een lage spanning in de doorlaatrichting tussen emitter en basis leggen.
Vr. — Bedoel je dat bijvoorbeeld van een N-P-N-transitor de emitter negatief wordt ten opzichte van de basis?
W. — Dat bedoel ik. Wat denk je dat er gebeurt?
Vr. — Niets bijzonders. Omdat de spanning in de goede richting is aangelegd, zal er een stroom gaat lopen door de overgang tussen de emitter en de basis. En dat is het dan.



W. — Er gebeurt nog meer. Want die stroom zal in de basis vrije elektronen brengen vanuit de emitter welke uit N-materiaal bestaat. En omdat de basis heel dun is, zal maar een gering aantal van deze elektronen de in het P-gebied verspreide gaten vullen, wat overeenkomt met een *basisstroom* I_b in overeenstemming met wat we de vorige keer hebben bestudeerd bij ons onderzoek van de N-P-overgang. Intussen zal het grootste deel van de in de basis binnenstromende elektronen doorlopen naar de collector, waar ze worden aangetrokken door de vrij hoge positieve voedingsspanning. De potentiaalsprong van de tweede overgang helpt hen daarbij nog een beetje. Van de collector lopen ze via de spanningsbron U_{ec} weer naar de emitter terug.
Vr. — Dat is fantastisch! Als ik het goed begrijp, is het al voldoende om een geringe spanning tussen basis en emitter aan te leggen om de elektornen door de tweede overgang heen te voeren, die hen in het normale geval zou moeten tegenhouden.
W. — Dat is zo, Vraagal, en dat vrijmaken van een keerstroom in de tweede overgang vormt zelfs de grondslag van de *transistorwerking.*

Vr. — Ik geloof dat ik het beter zou snappen, als je me eens een paar getallen gaf voor de grootten van de spanningen en de stromen die hierbij optreden.

Micro-ampères basisstroom en milli-ampères collectorstroom

W. — Tussen de basis en de emitter wordt bij normale transistoren een spanning gezet van 0,1 à 0,2 V. Deze bepaalt de grootte van de basisstroom, welke dan ongeveer 50 à 200 micro-ampère bedraagt. De spanning tussen collector en emitter kan variëren tussen 4,5 en 9 V. En de collectorstroom bedraagt 2 à 10 mA.

Vr. — Hieruit volgt dus, dat de emitter een aantal elektronen in de basis stuurt, waarvan een gering gedeelte direct via de basisspanningsbron U_{eb} naar de emitter

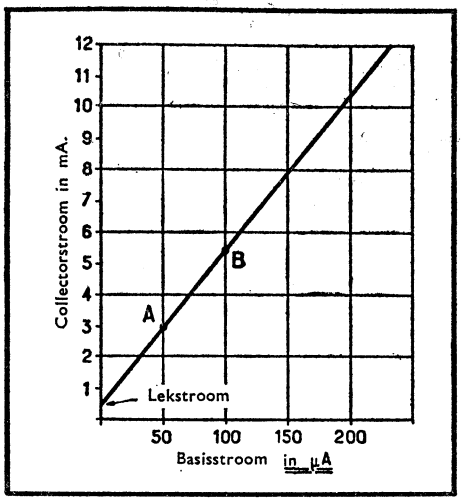
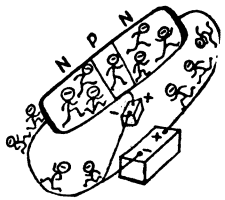


Fig. 24. Collectorstroom I_c (in mA) als functie van de basisstroom I_b (in micro-ampères). Tussen de punten A en B neemt de basisstroom van 50 tot 100 μA toe, dat wil zeggen met 50 μA of 0,05 mA. De collectorstroom neemt tussen de beide genoemde punten toe van 3 tot 5,5 mA, dus met 2,5 mA.
De transistor heeft dus een stroomversterking van 2,5 : 0,05 = 50 maal.

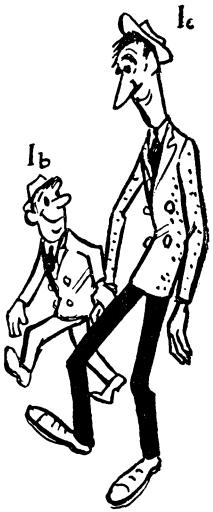
terugkeert. Dit zijn de elektronen, die tijdens hun korte tocht door de basis het ongeluk hebben gehad in een gat terecht te komen. Maar het grootste deel vervolgt zijn weg en schiet door de tweede overgang naar de collector, waarvandaan het door de collectorspanningsbron U_{ec} naar de emitter terugkeert. Ik geloof het wel bij het rechte eind te hebben, als ik zeg dat de versterkerwerking van de transistor er op berust, dat de collectorstroom veel groter is dan de basisstroom.



W. — Je bent wel een beetje snel in je redenering, maar je verhaal klopt wel. Inderdaad hangt de collectorstroom praktisch geheel af van de basisstroom en is er mee evenredig. In de meeste gevallen is de collectorstroom vele tientallen malen groter. Hier heb ik bijvoorbeeld een kromme waaruit je kunt aflezen, hoe de collectorstroom van een bepaald type transistor toeneemt met de basisstroom. Nu moet je goed uitkijken, Vraagal! De basisstroom is hier aangegeven in micro-ampères, terwijl de collectorstroom in milli-ampères is gemeten. Je kunt zien dat de collectorstroom steeds 50 maal groter is dan de basisstroom (afgezien van de zwakke lekstroom, die ook reeds zonder basisstroom loopt). Men zegt nu dat de *stroomversterking* van deze transistor 50 maal is.

Vr. — En hoe komt men aan zo'n kromme?

W. — Om deze op te nemen, legt men tussen de basis en de emitter een variabele



spanning, met behulp van een instelbare spanningsdeler, in het gewone leven potentiometer genoemd. Men meet dan de basisstroom met een micro-ampèremeter.

Vr. — Ik krijg een idee, Weetal. Als je in plaats van aan de knop van de potentiometer te draaien, de spanning tussen de emitter en basis eens kon doen wisselen door in serie met de gelijkspanningsbron een variërend signaal te zetten, bijvoorbeeld de radiofrequente spanning van een antenne, of beter nog de laagfrequente spanning van een detector ... Als je op die manier de basisstroom kleine veranderingetjes geeft, zou je flinke veranderingen in de collectorstroom krijgen.

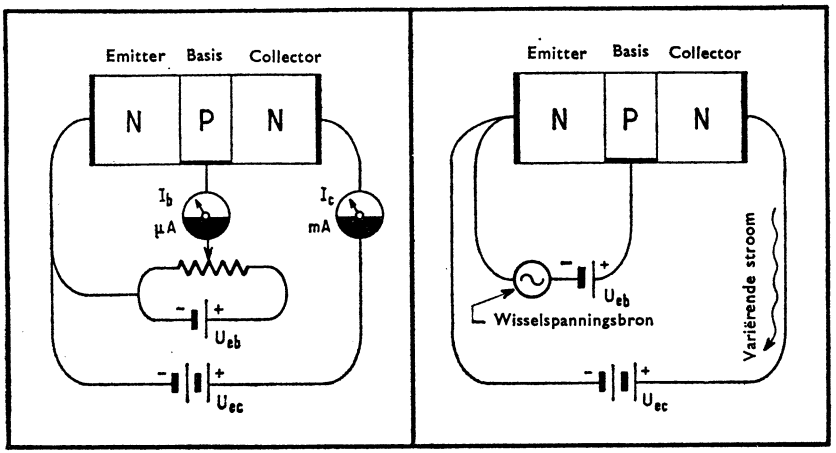
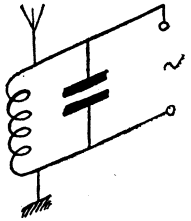


Fig. 25. Schema voor het opnemen van de grafiek van fig. 24. Bij iedere stand van de potentiometer zijn de waarden van de basis- en van de collectorstroom opgenomen.

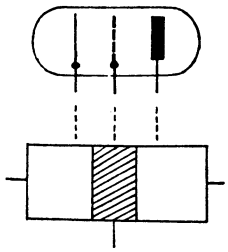
Fig. 26. Nu is een wisselspanningsbron in de basisketen opgenomen. Het gevolg hiervan is, dat de collectorstroom in het ritme van de wisselspanning gaat variëren.



Punten van overeenkomst en verschil

W. — Goed zo, Vraagal! Je maait me het gras voor de voeten weg. Hoe ben je op dat luisterrijke idee gekomen?

Vr. — Omdat ik ineens overeenkomst meende te bespeuren tussen de transistor en de elektronenbuis. De basis lijkt verduiveld veel op het rooster. Want hij staat net zo tussen emitter en collector als het rooster tussen de kathode (die ook elektronen uitzendt) en de anode (die eveneens elektronen opvangt). En evenals zwakke spanningsvariaties op het rooster sterke variaties in de anodestroom teweeg brengen, zijn hier zwakke variaties van de basispotentiaal de oorzaak van sterke variaties van de collectorstroom. Hoera! Ik snap nu hoe de transistor werkt ! ! ! Vind je me geen kei?

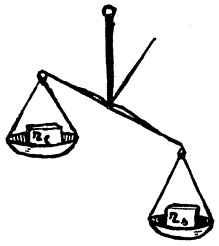


W. — Ik vind niet, dat je reden hebt om zo geweldig trots te zijn. Ik moet je jeugdig enthousiasme misschien wel een koude douche bezorgen, maar ik moet je toch meteen meedelen, dat de overeenkomst tussen buis en transistor, hoe gemakkelijk deze soms voor het begrip is, maar binnen bepaalde grenzen bruikbaar is.

Vr. — Ik zie toch geen essentieel verschil.

W. — Om maar te beginnen met het punt van de stuurenergie: deze is nodig door

het lopen van de basisstroom. Denk maar eens aan vroeger, toen we er bij vacuümbuizen er vooral voor zorgen dat er géén roosterstroom liep .



Vr. — Dat is zo. We leggen een negatieve roosterspanning aan, om te voorkomen dat het rooster positief wordt tijdens de positiefgaande toppen van de signaalwisselspanning, omdat anders het rooster een deel van de anodestroom zou wegkapen.

W. — Daaruit volgt, dat een buis slechts met spanning en niet met stroom gestuurd behoeft te worden, wat dus ook geen vermogen kost. Maar bij de transistor laat de ingangsspanning een basisstroom lopen. Dit kost dus wèl vermogen.

Vr. — Moet ik daaruit besluiten, dat de *ingangsweerstand* van de transistor, dat wil zeggen de weerstand tussen emitter en basis, laag is?

W. — Natuurlijk. Die weerstand is niet hoger dan enige honderden ohms, terwijl in een vacuümbuis de weerstand tussen kathode en rooster praktisch oneindig groot is. En in vermogenstransistoren is deze weerstand slechts een paar ohm of tientallen ohms. Daartegenover staat, dat de *uitgangsweerstand* behoorlijk hoog is en verscheidene tientallen kilo-ohms bedraagt.[1])

Vr. — Dat is ook te verwachten, want de spanning over de emitter-basisovergang staat in de doorlaatrichting, wat een lage weerstand oplevert, terwijl de spanning bij de basis-collector-overgang in de keerrichting staat, wat een zeer hoge weerstand moet opleveren. Daarbij komen namelijk waarden voor, die overeenkomen met de inwendige weerstand van triodebuizen.

W. — Je ziet dus, Vraagal, dat je heel erg op moet passen, als je iets wilt afleiden uitgaande van de overeenkomst tussen buis en transistor. En nu we toch begonnen zijn ons te verdiepen in de studie van de weerstanden (of beter van de impedanties) van de in- en uitgang, zul je zonder moeite begrijpen, hoe zo'n transistor als spanningsversterker werkt.

Spanningsversterkers

Vr. — Ik denk, dat als je een zwakke wisselspanning aanlegt tussen basis en emitter, er basisstroomvariaties zullen ontstaan, zoals we al besproken hebben.

W. — En die variaties zullen des te groter zijn naarmate de ingangsweerstand lager is (aangenomen dat de spanningsbron zelf een lage inwendige weerstand heeft).

Vr. — Dat begrijp ik, want ik heb nooit moeite met de wet van Ohm, die zegt dat de stroomsterkte evenzoveel malen groter wordt als de weerstand kleiner.

W. — En in dit geval varieert de collectorstroom evenredig met de basisstroom. We krijgen dan grote collectorstroomveranderingen. En aangezien de uitgangsweerstand van de transistor hoog is, kunnen we zonder bezwaar de collectorstroom door een behoorlijk hoge belastingsweerstand sturen . . .

---

[1]) De weerstanden waarover Weetal spreekt, worden gevonden door een kleine spanningsverandering te delen door de erbij behorende kleine stroomverandering. Zo vindt men voor de *ingangsweerstand*:

$$r_i = \frac{\Delta U_b}{\Delta I_b}$$

waarin ΔU_b een kleine verandering van de spanning tussen emitter en basis voorstelt en ΔI_b de daardoor veroorzaakte basisstroomverandering. Aangenomen wordt, dat de collectorspanning hierbij niet verandert. Op dezelfde manier vindt men voor de *uitgangsweerstand*: $r_u = \frac{\Delta U_c}{\Delta I_c}$

waarin ΔU_c een kleine verandering van de spanning tussen collector en emitter voorstelt, terwijl ΔI_c de bijbehorende verandering van de collectorstroom is. De meting kan óf met constante basisstroom óf met constante basisspanning worden uitgevoerd.

Vr. — . . . waarover we dan weer aardig versterkte wisselpanningen kunnen afnemen. Als ik me goed herinner noemt men de verhouding van een kleine anodestroomverandering tot de roosterspanningsverandering die er de oorzaak van is, de *steilheid* van een buis. Kun je bij de transistor hetzelfde begrip gebruiken? De steilheid zou dan de verhouding van de collectorstroomvariatie tot de basisspanningsvariatie moeten zijn.

W. — Jazeker, Vraagal. Men spreekt wel eens over de steilheid van een transistor. En we zullen dat begrip nog wel nader bekijken. Maar ik kan je nu al vast zeggen, dat een steilheid van 30 mA/V (bij een collectorstroom van 1 mA, want de steilheid hangt van de stroom af) helemaal geen bijzondere waarde is.

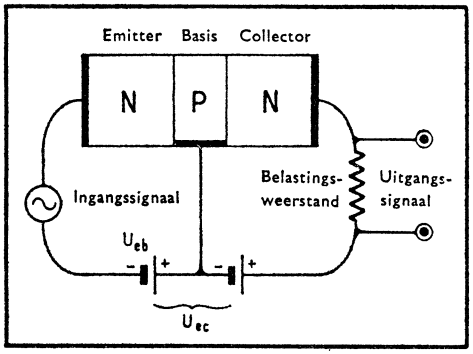
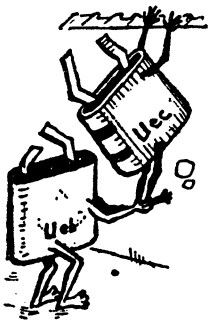


Fig. 27. Het is mogelijk in plaats van de basis- en de collectorspanningsbron slechts één voedingsspanning te gebruiken met aftakking (zoals hiernaast getekend). Meer aan te bevelen is het gebruik van een spanningsdeler. In het schema is tevens aangegeven, op welke plaats de belastingsweerstand in de keten moet worden opgenomen. Hierover ontstaat het uitgangssignaal.



Vr. — Maar dat is geweldig! Met zo'n steilheid moet het mogelijk zijn enorme versterkingen te verkrijgen.

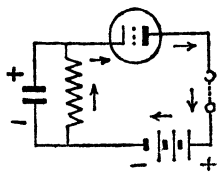
W. — Jammer genoeg is dat niet het geval. Want zoals je gauw zult zien, verliezen we door de lage ingangsweerstand weer heel wat van het voordeel van die hoge steilheid. Verder moet je er om denken de amplitude van de gebruikte wisselspanning niet te groot te maken.

Vr. — In vacuümbuizen mag het rooster niet positief worden. Ik denk, dat je hier moet zorgen dat de positieve toppen van de wisselspanning de emitter niet positief maken ten opzichte van de basis.

W. — Je kunt niet verder gaan dan totdat de negatieve wisselspanningstoppen over de collectorweerstand lager worden dan de positieve collectorvoedingsspanning, want anders wordt de collector negatief.

Vr. — Zou je om deze moeilijkheden te voorkomen de waarde van de twee voedingsspanningen niet wat kunnen verhogen?

W. — Dat zou niet altijd gaan, want voor ieder type transistor gelden bepaalde gelijkspanningen, die nooit overschreden mogen worden. En bij deze gelegenheid vertel ik je meteen maar, dat je de twee spanningsbronnen heel goed in serie kunt schakelen, omdat de collector veel positiever moet worden dan de basis en deze weer positiever dan de emitter.



Vr. — Ik zie dat de batterij U_{eb} de batterij U_{ec} vast een duwtje omhoog geeft.

W. — In de praktijk gebruikt men slechts één batterij, ter grootte van U_{ec} en wordt de basisvoorspanning verkregen via een serieweerstand.

Vr. — Net als dat bij buisschakelingen wordt gedaan, waar de anodestroom automatisch de negatieve roosterspanningen opwekt.
W. — Ja, zo ongeveer, maar we zullen daar later nog wel op ingaan. Ondertussen wilde ik je bij wijze van oefening verzoeken eens na te denken over ons onderwerp voor de volgende keer, namelijk hoe het tweede type transistor werkt: de P-N-P-transistor die verreweg het meest wordt gebruikt.
Vr. — Arme ik, met zoveel slapeloze nachten in het vooruitzicht!

VIERDE PRAATJE

WAT GEBEURT ER IN EEN TRANSISTOR

Weetal en Vraagal hebben in de loop van hun eerste drie praatjes nagegaan, op welke natuurkundige grondslagen de transistor berust. Daartoe hebben ze zich op de hoogte gesteld van de inwendige opbouw van het atoom en van de wijze waarop het zich ten opzichte van zijn soortgenoten in het kristalrooster gedraagt. Ze hebben een inzicht gekregen in de moeilijkheden, die het insluipen van verontreinigingen in de samenleving van de atomen veroorzaakt. En tenslotte is het onze vrienden gelukt in gedachten dioden en transistoren te vervaardigen door samenvoeging van halfgeleiders met verontreinigingen van tegengesteld type.
Om dit alles goed te kunnen onthouden, is het wel gewenst alles nog eens kort te herhalen. Dit praatje is dan ook gewijd aan een samenvatting van de behandelde grondslagen.

Samenvatting: Beweging van ladingen. — Meerderheidsladingdragers. — Werking van de P-N-P-transistor. — Drie-vijf-verbindingen. — Het aanbrengen van de verbindingsdraden. — Transistorsymbolen. — Overzicht van de te onthouden begrippen.

Vier soorten geladen deeltjes

Vraagal. — Die halfgeleiders van jou bezorgen me slapeloze nachten, Weetal. Ik kan er haast niet meer mee ophouden . . . al vind ik ze verduiveld ingewikkeld.
Weetal. — Moet ik je slaappoeders voorschrijven, of heb je liever dat ik probeer je de moeilijke punten nog eens uit te leggen?
Vr. — Ik zou liever willen dat je me antwoord gaf op een paar vragen waar ik mee zit. Weet je wat sommige verschijnselen voor mij zo onduidelijk maakt, dat is de aanwezigheid in halfgeleiders van vier soorten geladen deeltjes:
1. Geïoniseerde donoratomen, die na het verlies van hun vijfde elektron uit de buitenschil positief zijn geworden.
2. De hierbij vrijgekomen elektronen, die uiteraard negatief zijn.
3. De geïoniseerde acceptoratomen, die door het bemachtigen van een elektron uit een naburig atoom hun buitenschil tot vier elektronen hebben afgerond en daardoor negatief zijn geworden.
4. Tenslotte de gaten ontstaan in de buitenschil van de beroofde atomen, waar het ontbreken van een elektron hetzelfde effect oplevert als een positieve lading.
W. — Hiermee heb je een heel goed overzicht gegeven van de toestand in het binnenste van een halfgeleider. Waar maak je je dan verder nog ongerust over?

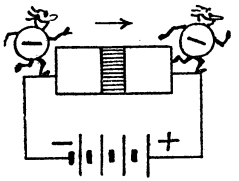
Vr. — Over het probleem van de beweging van de ladingen. Je hebt me gezegd, dat de elektrische stroom in een halfgeleider zowel veroorzaakt wordt door een elektronenverplaatsing van de negatieve pool naar de positieve pool als aan een tegelijkertijd optredende beweging van gaten in omgekeerde richting, dus van de positieve pool naar de negatieve pool. Hierin verschillen halfgeleiders van metalen, waarbij de geleiding uitsluitend plaats vindt door middel van bewegende elektronen.
W. — Volkomen juist, al komt de beweging van de gaten zelf in laatste instantie ook weer neer op een verplaatsing van elektronen.

Vr. — Maar ik begrijp niet waarom de geïoniseerde atomen, zowel uit het donor- als uit het acceptormateriaal, zelf ook niet deelnemen aan de beweging van de elektrische ladingen.

W. — Ik begrijp waar je mee tobt. En ik geef je groot gelijk dat je die vraag stelt. Toch is het antwoord niet moeilijk: Die atomen kunnen zich niet verplaatsen, omdat zij deel uitmaken van het kristalrooster en daardoor onwrikbaar stevig aan hun plaats zijn gebonden. Zolang een lichaam een vaste stof blijft, blijven de atomen ervan gevangen door die onzichtbare keten die hen aan hun plaats bindt. In tegenstelling hiermede kunnen de geïoniseerde atomen zich in vloeistoffen vrij verplaatsen, zodat de stroom zich door ionentransport voortplant, hetgeen de oorzaak is van die verschijnselen welke we elektrolyse noemen en waarvan je vast en zeker wel het een en ander gehoord hebt bij de natuurkundeles.

Vr. — Wat je me nu zegt, doet me genoegen. Voortaan zal ik me bij mijn verklaringen niet meer behoeven te bekommeren over de geïoniseerde atomen en behoef ik me alleen nog maar te bemoeien met de elektronen en de gaten.

W. — Dat kun je inderdaad met een gerust geweten doen. Ik zou er nog bij willen zeggen, dat het maar gelukkig is dat de ionen zich in halfgeleiders niet verplaatsen. Indien dit wel het geval was, zou het halfgeleidermateriaal langzamerhand uitgeput raken, wat de levensduur van een transistor zou beperken. In werkelijkheid wordt de voorraad elektronen voortdurend aangevuld met nieuwe, omdat de spanningsbron aan de ene kant elektronen naar binnen stuurt en deze aan de andere kant weer opneemt (waardoor weer nieuwe gaten ontstaan). Dat wil zeggen, dat er geen enkele beperking is die transistoren het bereiken van een hoge ouderdom in de weg staat.

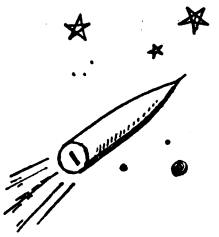


Einstein had het bij het rechte eind

Vr. — Dat is fantastisch... Maar laten we bij onze elektronen en gaten blijven. Ik wilde weten hoe die het samen uithouden zonder elkaar voortdurend te neutraliseren...

W. — Denk eens Vraagal aan de enorme afstanden die (wel te verstaan op atomaire schaal) liggen tussen de meeste van deze deeltjes. Een elektron slaagt er in afstanden af te leggen ter lengte van verscheidene honderden malen de afstand tussen twee naburige atomen. In onze menselijke maatstaven gemeten is dat slechts een 10 000ste mm. Maar voor een elektron is dat een even gewaagd avontuur als een interstellaire reis van een toekomstige ruimteraket. Je begrijpt dus, dat onder die omstandigheden de kans dat hij een gat tegenkomt niet erg groot is. In feite bestaan er altijd elektronen en gaten naast elkaar.

Vr. — Ja, je hebt me uitgelegd dat, zelfs bij normale temperatuur, een zekere warmtewerking aanwezig is, die verscheidene atomen van een elektron berooft, waarbij de vrij gekomen elektronen door de interatomaire ruimte schieten.

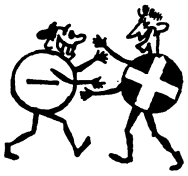


W. — In een cm^3 zuiver germanium vind je toch altijd nog 25 000 miljard vrije elektronen en kennelijk evenveel gaten, want ieder gat werd geleverd door het losbreken van een elektron. Nadat ze een poosje een vrij bestaan hebben, recombineren gaten en elektronen weer, maar ondertussen worden weer nieuwe paren gaten en elektronen gevormd, zodat er een dynamisch evenwicht heerst.

Vr. — En als het germanium niet helemaal zuiver is? Als we er bijvoorbeeld eens verontreinigingen van het N-type in brengen?

W. — Vanaf dat moment zullen er meer vrije elektronen dan gaten zijn. En die elektronen zullen meerderheidsladingsdragers worden genoemd.

Vr. — Ik denk, dat in een halfgeleider van het P-type de gaten in overmaat voorkomen en dus als meerderheidsladingdragers moeten worden bestempeld . . .
Einstein had toch wel gelijk. Alles is relatief en hangt slechts van de onderlinge verhoudingen af.



De werking van de P-N-P-transistor

W. — Nu ik aan je nieuwsgierigheid voldaan heb, zou ik je willen vragen op jouw beurt antwoord te willen geven op de vraag die ik bij het einde van ons vorig praatje heb gesteld: Hoe werkt de P-N-P-transistor?

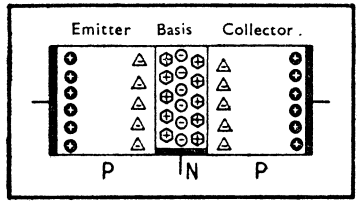
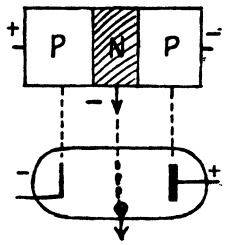


Fig. 28. Verdeling van ladingdragers (elektronen en gaten) en van geïoniseerde atomen in een P-N-P-transistor indien geen uitwendige spanningen worden aangelegd. Door de tegengesteld geladen ionen ontstaan potentiaalwallen (contactpotentialen) in grenslagen.



Vr. — Ik heb er over nagedacht en ik geloof dat ik er wel uitkom. In een dergelijke transistor moet. in tegenstelling tot wat men bij een N-P-N-transistor doet, de collector negatief worden ingesteld ten opzichte van de emitter. Ik moet je overigens bekennen, dat ik dat helemaal niet prettig vind.
W. — Waarom vind je dat niet?
Vr. — Omdat ik de neiging heb de transistor steeds met een triode te vergelijken. En het idee van een anode die negatief is ten opzichte van de kathode — dat zijn de elektroden waarmee de collector en de emitter overeenkomen —, dat idee zint me niet erg. Aan de andere kant maakt de wetenschap dat de basis ook negatief ten opzichte van de emitter moet zijn, mij weer wat vrolijker, want ik denk daarbij, dat begrijp je wel, aan het stuurrooster.

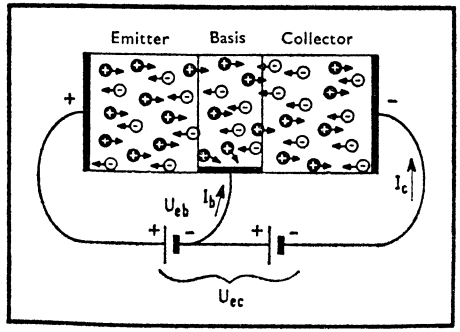
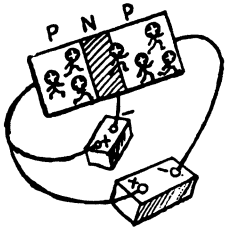


Fig. 29. Beweging van ladingdragers in een P-N-P-transistor bij stroomdoorgang. Om de tekening niet al te vol te maken zijn de ionen weggelaten.



W. — Ik heb je al gezegd, Vraagal, dat je geen vertrouwen moet hebben in dergelijke vergelijkingen.
Vr. — Hoe het ook zij, wanneer de voedingsspanningen op die manier zijn aangelegd, komt de emitter-basis-overgang in de doorlaatrichting onder spanning. Dat wil zegen, dat de gaten uit de emitter zich in beweging zetten, afgestoten door de

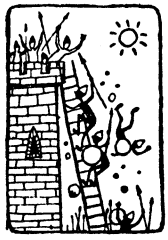
positieve pool van de voedingsspanning, en dat er dus extra veel gaten bij de P-N-overgang aankomen. Deze zullen in de basis diffunderen en bij voldoende dunne basis zien ze geen kans te luisteren naar de roep van de negatieve pool van de met de basis verbonden batterij U_{eb}, zodat het grootste deel door de dunne basislaag heenschiet en in het collectorgebied doordringt.

W. — Dat is volkomen juist. Toch zou ik nog willen weten, wat er gebeurt met die enkele gaten die, zoals je het uitdrukt, wel gehoor schenken aan de roep van de negatieve pool van de batterij U_{eb}.

Vr. — Die worden geneutraliseerd bij hun recombinatie met elektronen welke uit die pool vloeien. Op die wijze wordt een zwakke stroom I_b gevormd, welke van basis naar emitter loopt (wel te verstaan als elektronenstroom).

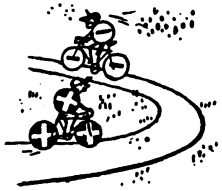
W. — En wat is het lot van het leeuwendeel van de gaten die de collector bereikt hebben?

Vr. — Daar vertoont zich hetzelfde verschijnsel: Ze worden geneutraliseerd door elektronen die uit de negatieve pool van de batterij U_{ec} vloeien, welke batterij hen tenslotte met krachtige stem naar zich toe roept. En steeds nadat zo'n elektron uit de batterij de collector is binnengetreden, om zich daar met een gat te verenigen, zal weer een andere elektron worden losgemaakt uit een van de atomen van het emittermateriaal, om door de positieve pool van die batterij te worden opgeslokt; je weet wel dat een elektron bij het verlaten van het atoom weer een nieuw gat doet ontstaan. En op deze wijze wordt de stroom onderhouden door het gelijktijdig lopen van gaten van de emitter in de richting van de collector, en van elektronen welke de gaten tot aan de recombinatieplaatsen tegemoet lopen. Klopt dat?



W. — Ik sta versteld dat je de werking van de transistor zo goed hebt begrepen. Eigenlijk gebeurt alles net als bij de aanval van een leger op een vesting. De aanvallers bereiken de borstwering en komen er overheen dankzij hun onweerstaanbare aanval, waarbij zij de slagorde van de verdedigers die hen proberen tegen te houden, weten te doorbreken.

Vr. — Je vergelijking waarin de borstwering de basis voorstelt, en de vesting de collector zou overtuigender zijn, als je er het verdedigende garnizoen bij betrok ter symbolisering van de beweging van de elektronen die de aanvallende gaten tegemoet gaan. Nu we het er toch over hebben, zou ik wel eens willen weten of de elektronen en gaten even hard lopen.



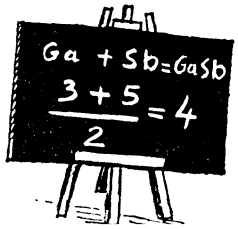
Toekomstige transistormaterialen

W. — Nee, Vraagal. In zuiver germanium doorlopen de elektronen in een elektrisch veld van 1 V per cm circa 40 m per seconde, terwijl de gaten zich ongeveer tweemaal zo langzaam voortbewegen. In silicium is de elektronensnelheid onder dezelfde omstandigheden 12 m per seconde en die van de gaten slechts 2,5 m per seconde. Hiertegenover staat, dat in bepaalde 3-5-verbindingen de elektronen snelheden bereiken van meer dan een halve km per seconde.

Vr. — Wat zijn dat voor verbindingen, waar je het ineens over hebt?

W. — Dat zijn halfgeleiders, verkregen door het combineren van drie- en vijfwaardige elementen.

Vr. — Waarbij je als gemiddelde tussen 3 en 5 weer een 4-waardige structuur krijgt, evenals dit bij germanium en silicium het geval is. Kun je me daar een paar voorbeelden van noemen?



W. — Ja, bijvoorbeeld de combinatie van driewaardig gallium en vijfwaardig antimoon,

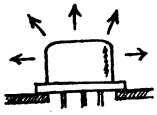
die de mogelijkheid oplevert er transistoren van te maken. Ofwel driewaardig indium in combinatie met vijfwaardig fosfor, dat eveneens een halfgeleider oplevert waarmee soms dioden vervaardigd worden. Men is er zelfs in geslaagd een combinatie van cadmium (tweewaardig) en seleen (zeswaardig) te gebruiken ter vervaardiging van foto-elektrische cellen. Het gebied van dergelijke halfgeleiders wordt ijverig bestudeerd en heeft reeds belangwekkende resultaten opgeleverd.

Vr. — Je praat als een boek mijn vriend, maar laten we ons bij ons onderwerp houden . . . die diertjes met drie poten. Ik wilde weten wat het verschil is tussen een emitter en een collector. In een P-N-P-transistor bestaan zij beide uit hetzelfde materiaal, namelijk P-germanium (trouwens ook bij een N-P-N-transistor zijn zij van hetzelfde materiaal). Volgt hier niet uit dat je ze kunt verwisselen?

W. — Nee, mijn vriend, dat kan ik je gemakkelijk uitleggen. Al is die stroom, die van de emitter naar de basis en vandaar naar de collector loopt, praktisch overal even sterk, de spanningen zijn geheel verschillend. Tussen basis en emitter staat slechts een gering spanningsverschil, terwijl tussen collector en basis een veel hogere spanning staat.

Vr. — Ik snap het! Omdat het produkt van stroom en spanning vermogen oplevert, wordt aan de collectorzijde een vele malen groter vermogen in warmte omgezet dan in de basis-emitter-overgang.

W. — Je hebt volkomen gelijk. Dat is de reden waarom de collector zo moet worden geconstrueerd, dat hij zonder moeite de erin ontwikkelde warmte kan dissiperen (afvoeren). De collector moet dus een veel grotere oppervlakte hebben dan de emitter. In vermogenstransistoren is de collector daarom direct met het metalen huis verbonden, waardoor dit huis een gedeelte van de warmte kan uitstralen en de rest van de warmte door geleiding naar het chassis kan worden afgevoerd.



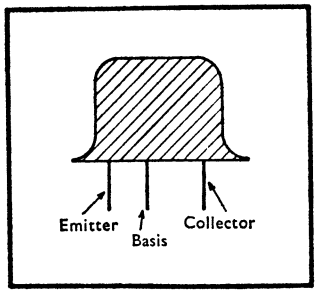
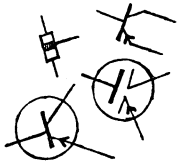


Fig. 30. De aansluitingen zijn bij een transistor zo aangebracht, dat emitter, basis en collector kunnen worden onderscheiden (de collectoraansluiting ligt het verst van de basisaansluiting).

Vr. — Nu begrijp ik waarom men verschil maakt tussen de elektroden van een transistor. Maar hoe kun je dat verschil uitwendig zien? Hoe weet je nu welk draadje naar de basis en welk draadje naar de collector loopt?

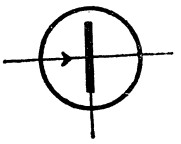


Pootjes en puntjes

W. — Dat kun je direct zien. De drie draadjes (want een kleine transistor heeft geen voet of aansluitklemmen) staan op een rijtje. De twee draden die het dichtst bij elkaar staan zijn de emitter en de basis. De derde die er wat verder van verwijderd is, voert naar de collector (deze laatste kan ook nog gemerkt zijn met een gekleurd puntje).

Vr. — Dat is werkelijk een eenvoudig en gemakkelijk te begrijpen systeem, net als

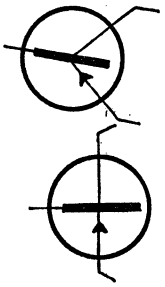
dat symbool dat jij in je schetsen voor een transistor gebruikt, zo'n staafje dat in drie gebieden verdeeld is.



W. — Het is jammer, Vraagal, dat men zo'n duidelijk symbool, dat overeenkomt met de werkelijke opbouw van de transistor, gewoonlijk niet in de schema's gebruikt.

Vr. — Jammer! En welk tekensymbool wordt dan officieel voor de transistor gebruikt?

W. — Er is geen symbool dat iedereen gebruikt en in verschillende landen en door verschillende schrijvers worden verschillende symbolen gebruikt. Maar de meesten gaan uit van de volgende vorm: een dikke lijn met twee dunnere lijnen, welke schuin op het midden van de dikke gericht zijn. De dikke lijn stelt de basis voor. De dunne lijn, welke van een pijl voorzien is, is de emitter en de andere zonder pijl, de collector. En — dat moet je goed onthouden — wanneer de pijl naar de basis gericht is, is de transistor van het P-N-P-type. Indien de pijl van de basis afwijst, stelt het symbool een N-P-N-transistor voor.



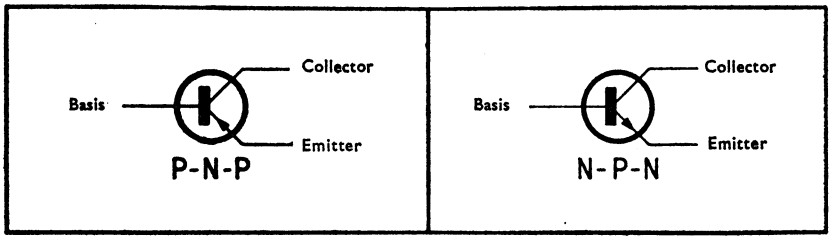


Fig. 31. Veel gebruikte symbolen voor P-N-P- en N-P-N-transistoren.

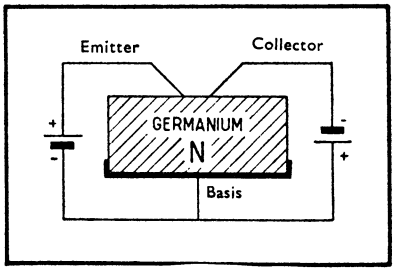
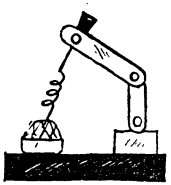


Fig. 32. Opbouw van een nog slechts weinig gebruikte punt-contacttransistor.



Vr. — Waarom voor de duivel hebben ze een symbool aangenomen dat zo weinig overeenkomst vertoont met de werkelijke opbouw van een transistor, waar emitter en collector zich aan weerskanten van de basis bevinden?

W. — Dat is nog een nasleep van de voorhistorische tijd uit het jaar 1948. De eerste transistoren die toen hun intrede in de wereld deden, waren van het puntcontact-type. Zij werden vervaardigd uit een germaniumkristal van N-materiaal dat als basis fungeerde, waarop twee metaaldraadjes rusten met de punten vlak bij elkaar.

Vr. — Maar, Weetal, was dat geen terugkeer naar de oude kristaldetector?

W. — Dat scheelt niet veel. Maar in plaats van één puntcontact hadden ze er twee. En een dergelijke transistor werd op dezelfde manier geschakeld als de huidige

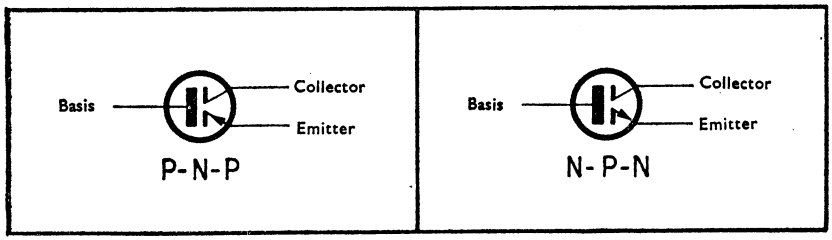


Fig. 33. Symbolen waarmee speciaal aangegeven wordt dat lagentransistoren bedoeld zijn (deze symbolen worden vrijwel niet gebruikt).

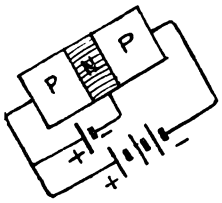
P-N-P-transistor. Het bezwaar van de puntcontacttransistor is zijn gemis aan stabiliteit, evenals dat het geval was met zijn voorganger de kristaldetector. Daarbij komt nog dat je er geen vermogen van enig belang in kunt stoppen. Dat is de reden waarom men ze bijna niet meer gebruikt (al worden puntcontactdioden dan nog steeds gewaardeerd, vooral in het gebied van de zeer hoge frequenties, bijvoorbeeld bij radar, om de uiterst geringe capaciteit van deze dioden).

Vr. — Alles bij elkaar is het huidige symbool een overblijfsel van een voorbije tijd, is het niet? Maar voordat we verder gaan, Weetal, zou ik je willen vragen om nog eens in het kort en als het kan graag op een papiertje de belangrijkste punten van datgene, wat je tot nog toe verteld hebt, samen te vatten. Ik kan daar veel nut van hebben voor de rest van je uiteenzetting. Ik kan dan die punten voor onze volgende ontmoeting goed in mijn hoofd zetten.

W. — Een dergelijk overzicht wil ik heel graag voor je maken en ik zal het je per brief sturen. Ik geloof dat we er nu voor vanavond een einde aan moeten maken. Wel te rusten, Vraagal.

Een brief van Weetal aan Vraagal

Hierbij, mijn goede vriend, de punten die je muurvast in je geheugen moet prenten: Het transistor bestaat uit drie gebieden met de namen emitter, basis en collector. In deze gebieden bevinden zich verontreinigingen, welke de oorzaak zijn van bepaalde elektrische eigenschappen (verontreinigingen welke vrije positieve ladingen opleveren in het P-gebied en verontreinigingen die vrije negatieve ladingen opleveren in het N-gebied). In het midden bevindt zich de basis.



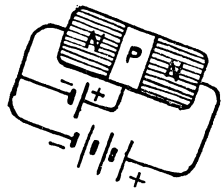
Er bestaan derhalve twee soorten transistoren, P-N-P en N-P-N. Het eerste type komt het meest voor, althans bij germaniumtransistoren (om fabricageredenen is het grootste deel van de siliciumtransistoren van het N-P-N-type).

Bij P-N-P-transistoren moet de basis negatief worden ingesteld ten opzichte van de emitter en de collector moet nog negatiever zijn dan de basis.

Bij N-P-N-transistoren moet de basis positiever zijn dan de emissor en de collector nog positiever dan de basis.

Uit het bovenstaande volgt, dat bij beide typen transistoren de voedingsspanningen

zodanig aangelegd moeten worden, dat de emitter-basis-overgang in doorlaatrichting staat.
De basisstroom is zeer gering (enige μA). De collectorstroom is veel groter (mA).
Een geringe basisstroomverandering bewerkstelligt een grote collectorstroomverandering. De verhouding van deze verandering tot de bijbehorende basisstroomverandering wordt stroomversterking genoemd.
De ingangsweerstand van een transistor (gemeten tussen basis en emitter) is betrekkelijk laag. Het op de ingang gezette wisselspanningssignaal moet dus een zeker vermogen opleveren.
De uitgangsweerstand van een transistor (tussen collector en emitter) is hoog.
Een variatie van de spanning tussen basis en emitter levert een verandering van de basisstroom op; deze veroorzaakt weer een veel sterkere verandering van de collectorstroom. Indien een belastingweerstand in de collectorketen wordt opgenomen, ontstaat hierdoor een versterkte spanningsvariatie.
Dat is, mijn beste Vraagal, een korte samenvatting van de belangrijkste punten die we hebben besproken.



Je vriend Weetal.

VIJFDE PRAATJE

HET EEN EN ANDER OVER DE FABRICAGE

Het is wel zeker, dat Vraagal zelf nooit transistoren zal behoeven te maken. Dat belet hem echter niet, veel belangstelling te hebben voor de vervaardiging van transistoren. Opgemerkt moet worden, dat hierbij heel bijzondere fabricage-methoden te pas komen. Al pratende merkt Vraagal dat er verscheidene typen bestaan, ieder speciaal geschikt om in bepaalde functies betere prestaties te leveren. Dit geldt bijvoorbeeld ook voor de problemen, welke moesten worden opgelost om het werken op steeds hogere frequenties en met steeds grotere vermogens mogelijk te maken. De ingenieurs waren genoodzaakt hiervoor geheel nieuwe oplossingen te bedenken.

Samenvatting: Zuivering door middel van zonesmelten. — Radiofrequente verwarming. — Het trekken van éénkristal. — Het zagen ervan. — Getrokken transistoren. — Legeringstransistoren. — Problemen bij het vervaardigen van vermogenstransistoren. — Het toepassen van diffusie — Looptijd — De rol van de emitter-collector-capaciteit. — Tetrodetransistor. — Oppervlaktekeerlaagtransistoren. — Dubbele-diffusiemethode. — Drifttransistoren. — P-N-P-transistoren. — Mesatransistoren. — Transistoren met veldeffect.

Het zuiveren van het uitgangsmateriaal

Vraagal. — Je weet wel, Weetal, dat ik nooit geprobeerd heb zelf radiobuizen te maken. De noodzaak een vacuüm in een ballon op te wekken heeft voor mij altijd een onoverkomelijk beletsel gevormd, want mijn fietspomp leek mij daar geen geschikt gereedschap voor... Maar ik geloof nu, dat ik best een paar transistoren voor eigen gebruik zou kunnen maken. Denk je dat ik bij de apotheek de benodigde grondstoffen kan krijgen: zuiver germanium, antimoon voor het N-gebied en indium voor het P-gebied?

Weetal. — Ik heb met je te doen; meen je dat ernstig?

Vr. — Natuurlijk. Is het dan zo moeilijk?

W. — Je weet niet hoe.... Om te beginnen moet je het germanium in voldoende mate van verontreinigingen ontdoen, want het materiaal dat als zuiver germanium in de handel is, is voor ons doel nog lang niet bruikbaar. Daarna moet je het germanium in een regelmatige kristalstructuur brengen door er één groot kristal, een zogenaamd éénkristal, van te maken. Dan moet je de verontreinigingen van het P- en het N-type in het materiaal brengen, waarbij de beide overgangen ontstaan tussen de drie gebieden van de transistor. Tenslotte moet je draadjes aan deze gebieden bevestigen, en het geheel stevig monteren in een goed gesloten buisje dat de transistor beschermt. Alleen grote fabrieken, welke over de daartoe benodigde speciale apparaten beschikken, slagen erin al deze werkzaamheden zonder fouten uit te voeren.

Vr. — Je ontneemt me mijn laatste hoop. Is het dan werkelijk zo moeilijk germanium te reinigen?

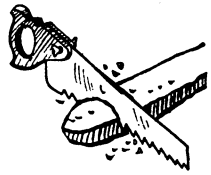
W. — Vergeet niet, dat we germanium nodig hebben dat werkelijk zuiver is, waar op een miljard atomen niet meer dan tien atomen van een verontreiniging voorkomen. In sommige gevallen is dit aantal zelfs al teveel.

Vr. — Ik denk dat men de scheikunde te hulp roept om het germanium van vreemde smetten te ontdoen.

W. — De scheikunde doet al genoeg zijn best. Maar daarmee zijn we er nog niet. Daarom neemt men tenslotte zijn toevlucht tot een natuurkundig procédé, dat zonesmelten wordt genoemd, waarbij van elektronische middelen gebruik wordt gemaakt. Men doet het te reinigen germanium in een langgerekte, uiterst goed schoongemaakte smeltkroes van kwarts of grafiet en men laat met radiofrequente verhitting een dun laagje germanium smelten. Om oxydatie door de zuurstof uit de lucht tegen te gaan, maakt men gebruik van waterstof of stikstof. De gesmolten zone wordt in langzaam tempo van het ene naar het andere uiteinde van de smeltkroes geschoven.

Vr. — Ik denk dat op die manier de verontreinigingen wegbranden.

W. — Je vergist je. Deze bereidingswijze berust op het feit, dat de verontreinigingen er naar streven in het gesmolten gebied achter te blijven, en zo worden verwijderd uit het gedeelte van het germanium dat aan het afkoelen is en weer vast wordt. Op deze wijze kunnen de verontreinigingen langzaam maar zeker van het ene uiteinde van het blokje germanium naar het andere overgaan. Deze bewerking wordt verscheidene malen herhaald en tenslotte wordt het stukje germanium, waar alle verontreinigingen naar toe zijn geveegd, afgezaagd.



Vr. — Gooit men dat weg?

W. — Nee, want germanium is heel duur. Dat stukje gebruikt men opnieuw samen met nog niet gereinigd germanium.

Vr. — Ik geloof, dat we gisteren bij Gora ook dat zonesmelten hebben toegepast...

W. — Wie is Gora en wat voor onzin ga je me nu weer vertellen?

Vr. — Gora is onze poes (we noemen haar zo omdat ze 50 procent Angorabloed heeft). Over het algemeen is ze erg zindelijk, maar ze moet een paar keer onguur bezoek gehad hebben, waarbij ze vlooien opgelopen heeft. Door verscheidene malen een kam van haar kop naar haar staart te strijken, hebben we haar weer van haar verontreinigingen verlost... Maar hoe bereikt men bij germanium dit kammen? Ik bedoel op wat voor manier bereikt men, dat er slechts een nauw gebied tegelijk smelt?

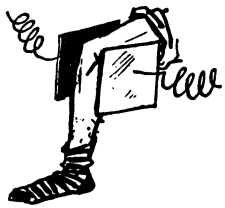
Radiofrequentverhitting

W. — Dat doet men door inductieve radiofrequentverhitting toe te passen. Om de te smelten zone is een spoel van enkele windingen aangebracht. Hierdoor loopt een sterke radiofrequente stroom, waardoor in het germanium wervelstromen worden geïnduceerd, die het zo sterk verwarmen dat het smelt.

Vr. — Maar dat is precies wat ze bij oom Jules hebben gedaan.

W. — Wat heeft je oom er mee te maken? Heeft hij soms ook last van vlooien gehad?

Vr. — Nee, maar hij heeft een waterknie gehad tengevolge van een ongelukkige val. Daarom wordt hij nu ook met radiofrequente diathermie behandeld.



W. — Ja, dat snap ik. Zijn knie wordt tussen twee goed geïsoleerde elektroden geplaatst, waartussen radiofrequente wisselspanning wordt aangelegd. Het zo opgewekte elektrische veld levert warmte door de diëlektrische verliezen binnen in het zieke lichaamsdeel. Maar bij de inductieve verwarming die voor zonesmelten wordt gebruikt, gaat het om het magnetische veld, dat wordt opgewekt door de toegevoerde wisselstroom, waardoor wervelstromen in het halfgeleidermateriaal ontstaan. Je moet goed onthouden, dat bij radiofrequente verhitting, of het nu gaat om elektrische velden (gebruikt bij isolatiematerialen) of om magnetische velden (gebruikt voor het ver-

warmen van geleiders), de warmte steeds *door het gehele lichaam* wordt ontwikkeld en dus niet door warmtegeleiding van buiten naar binnen moet doordringen, zoals het klassieke voorschrift luidt voor het roosteren van een goed stuk vlees . . .

Vr. — Om weer op het germanium terug te komen, uit je verhaal begrijp ik dat de spoel langzaam van de ene kant van het smeltschuitje naar de andere loopt . . .

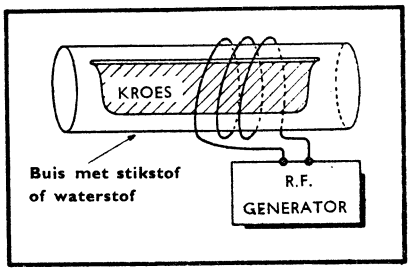
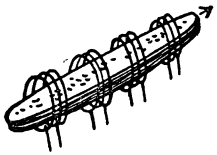


Fig. 34. Om een bepaalde zone van het germanium te laten smelten, wordt de smeltkroes langzaam door een radiofrequente verhittingsspoel getrokken.

W. — . . . voor zover het niet het schuitje is dat langzaam door de as van een vast opgestelde spoel loopt, waarmee overigens hetzelfde resultaat wordt bereikt. In werkelijkheid zet men een aantal spoelen op afstand, om op die manier in één trek een aantal gesmolten zones te verkrijgen, afgewisseld door stollingsgebieden. Dit geeft hetzelfde effect, alsof een enkele smeltingszone enige malen door de smeltkroes zou worden getrokken. Ik moet er bij vertellen, dat de beweging heel langzaam verloopt: 1 mm per minuut.

Vr. — En hoe doet men dat bij silicium?

W. — Net zo, maar bij een hogere temperatuur, want terwijl germanium al bij 940 °C smelt, is voor silicium 1420 °C nodig.

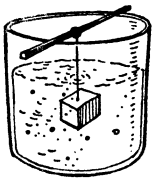


Na het zuiveren volgt het kristalliseren

Vr. — Waarom kan men het halfgeleidermateriaal dat op boven beschreven wijze gereinigd is, niet direct gebruiken voor de transistorfabricage? Is het niet uitgekristalliseerd?

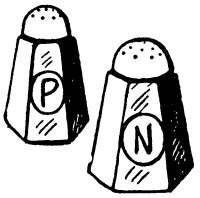
W. — Dat is het wel, maar niet op de manier die wij willen. Het bestaat namelijk uit een verzameling ongeordende kristallen. Anders gezegd, we wensen een volmaakt regelmatige kristalstructuur, waarvan we tevens de kristalassen kennen. Een dergelijke structuur verkrijgen we door om een klein entkristalletje een enkel groot kristal te laten groeien. Men noemt dit een éénkristal.

Vr. — Ik heb me wel eens vermaakt door mooie kristallen te laten groeien met behulp van in een glas water opgelost keukenzout, waar ik een draadje in hing met aan het eind een klein zoutkristalletje. Binnen een uur of acht vormde zich hierom een mooie doorschijnende kubus. Doet men dat bij halfgeleiders op dezelfde manier?



W. — Men past hetzelfde principe toe. Maar in plaats van een oplossing gebruikt men het materiaal in gesmolten toestand. Het entkristal wordt hierin gedompeld, bevestigd op het uiteinde van een staaf. Deze wordt langzaam rondgedraaid en tegelijk heel langzaam opgetrokken. Zodoende beginnen germanium- (of silicium-) atomen zich om het entkristal te rangschikken volgens de kristalstructuur. Het materiaal gaat in vaste vorm over om dit entkristal. En tenslotte verkrijgt men binnen enige uren een staaf van verscheidene cm diameter met een lengte van 20 tot 30 cm met een gewicht van enige kg. Hieruit kunnen duizenden transistoren worden gemaakt.

Vr. — Als ik het goed begrijp, is dat éénkristal een zeer zuivere halfgeleider?
W. — Nee. Ik heb vergeten je te vertellen, dat aan het gesmolten materiaal waar het éénkristal uit getrokken wordt, verontreinigingen worden toegevoegd van P- of N-materiaal al naar gelang de basis uit een van beide moet bestaan. Want de basis behoudt in de meeste gevallen na het uiteindelijke fabricageproces de oorspronkelijke eigenschappen van het uitgangsmateriaal.



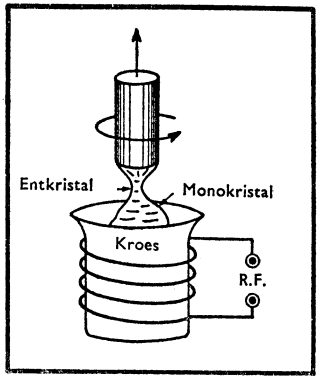


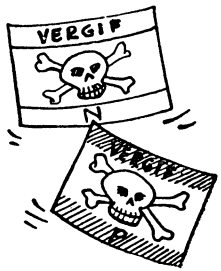
Fig. 35. Het trekken van een éénkristal. In de kroes bevindt zich germanium, dat met behulp van inductieve verhitting tot smelten gebracht wordt.

En nu naar de mechanische werkplaats

Vr. — Je zei zo net dat uit een enkel éénkristal duizenden transistoren gemaakt worden. Moet ik aannemen dat men het in kleine plakjes hakt?
W. — Dat heb je goed gesnapt. Men begint met het op de manier van een doodgewone slager in min of meer dikke plakken te snijden (dikte 0,1 à 2 mm). Dat precisiewerk gebeurt met cirkelzagen met diamanten tanden. Ook worden wel lintzagen gebruikt, bestaande uit een wolframdraad bedekt met slijpmiddel. Hierna wordt ieder plakje weer in kleine vierkantjes gesneden met een zijde van slechts enige mm. Een dergelijk plakje van 2×2 mm met een dikte van 0,5 mm weegt slechts 0,01 gram. Dat wil zeggen, dat uit een éénkristal van 5 kg theoretisch een half miljoen blokjes gezaagd zouden kunnen worden. In werkelijkheid gaat er bij de fabricage heel wat verloren, zodat er uiteindelijk heel wat minder blokjes overblijven.

Gif en tegengif

Vr. — Het is toch nog niet zo gek, al zou er maar de helft overblijven . . . Maar wat moet men verder doen om van die blokjes echte transistoren te maken?
W. — De twee uiteinden vergiftigen met verontreinigingen van materiaal van tegengestelde aard als het schijfje. Als dat bijvoorbeeld uit N-materiaal bestaat, worden verontreinigingen van P-materiaal aan twee kanten ingebracht om zodoende de emitter en de collector van een P-N-P-transistor te vormen.
Vr. — Ik heb een idee, Weetal. Waarom zou je geen kant-en-klare transistoren kunnen maken tijdens het trekken van het éénkristal. Men zou bijvoorbeeld bij het begin van het trekken in het gesmolten halfgeleidermateriaal verontreinigingen van het P-type kunnen gooien, bijvoorbeeld indium. Als daarna op deze wijze een P-gebied was gevormd, zou men er verontreinigingen van N-materiaal in kunnen werpen, bijvoorbeeld van arseen. Dat zou een N-gebied opleveren. Daarop zou men weer voldoende indium moeten toevoegen om de acceptoren tot meerderheidsladingdragers te



laten worden, wat ons weer een nieuwe P-laag zou opleveren, enz. Uiteindelijk zouden we een staaf germanium verkrijgen met afwisselend P- en N-lagen. Men zou kunnen volstaan met deze staaf in het midden van de P-lagen door te snijden om er P-N-P-transistoren uit te maken of in het midden van de N-gebieden om er N-P-N-transistoren van te maken. Zeg maar eerlijk, Weetal, dat ik soms op geniale ideeën kom!
W. — Wat ik het meest in je bewonder, is je bescheidenheid . . . Jammer genoeg, mijn vriend, is je idee niet nieuw. Men noemt dat het maken van *getrokken transistoren.* De methode is niet zuinig, want zo verkregen lagen zijn nogal dik. Bovendien wordt, als iedere keer verontreinigingen worden toegevoegd van de ene en dan weer van de andere soort, het verontreinigingsgehalte steeds hoger in de achtereenvolgens gevormde gebieden, hetgeen bezwaren oplevert. Desalniettemin wordt deze methode met getrokken overgangen tegenwoordig nog steeds gebruikt, vooral bij silicium.
Vr. — Ik constateer weer eens, dat ik te laat geboren ben . . . Laten we dan maar terugkeren naar die kleine plakjes en vertel me maar eens hoe men daarbij de emitter en de collector vormt.

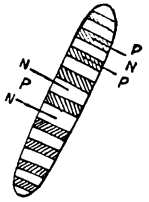
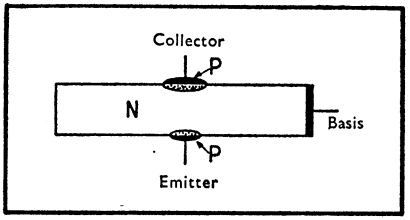
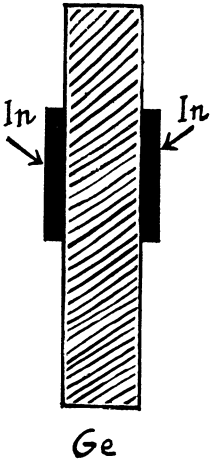


Fig. 36. Doorsnede van een P-N-P-legeringstransistor.

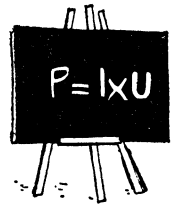


Legeringstransistoren



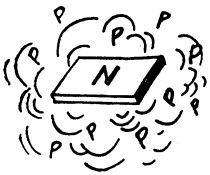
W. — Hiertoe worden verschillende methoden gebruikt, al naar de vorm van de transistor die men wenst te verkrijgen. Het gaat er vooral om, het basismateriaal in zodanige mate met verontreinigingen te vergiftigen, dat het in het andere type overgaat (N in P of andersom). Het meest eenvoudige systeem, dat ook het meest gebruikt wordt, gaat uit van een basis van N-materiaal met aan beide uiteinden een schijfje indium, welke samenstelling snel tot circa 600 °C wordt verhit. Het indium smelt bij deze temperatuur en de atomen ervan treden het germanium binnen dat, hoewel het pas smelt bij 940 °C, toch door de bij deze temperatuur al sterke warmtebeweging meer geneigd is de verontreinigingsatomen op te nemen. Men verkrijgt zo een P-N-P-transistor. Let erop, dat de collectorpastille groter is dan die van de emitter, omdat zoals wij al besproken hebben het grootste vermogen in de collector moet worden gedissipeerd. Wanneer bij de fabricagetemperatuur en verwarmingsduur op de juiste wijze in de hand worden gehouden, gelukt het de verontreinigingen zo ver te laten binnentreden, dat de uiteindelijke diameter van het zuivere basismateriaal teruggebracht wordt tot 1/20 mm. Transistoren die op deze wijze door een *legeringsproces* zijn gevormd, kunnen voor bijna alle doeleinden worden toegepast, zolang het niet om hoge frequenties gaat.
Vr. — Ik geloof dat je al weer begint te praten over die beide punten die zo moeilijk zijn bij halfgeleiders, het bereiken van grote vermogen en hoge frequenties. Ik zou hierover toch nog wel graag wat meer willen horen.

Het germanium wordt in nevelen gehuld



W. — Laten we maar met het vermogen beginnen. Wie over een aantal watts praat, heeft het tegelijk over een aantal calorieën. Om voldoende vermogen aan te voeren bij de bij halfgeleiders gebruikelijke lage spanningen, moet de stroomsterkte groot zijn.
Vr. — Natuurlijk; want vermogen = spanning × stroomsterkte.
W. — Heel goed. En als de stroom door de transistor loopt wordt daarin warmte opgewekt. De meeste warmte ontstaat in de basis-collector-overgang, omdat hierover een vrij hoge spanning staat. En je weet hoe slecht halfgeleiders tegen hoge temperaturen kunnen.
Vr. — Wat kan daar volgens jou tegen worden gedaan?

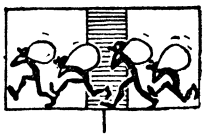
W. — Om te beginnen, het groter maken van de doorsnede van de halfgeleider, dat wil zeggen transistoren maken met een betrekkelijk grote doorsnee-oppervlakte, waardoor zij een lage weerstand krijgen. Vervolgens maken dat de warmte beter weg kan vloeien, door de collector op een groot stuk metaal te monteren dat als warmtestraler fungeert. Koper, dat een uitstekende warmtegeleider is, is hiervoor het aangewezen materiaal.
Vr. — Dat wil zeggen dat je de regels van de thermodynamica moet kennen om goed met transistoren te kunnen werken. Als dat waar is, wordt het tijd, dat ik me in die tak van wetenschap ga verdiepen!
W. — Wees maar gerust, Vraagal. Voor het berekenen van de voortplanting van de warmte kun je gebruik maken van de regels, die gelden voor stromen in elektrische stroomkringen; daarmee krijg je antwoorden die heel goed kloppen... Maar om op de vermogenstransistoren terug te komen, wil ik je er op wijzen, dat ze heel dikwijls gemaakt zijn volgens de *diffusiemethode*. Men brengt de halfgeleiderplaatjes op een temperatuur, die dicht bij het smeltpunt ligt, in een omgeving van een gas, dat de verontreinigingen, welke de emitter en de collector moeten vormen, in dampvorm bevat. De verontreinigingsatomen treden hierbij geleidelijk het halfgeleidermateriaal binnen. Het hele proces duurt vele uren. Dat betekent, dat men, door het gehalte aan onzuiverheden van het gas en de diffusietijd te regelen, erin slaagt nauwkeurig de indringdiepte van de vreemde atomen te bepalen, waarmede tevens de basisdikte vastligt. Bovendien is dit fabricageprocédé heel goed bruikbaar voor het verkrijgen van de grote emitter- en collectoroppervlakten welke bij vermogenstransistoren nodig zijn.



Vr. — Dat komt dan goed uit. Maar wat belet het werken met transistoren bij hoge frequenties?

Twee hinderpalen

W. — Er zijn twee hinderpalen: de looptijd en de capaciteit.
Vr. — Over wat voor looptijd heb je het?
W. — De tijd, die de ladingdragers nodig hebben om door de basis van de emitter naar de collector te lopen. De tijd kan niet worden verwaarloosd, omdat, zoals ik je al heb gezegd, de elektronen en de gaten nogal langzaam van aard zijn. Laten we maar beginnen met de elektronen te bekijken welke slechts 40 m per seconde lopen. Zelfs al zou men erin slagen de basisdikte tot 0,1 mm terug te brengen, dan zou een elektron toch nog 2,5 microseconde nodig hebben om door deze laag te komen.



Vr. — Dat is niet erg veel.
W. — Wel niet veel, maar een signaal van 1 MHz (dat is 1 000 000 Hz) duurt dan veel te lang, want iedere periode hiervan duurt maar één microseconde, en terwijl dat logge elektron op zijn gemakje door de basis tippelt, had het al meer dan tweemaal

de andere kant op moeten lopen. Je ziet hieruit dus, dat zo'n transistor niet geschikt is stromen te versterken bij frequenties boven enige honderden kHz.
Vr. — Is dat even naar! Ik zie maar één uitweg: de basis nog dunner maken. Kan dat?

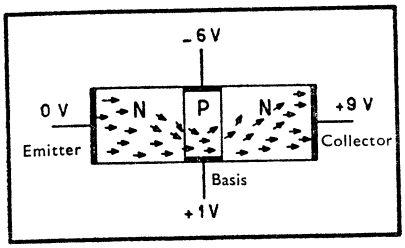
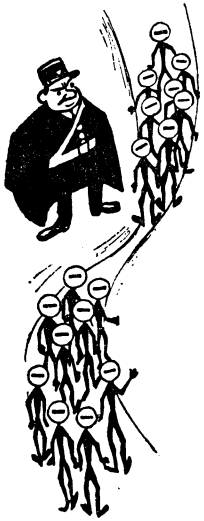


Fig. 37. Principe van een tetrodetransistor. De hulpelektrode wordt op −6 V gehouden, waardoor deze de elektronen afstoot in de richting van de basis, waarmede de werkzame basisdoorsnede sterk wordt verkleind.

W. — Ja dat kan, en ik zal je zeggen hoe. Maar dan moeten we meteen ook de nodige aandacht schenken aan de andere gevaarlijke factor: de capaciteit tussen emitter en collector. Want die maak je groter als je de basis dunner maakt.
Vr. — Wat voor last heb je van die capaciteit?
W. — Herinner je je dan niet meer, hoeveel narigheden parasitaire capaciteiten in buisschakelingen veroorzaken? Hier leveren ze dezelfde problemen op. De capacitantie (dat is de capacitieve reactantie) die ze voor wisselstroom opleveren, is evenredig lager met het toenemen van de frequentie. Daaruit volgt, dat radiofrequentstromen weglopen door de parasitaire capaciteiten in plaats van de weg te nemen die voor ze bestemd is.



Vr. — Het is dus alsof die capaciteiten hetzelfde effect opleveren als de mazen van een boodschappennet. Hierin kun je wel grote noten meenemen. Maar als je er doperwtjes in doet, lopen ze door de gaten... Hoe moeten we daar nu uit komen? Aan de ene kant maak je de basis dunner om de looptijd te verkleinen, waardoor de emitter-collectorcapaciteit toeneemt. Aan de andere kant moet ook die capaciteit zo laag mogelijk worden gehouden.

Een tetrode die geen echte tetrode is

W. — Ik laat het aan jou over om hiervoor een oplossing te bedenken. Laten we maar eens kijken, Vraagal, waarvan de capaciteit van een condensator nog meer afhankelijk is dan van elektrodenafstand.
Vr. — Ik ben er! Ja, de oppervlakte van de platen moet worden verkleind. Dat wil zeggen, dat om transistoren goed te laten werken bij hoge frequenties, de emitter en de collector slechts een zeer geringe oppervlakte mogen hebben.
W. — Inderdaad. Ik wil je er meteen op wijzen, dat er nog een middel bestaat om de werkzame capaciteit geringer te maken zonder dat daarvoor de oppervlakte van de overgangen al te klein behoeft te worden (waardoor het toe te laten vermogen te klein zou worden). Dit middel wordt toegepast in de *transistortetrode*. Ik vertel je er meteen bij, dat de werking hiervan geen enkele overeenkomst vertoont met die van de vacuümtetrode... Bij de transistortetrode is de vierde elektrode op de basis aangebracht aan de zijde tegenover de normale basisaansluiting. Deze elektrode krijgt een zodanige spanning t.o.v. de normale basisaansluiting, dat alleen het basisgedeelte, aan laatstgenoemde aansluiting grenzend, ladingdragers laat passeren. Op deze wijze wordt de werkzame doorsnede van de basis in belangrijke mate verkleind.

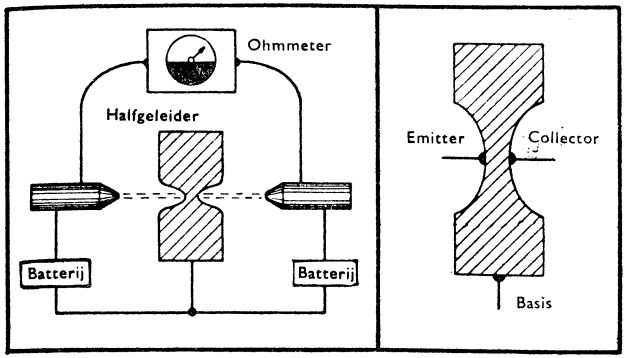


Fig. 38. Methode voor het fabriceren van oppervlaktekeerlaagtransistoren en dwarsdoorsnede door een dergelijke transistor.

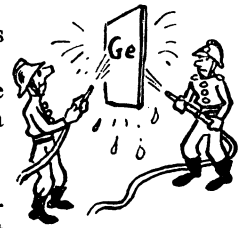
De basis ondergaat een vermageringskuur

Vr. — Ik vind het maar slim bekeken om op die manier de stroom elektronen of gaten samen te knijpen! Maar op wat voor manier ziet men er kans toe, in de traditioneel gebouwde transistoren de dikte van de basis te verkleinen?

W. — Hiertoe maakt men aan beide zijden van de basis een putje. De diepste punten hiervan komen zo ongeveer 0,002 mm van elkaar te liggen. Op de bodem wordt een weinig indium neergeslagen en het kunststuk is volbracht.

Vr. — Als ik je zo hoor, is het helemaal niet moeilijk. Maar ik twijfel eraan of er apparatuur te vinden is, waarmee zoiets nauwkeurig kan worden gemaakt.

W. — Men gebruikt daarvoor twee heel fijne vloeistofstralen, die tevens een gelijkstroom geleiden naar het germanium. En door de elektrolyse wordt het ene atoom na het andere uit het halfgeleidermateriaal verwijderd. Bij het einde van het proces wordt de stroomrichting omgedraaid, waarbij de elektrolyse indiumatomen neerslaat in de zojuist gevormde putten.



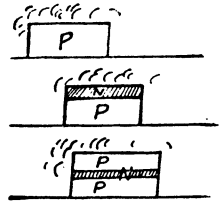
Vr. — Dat is geweldig! Maar hoe weet men precies het ogenblik waarop de basis voldoende dun is?

W. — Door de elektrische weerstand tussen de twee vloeistofstralen te meten. De transistoren welke op deze wijze zijn gemaakt, kunnen nog worden gebruikt tot circa 100 MHz. Men noemt deze transistoren oppervlaktekeerlaag-transistoren.

Vr. — In elk geval hebben die hoge frequenties geen last van die keerlaag!

W. — Een andere manier om de dikte van de basis te reduceren is de dubbele-diffusiemethode. Om een transistor van het P-N-P-type te maken, begint men met een plaatje van P-halfgeleidermateriaal . . .

Vr. — Ik geloof dat je je vergist, Weetal.



W. — Heus niet. Let maar op, wat er gebeurt. Men stelt slechts één zijde van het plaatje bloot aan de werking van stoffen in dampvorm. Deze damp bevat twee soorten verontreinigingen tegelijk, waarvan de een als donor en de ander als acceptor werkt. Men zorgt ervoor, dat zodanige materialen worden gekozen, dat de indringsnelheid van het donormateriaal iets groter is dan die van het acceptormateriaal, terwijl van het laatste materiaal een overmaat wordt genomen. Aan de bovenzijde van het blokje P-materiaal ontstaat nu een dunne N-laag met er bovenop een dikkere P-laag. Op die manier verkrijgen we weer een P-N-P-transistor, waarvan de basis slechts 0,001 mm dik is, zodat deze transistor nog bij frequenties tot 400 MHz gebruikt kan worden.

Vr. — Dat vind ik echt slim bedacht.

W. — Een zeker even slim idee is de drifttransistor van het N-P-N-type, waarin de het dichtst bij de collector liggende zijde van de basis een groter percentage verontreinigingen (acceptoren in dit geval) bevat dan de andere zijde. Door het hierdoor ontstane driftveld worden de elektronen die in het basisgebied binnendringen, aanzienlijk versneld, waarmee de hoogst bereikbare frequentie tot 1000 MHz opgeschoven wordt.

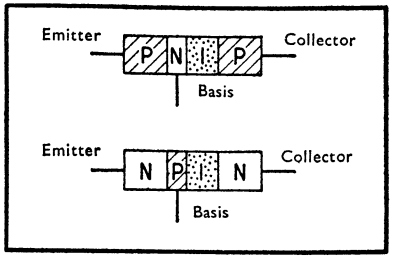


Fig. 39. Twee typen transistoren, waarin een extra laag intrinsiek germanium tussen basis en collector is aangebracht. Op deze wijze ontstaan de P-N-I-P- en de N-P-I-N-transistor.

Vr. — Het gaat al maar beter! Zou het niet in de lijn van de ontwikkeling liggen, de capaciteit tussen emitter en collector te verkleinen door deze beide elektroden op grotere afstand te plaatsen zonder tegelijkertijd de basisdikte te laten toenemen?

Afstand tussen basis en collector

W. — Wat voor middel wilde je daartoe aanbevelen?

Vr. — Ik zou het niet gek vinden als het mogelijk was tussen basis en collector een neutraal laagje germanium aan te brengen, dus geen P- of N-germanium, maar een soort germanium dat wel de geleidingsstroom door zou kunnen laten en tegelijkertijd zorgen voor de nodige afstand tussen basis en collector.

W. — Maar dat is lang geen gek idee, mijn vriend. En het bestaat al onder de naam van P-N-I-P-transistor, waar de letter I het laagje intrinsiek germanium voorstelt.

Vr. — Wel verdraaid! Ze zijn me weer eens te vlug af geweest!

Er komen bergen aan te pas

W. — Je hebt pech gehad, Vraagal... En tot slot vestig ik je aandacht op nog een ander voor hoge frequenties geschikt type transistor, eveneens vervaardigd onder toepassing van dubbele diffusie. Men gaat uit van een stukje P-materiaal dat als collector moet dienen en hierop wordt door diffusie een dun laagje verontreinigingen aangebracht van N-materiaal, dat de basis moet vormen. Tenslotte laat men eveneens aan dezelfde kant P-materiaal diffunderen, waardoor de dikte van de basis weer verkleind wordt tot circa 0,002 mm. Het laatste laagje wordt de emitter. De handigheid bestaat hierin, het laatste diffusieproces door een masker te laten plaatsvinden, op zodanige wijze dat het slechts langs smalle stroken op het oppervlak van het schijfje plaatsvindt. Op dit oppervlak komen dan afwisselend strookjes P-(emitter) en strookjes N-materiaal (basis) voor. Hierna laat men op dit materiaal druppels was vallen, op zodanige plaatsen dat ze tegelijk een stukje P- en een stukje N-materiaal bedekken. De diameter van de druppels is niet groter dan 0,25 mm. Het schijfje wordt hierna in een oplossing gedompeld, die etsend werkt op de niet met was bedekte gedeelten. Na dit chemische etsproces zijn dus op het oppervlak kleine ronde verhogingen aanwezig, die na het verwijderen van de was kunnen worden voorzien van een basis- en een emitteraansluiting. Dit gebeurt met gouddraad van 0,025 mm diameter.

Vr. — Hoe zien ze kans dergelijk fijn draad te bevestigen?
W. — Onder een binoculaire microscoop. Maar voordat dit gebeurt, wordt het bewerkte plaatje in evenveel stukjes gezaagd als er bergjes op staan, waarbij ieder stukje een transistor oplevert. Men noemt deze bergjes „mesa", naar de naam die in Zuid-Amerika gegeven wordt aan bergplateaus met rechte kanten. De mesatransistoren werken nog braaf bij frequenties boven 100 MHz, dat wil zeggen bij golflengten onder de 3 m.
Vr. — Wat een zorg en nauwkeurigheid vereist de fabricage van zulke microscopische gebergten!

De afwerking

W. — Je moet vooral niet denken, Vraagal, dat een transistor klaar is wanneer emitter, basis en collector gevormd zijn door legering, elektrolyse of diffusie. Onthoud meteen, dat deze drie fabricagemethoden gebruik maken van chemische stoffen in vaste, vloeibare of gasvormige toestand.
Vr. — Wat moet er dan nog gebeuren om een transistor toe te rusten voor de wisselvalligheden van het leven?
W. — Het oppervlak moet nog worden schoongespoeld in een zure oplossing en er moeten nog maatregelen worden genomen om de enorm lange levensduur van de transistor ook in de praktijk te realiseren. Daartoe moet hij zo stevig in een doosje

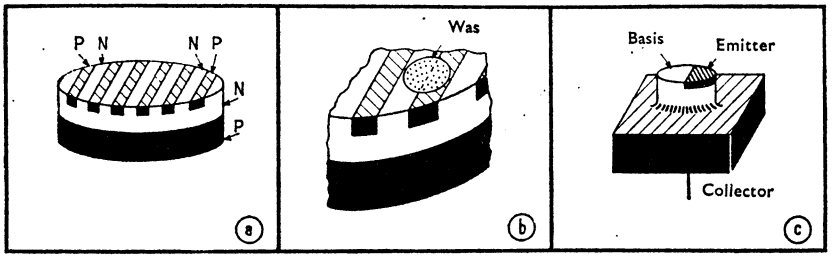


Fig. 40. Opeenvolgende fasen bij het vervaardigen van een mesatransistor.

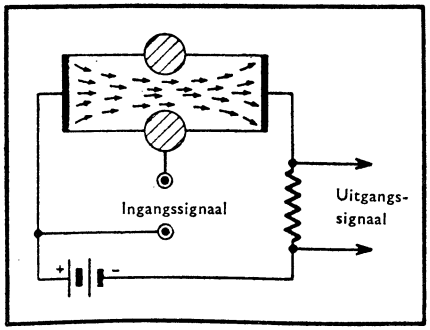


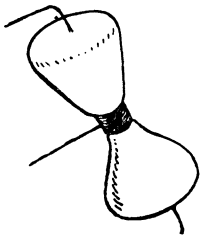
Fig. 41. Veldeffect-transistor.

worden gemonteerd dat hij tegen stoten en trillingen kan. Het doosje moet geheel gesloten en lichtdicht zijn, om de transistor tegen vocht (eeuwige vijand van alle halfgeleiders) en tegen licht te beschermen.
Vr. — Waarom dat laatste?
W. — Omdat zoals ik je al heb gezegd, lichtstralen de geleidbaarheid van halfgeleiders

kunnen veranderen of gaten en elektronen vrij kunnen maken. Deze verschijnselen worden met voordeel gebruikt in fotodioden en fototransistoren. Maar gewone transistoren moeten tegen licht worden beschut. Zij moeten dus worden opgeborgen in een plastic of metalen doosje, dat geëvacueerd is of gevuld met een inert gas, zoals stikstof. Het aanbrengen van de verbindingsdraden vormt dikwijls een lastig probleem, want de overgangsweerstanden moeten zuivere ohmsche weerstanden zijn, waarbij tot iedere prijs het ontstaan van ongewenste halfgeleidende overgangen moet worden voorkomen.

Vr. — Ik zie dat er, als je het goed bekijkt, kennis nodig is van natuurkunde, scheikunde en mechanische technologie om transistoren te kunnen fabriceren. Dat is geen klein beetje. Ik geloof dat ik ze maar liever in de winkel koop. Als tenminste niet . . .

We gaan het veld in



W. — Met wat voor een mal idee kom je nu weer aanzetten?

Vr. — Ik geloof, dat er een mogelijkheid zou bestaan transistoren te fabriceren zonder basis, emitter of collector. Waarom zouden ze niet eenvoudig een staafje germanium of silicium en leggen hierom in het midden een ringetje waarop het te versterken signaal wordt gezet. Het daardoor opgewekte elektrische veld zou de stroom ladingdragers die van het ene uiteinde naar het andere loopt, meer of minder kunnen afknijpen. En de stroom zou op deze wijze worden gemoduleerd, precies zoals dat in een vacuümtriode onder invloed van de roosterpotentiaal gebeurt.

W. — Vraagal, ik heb medelijden met je . . .

Vr. — Klopt er iets niet in mijn redenering?

W. — Die klopt zo goed, dat het ding dat je zojuist hebt uitgevonden, al lang bestaat. Men noemt dat een *veldeffecttransistor* of draadtransistor. Men zou hierbij ook kunnen denken aan het *tecnetron,* dat door de Franse ingenieur S. Tezner is uitgevonden en dat alle voordelen van transistoren en vacuümbuizen in zich verenigt. Maar ik vraag me af, in hoeverre dergelijke bijzondere onderdelen nog tot de familie van de transistoren kunnen worden gerekend . . .

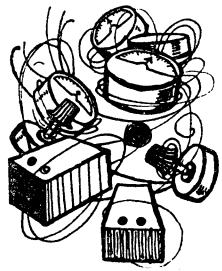
ZESDE PRAATJE

GRAFIEKEN EN NOG EENS GRAFIEKEN

Om de kristaltrioden te kunnen gebruiken, is kennis nodig van hun karakteristieke eigenschappen. Deze kunnen, evenals bij buizen, zowel door de numerieke waarden van de fundamentele parameters worden uitgedrukt, als door grafische voorstellingen waaruit kan worden afgelezen hoe bepaalde waarden afhangen van de andere grootheden. Nu levert de toepassing van grafieken bij transistoren een aantal voordelen op, omdat hierin de invloed, die iedere variabele uitoefent op het grootste deel van de andere variabelen, duidelijk tot uiting komt.
Om deze voordelen zullen onze beide vrienden de moeite nemen zich te verdiepen in de verschillende karakteristieke grootheden van de transistoren, zowel in getalvorm als in grafische voorstelling.

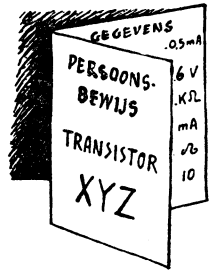
Samenvatting: Schakeling voor het opnemen van karakteristieken. — $I_b = f(U_b)$-krommen en $I_c = f(U_b)$-krommen. — Steilheid. — Stroomversterking. — Ingangsweerstand. — Verband tussen steilheid, inwendige weerstand en stroomversterking. — Verzadiging. — Karakteristieken. — Overeenkomst met de pentode. — Maximaal toegestaan vermogen. — Uitgangsweerstand. — Het aflezen van de parameters uit de karakteristieken.

Vraagal heeft een plan



Weetal. — Wel sapperloot, wat zie ik nu? Wat ben je van plan met die ongelofelijke berg meetinstrumenten, batterijen en potentiometers op je tafel?
Vraagal — Ik zie al, dat je het belangrijkste ding nog niet hebt gezien. En daar kan ik in komen. Want tussen als die voltmeters en milliampèremeters van mij, valt die transistor bijna niet op. En toch is het daarom te doen.
W. — Maar waar zijn al die apparaten voor?
Vr. — Je herinnert je, hoe we kortgeleden samen nog eens de karakteristieken van de elektronenbuizen bespraken: de anodestroomvariaties als functie van de roosterspanning of van de anodespanning? Welnu, ik zou net zulke karakteristieken van mijn transistor willen opnemen.
W. — Dat vind ik een goed idee. Maar hoe denk je dat uit te voeren?
Vr. — Ja dat valt moeilijk te zeggen ... Ik wil geen ontwijkend antwoord geven, maar waar ik mee zit, is dat terwijl het bij buizen om slechts drie grootheden ging, er bij transistoren vier factoren in het spel zijn.

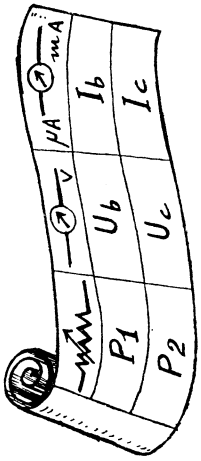
Elektronenbuis		Transistor	
Anodestroom	I_a	Collectorstroom	I_c
Anode-kathodespanning	U_a	Collector-emitterspanning	U_c
Rooster-kathodespanning	U_g	Basis-emitterspanning	U_b
		Basisstroom	I_b



W. — Dat is inderdaad waar. Enkele uitzonderingen daargelaten, werken elektronenbuizen namelijk zonder roosterstroom. Maar bij het werken met transistoren speelt de basisstroom juist een heel belangrijke rol.

Een heel goed schema

Vr. — Hier zie je het schema, dat ik bedacht heb om die vier grootheden op te nemen.
W. — Ik zie een potentiometer P , waarmee je de spanning tussen basis en emitter op iedere gewenste waarde in kunt stellen, terwijl je die spanning kunt meten met de voltmeter E_b. Aan de andere kant heb je een potentiometer P_2, die dient om de



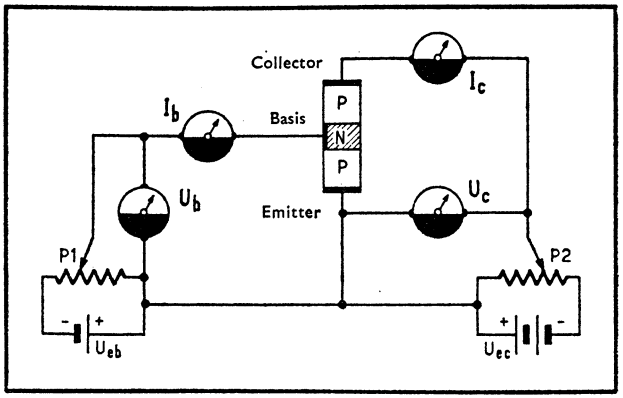


Fig. 42. Schakeling voor het opnemen van transistorkarakteristieken.

spanning tussen collector en emitter te variëren, welke spanning gemeten wordt met de voltmeter U_c. De basisstroom laat je aanwijzen door de µA meter I_b terwijl de collectorstroom gemeten wordt met behulp van de mA meter I_c. Gefeliciteerd, Vraagal, met jouw schema valt best te werken! Waarover maak je je dan nog zorgen?
Vr. — Ik geloof dat ik zelf het slachtoffer ben geworden van de poets, die ik als klein jochie onze brave keukenprinses Mina gebakken heb.
W. — Wat heeft dat slachtoffer van je al jong optredende plaagzucht te maken met het gebied van de halfgeleiders?

Vr. — Op een avond had ik alle pannen met een dun draadje aan elkaar gebonden, zodat toen Mina één pan wilde pakken, al het keukengereedschap over haar hoofd stortte.
W. — Dat pleit voor je fantasie... maar niet voor je goede smaak. Maar ik zie nog altijd niet in...
Vr. — Dat is toch duidelijk. Ik zie de wijzers van mijn instrumenten als met onzichtbare draadjes aan elkaar gekoppeld, net als de pannen van Mina. Als één van die wijzers in beweging komt, moeten er steeds twee andere meelopen. Wanneer ik

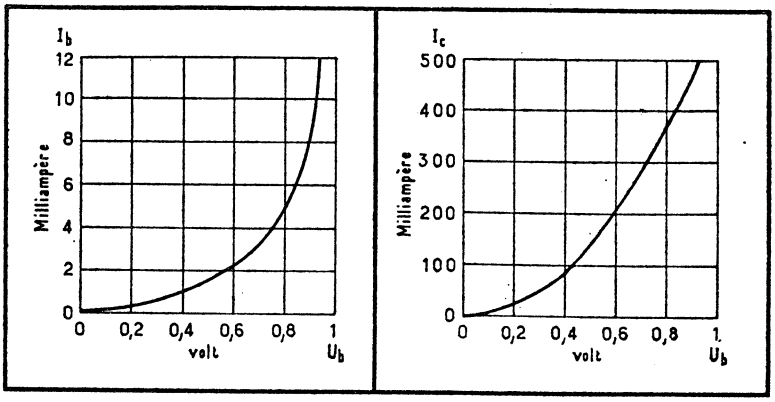
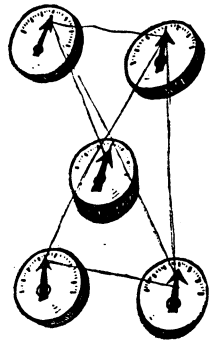


Fig. 43. Basisstroom I_b als functie van de basis-emitterspanning U_b. Hier wordt evenals bij alle volgende karakteristieken niet nader aangegeven wat de polariteit is van de spanningen en stromen. Bij N-P-N-transistoren geldt de positieve polariteit en bij P-N-P-transistoren de negatieve.

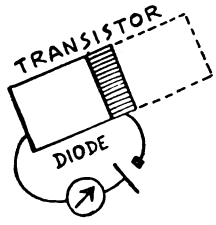
Fig. 44. Variatie van de collectorstroom I_c als functie van de basis-emitterspanning U_b. (Deze grafieken zijn aan een transistor van middelgroot vermogen opgenomen; de collectorspanning is daarbij constant gehouden.)



bijvoorbeeld met de potentiometer P_1 de basisspanning E_b verander, verandert hierdoor ook de basisstroom I_b en tegelijkertijd de collectorstroom I_c.

De eerste twee grafieken

W. — Vind je dat niet heel gewoon? Wat jij zo duidelijk te zien krijgt, is juist het principe van de transistorwerking. Wanneer je tussen basis en emitter een toenemende spanning zet, verhoog je de sterkte van de stroom die van de emitter naar basis loopt en daardoor vergroot je tevens de stroom die van de emitter door de basis naar de collector loopt.



Vr. — Oké. Dat komt helemaal overeen met de werking van het rooster van een vacuümbuis op de anodestroom. Overigens heb ik hier de twee grafieken, die ik opgenomen heb door de basisspanning U_b met P_1 steeds op een andere waarde in te stellen en bij iedere waarde van U_b zowel de stroomsterkte I_b als de stroomsterkte I_c op te schrijven.

W. — Dat heb je goed gedaan, Vraagal. Ik zie dat het geen kleine transistor is, want de collectorstroom bereikt hier de respectabele grootte van een halve ampère . . ! Die eerste grafiek van je, waarvoor je alleen maar hebt gemeten tussen emitter en basis en waarin je de basisstroom zag toenemen als functie van de basis-emitter-spanning is niets anders dan de karakteristiek van de diode, gevormd door de emitter en de basis.

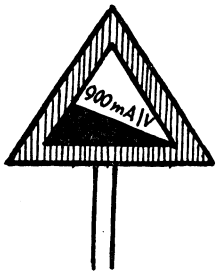
Vr. — Dat is zo! Ik zie uit die grafiek, dat de stroom in het begin langzaam aangroeit om daarna steeds steiler te stijgen. Ik geloof niet dat dit een erg interessante grafiek is. Maar die andere, waarop je kunt zien hoe de collectorstroom toeneemt met de basisspanning, lijkt me veel belangrijker.

Vraagal waagt zich op een gevaarlijk steile helling

W. — Laten we niet te hard van stapel lopen, mijn vriend. Die andere grafiek is heus heel leerzaam. Juist uit deze grafiek kun je aflezen, dat de *steilheid* van een transistor lang geen constante grootheid is, maar van de basisspanning afhangt.
Vr. — Hè? Wordt bij transistoren ook over steilheid gesproken? Bij buizen is dat de verhouding van een kleine verandering van de anodestroom tot de kleine roosterspanningsverandering, die er de oorzaak van is.
W. — Welnu, hier kunnen wij de steilheid net zo definiëren als de verhouding van een kleine verandering ΔI_c van de collectorstroom tot de kleine verandering ΔU_b van de basisspanning die deze stroomverandering heeft teweeg gebracht. Wanneer je de steilheid met S aangeeft, volgt hieruit:

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_b}$$

en dit wordt evenals bij buizen in mA per V uitgedrukt.



Vr. — Ik zie, dat de helling van mijn transistor flink toeneemt bij hogere waarden van de basisspanning. Tussen 0,2 en 0,4 V neemt de stroom maar 50 mA toe, terwijl bij een toename van de basisspanning van 0,6 tot 0,8 V de stroom met circa 180 mA toeneemt. De steilheid is in het eerste geval 50 : (0,4—0,2) = 250 mA/V en in het tweede 180 : (0,8—0,6) = 900 mA/V. Dat is geweldig steil! Er is nog nooit een buis geweest, waarmee je dergelijke steilheden kon bereiken.
W. — Leid daar nu niet te snel uit af, dat de transistor ook een geweldige versterking kan geven. De rol van de steilheid is hier tamelijk onbetekenend, want waar het per slot van rekening om gaat, is de invloed van de basisstroom op de collectorstroom.

Let op! Maximaal toegestaan vermogen

Vr. — Om dat duidelijk te maken, heb ik de collectorstroom I_c uitgezet als functie van de basisstroom I_b voor twee waarden van de collectorspanning U_c namelijk voor 2 V en 10 V.
W. — En waarom heb je van die laatste kromme een groot stuk gestippeld?
Vr. — Omdat ik die niet heb gemeten. Ik dorst de collectorstroom niet hoger dan tot 35 mA op te voeren, omdat het vermogen van mijn transistor maximaal 350 mW mag zijn (de fabrikant schrijft dit nadrukkelijk voor). Bij 35 mA en 10 V wordt dit vermogen juist bereikt. Ik zou die grens niet durven overschrijden, want dan zou ik kans lopen zo'n lawine van gaten en elektronen op gang te brengen als bij een overbelaste transistor optreedt. Wellicht zou het resultaat van mijn spaarzin in rook opgaan.
W. — Dat heb je verstandig gedaan, dat moet ik zeggen. Let er op, dat de grafieken die de verandering van I_c met I_b aangeven, meestal vrij recht verlopen. We zijn overigens al eerder een dergelijke grafiek tegengekomen in fig. 24.
Vr. — Inderdaad. En ik herinner me, dat je uit een dergelijke grafiek de stroom-

versterkingsfactor β kunt aflezen. Die factor geeft aan, hoeveel maal sneller de collectorstroom verandert als de basisstroom.
W. — Zou je als voorbeeld die factor uit de karakteristiek voor $U_C = 2$ V kunnen afleiden?

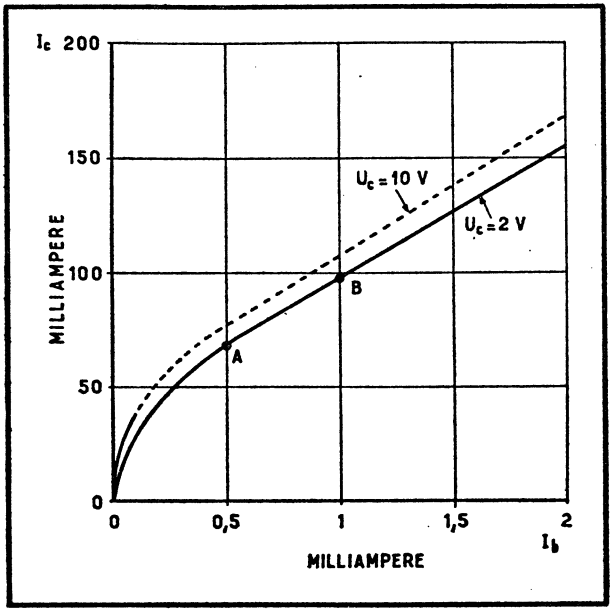


Fig. 45. Variatie van de collectorstroom I_c als functie van de basisstroom I_b voor twee waarden van de collectorspanning U_c.

Vr. — Dat is niet moeilijk. Wanneer je bijvoorbeeld de basisstroom van 0,5 tot 1 mA laat toenemen (van punt A naar punt B), zal de collectorstroom van 70 naar 97,5 mA lopen. Een basisstroomvariatie van 0,5 mA levert dus een collectorstroomtoename van 27,5 mA op. De stroomversterkingsfactor is dus $\beta = 27{,}5 : 0{,}5 = 55$ maal.
W. — Uitstekend! Meer algemeen uitgedrukt geldt:

$$\beta = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b}$$

waarin ΔI_c en ΔI_b kleine variaties van de collector- en de bassisstroom voorstellen.

Bij transistoren komt er nog een weerstand bij

Vr. — Wel, dat is grappig. Dat doet me denken aan die regel over stroom- en spanningsveranderingen, die ik lang geleden, toen ik nog een jongen was, heb geleerd. Die ging over de steilheid en de versterkingsfactor, en als we nu ook de inwendige weerstand nog tegenkomen . . . dan hebben we het hele stel parameters dat bij buizen een rol speelde, weer terug.

W. — Kalm aan, vriend! Ik moet je al weer zeggen, dat je niet te haastig conclusies mag trekken uit de overeenkomst tussen buizen en transistoren. De versterkingsfactor is bij een buis de verhouding tussen twee spanningen; bij een transistor is dit de verhouding van twee stromen. Ook op het punt van de inwendige weerstand is de situatie anders: bij buizen bedoelt men daarmee altijd de uitgangsweerstand, maar bij transistoren — daar hebben wij het al over gehad — speelt ook de *ingangsweerstand,* dat is de weerstand tussen emitter en basis een rol. Verder is deze weerstand net als iedere weerstand de verhouding tussen een spanning en een stroomsterkte, als wijlen de natuurkundige Ohm het zou zeggen.

Vr. — Of, om het net zo precies te formuleren als jij, de verhouding van een kleine basisspanningsverandering tot de erdoor veroorzaakte basisstroomverandering. En als ik evenals als jij kleine veranderingen met delta's aangeef, kan ik voor de ingangsweerstand schrijven:

$$r_i = \frac{\Delta U_b}{\Delta I_b}$$

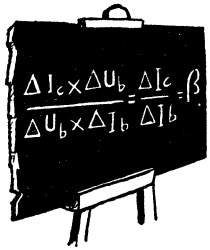
W. — Vraagal, heb je soms een geweldig grote tong gegeten om meer fosfor in je hersens te krijgen? Nu je al zo ver bent, zou ik je willen vragen of je uit een van de opgenomen karakteristieken de waarde van de ingangsweerstand van je transistor kunt aflezen?

Vr. — Dat is heel gemakkelijk, dan nemen wij weer de kromme van fig. 43, die het verband tussen I_b en U_b aangeeft, en daaruit lees ik af dat als U_b van 0,5 naar 0,6 V toeneemt, de stroom met ongeveer 1 mA stijgt. Dat geeft dus voor r_i een waarde van 0,1 : 1, dat wordt 0,1 ohm.

W. — Schaam je je niet, Vraagal, om op jouw leeftijd nog milli-ampères en ampères door elkaar te halen?

Vr. — Sorry! Ik had die 0,1 V natuurlijk door 0,001 A moeten delen, wat r_i = = 100 ohm geeft.

Een heel nuttige formule



W. — Dat klinkt beter. En als straf voor die stomme vergissing zou ik je een klein rekensommetje willen opgeven: vermenigvuldig de steilheid met de inwendige weerstand, uitgaande van de definities voor die grootheden.

Vr. — Oh, maar dat is niet moeilijk:

$$S \times r_i = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_b} \times \frac{\Delta U_b}{\Delta I_b} = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} = \beta$$

Ik had er al zo'n idee van, dat we op iets dergelijks terecht zouden komen. De stroomversterking is dus gelijk aan het produkt van de steilheid en de ingangsweerstand. Dat doet me denken aan de betrekking die voor buizen geldt: $S \times R_i$, waarin R_i de uitgangsweerstand voorstelt.

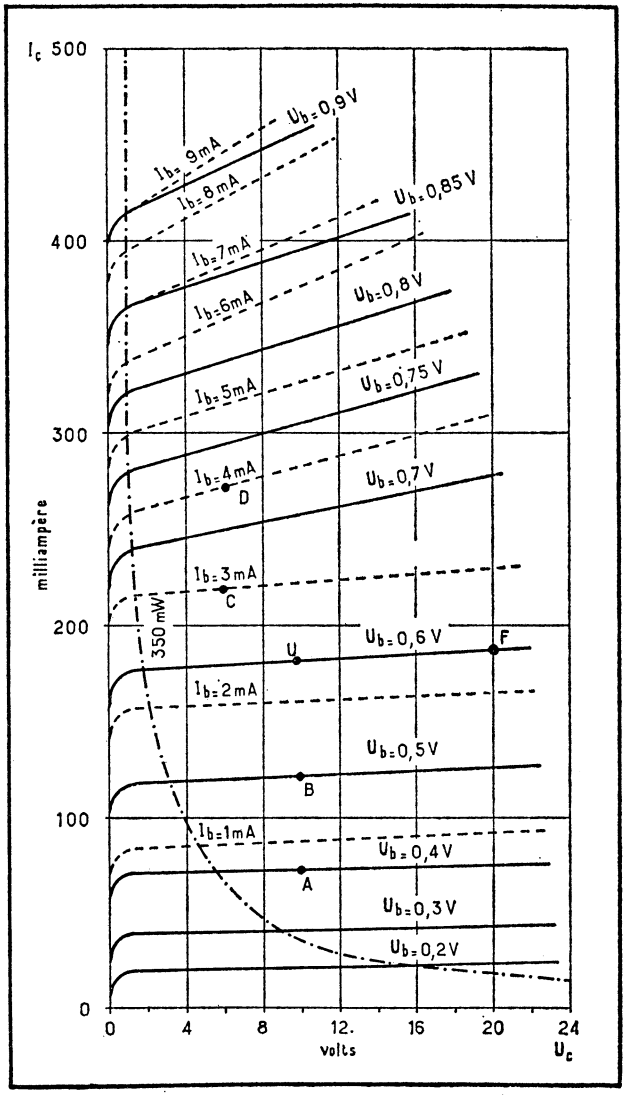
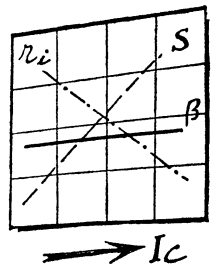


Fig. 46. Variatie van de collectorstroom I_c als functie van de collectorspanning U_c voor verschillende waarden van de basisspanning U_b en de basisstroom I_b. Al deze karakteristieken behoren bij de transistor voor middelgroot vermogen, waarvoor ook de karakteristieken van fig. 43, 44 en 45 zijn opgenomen.

W. — Zou je na kunnen gaan of bovenstaande vergelijking klopt voor de waarden van de parameters die je bij jouw transistor hebt bepaald?

Vr. — Uit de kromme van fig. 44 volgt, dat in de buurt van 0,5 V de steilheid 500 à 600 mA/V moet zijn, zeg gemiddeld 0,55 A/V. Als ik die waarde vermenigvuldig met de inwendige weerstand, die op hetzelfde punt 100 ohm is, verkrijg ik 55, wat precies de waarde is die we voor de stroomversterkingsfactor gevonden hebben.

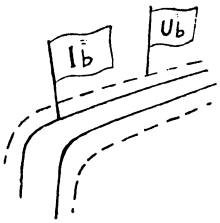
W. — Het gaat fantastisch goed. Voor we dat vergeten, Vraagal, zie je dat de stroomversterkingsfactor over een groot gebied nauwelijks van waarde verandert bij



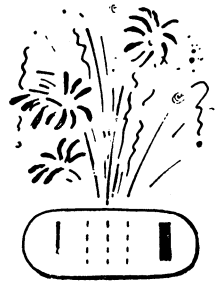
toename van de collectorstroom. In tegenstelling hiermee neemt de steilheid, zoals wij al zagen, toe als I_c groter wordt.
V. — Waaruit ik de gevolgtrekking maak dat, wil de formule $S \times r_i = \beta$ opgaan, de ingangsweerstand af moet nemen met toenemende collectorstroom.

Alle karakteristieken op één velletje

W. — Kinderen zeggen de waarheid... Het wordt nu tijd, mijn vriend om je te laten zien hoe al die verschillende gegevens, die we op verschillende plaatsen uit de door jou opgenomen krommen hebben afgelezen, allemaal uit één karakteristiekenbundel bepaald zouden kunnen worden. Daarvoor moet je de moeite nemen om aan het einde van je metingen een kromme te tekenen, waarin je uitzet hoe de collectorstroom varieert bij spanningsvariaties van de collector.
Vr. — Als ik je goed begrijp, worden dat krommen, die lijken op de anodestroom-anodespanningskarakteristieken.
W. — Daar lijken ze inderdaad op.
Vr. — Maar voor welke waarde van de basisspanning moet ik die opnemen?
W. — Je moet een serie krommen tekenen voor een reeks opeenvolgende waarden van U_b. Begin met deze spanning bijvoorbeeld op 0,2 V in te stellen. Voer de collectorspanning dan vanaf 0 V geleidelijk op en schrijf de bijbehorende waarden van de stroomsterkte I_c op.



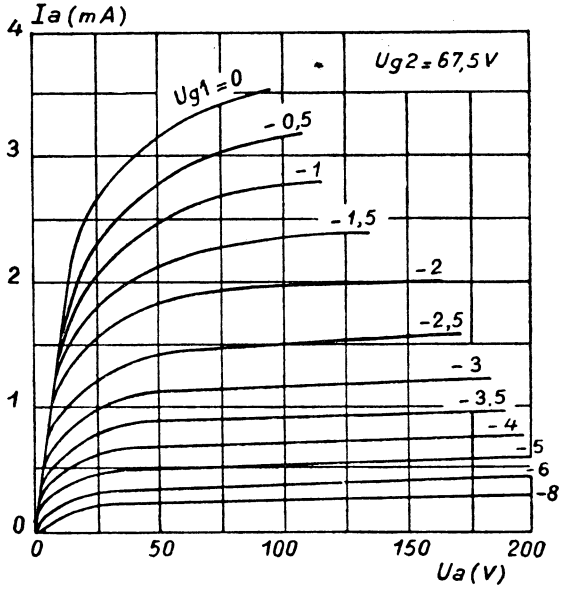
Vr. — Dat is eigenaardig. De stroom stijgt binnen de 2 V al van 0 tot 20 mA om hierna vrijwel niet meer toe te nemen, zelfs al voer ik de collectorspanning tot 24 V op. Hoe komt dat?
W. — Je hebt hier te doen met een verzadigingsverschijnsel. Wanneer alle ladingdragers, die door de spanning tussen basis en emitter in beweging zijn gezet, deelnemen aan de collectorstroom, geeft het niets, of je de collectorspanning nog verder opvoert...
Vr. — Het mooiste meisje van de wereld kan niet meer geven dan zij heeft.
W. — Nu je de kromme voor $I_b = 0{,}2$ V hebt opgenomen, kun je de volgende kromme opnemen voor $U_b = 0{,}3$ V, enzovoort. Volgens een andere methode wordt niet de basisspanning, maar de basisstroom op een aantal vaste waarden ingesteld. Dat komt praktisch op hetzelfde neer. Je ziet, dat je zo twee karakteristiekenbundels krijgt voor de verandering van de collectorstroom als functie van de collectorspanning; de ene voor verschillende waarden van de basisspanning en de andere van de basisstroom. Men noemt dergelijke voor iedere grafiek constante grootheden, de bij de grafiek behorende parameters.

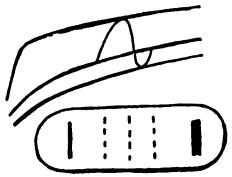


Punten van overeenkomst en punten van verschil

Vr. — De mooie karakteristieken die we zo hebben gekregen, lijken op de anodestroom-anodespanningskarakteristieken van buizen. Daar wordt de negatieve roosterspanning als parameter gebruikt. Vooral de karakteristieken van pentoden lijken er heel veel op.
W. — Dat is zo. Toch moet je op twee punten letten waarop ze beslist niet op elkaar lijken. Ten eerste vallen alle pentodekrommen vanaf de oorsprong vrijwel over elkaar, waarop ze vrij plotseling afbuigen.
Vr. — ... Net als vuurwerk.
W. — Zo zou je het kunnen noemen. De transistorkrommen lopen ook heel snel

omhoog, maar ze zijn al vanaf het begin gescheiden van elkaar en gaan dan met een vrij scherpe knik in een vrijwel horizontaal lopend stuk over. Je kunt dat beter zien als je de grafieken van een kleine vermogenstransistor bekijkt.
Het tweede punt van verschil is, dat de pentodekrommen vlak bij elkaar liggen voor lage waarden van de negatieve roosterspanning (misschien kan ik beter zeggen: wanneer het rooster sterk negatief is). Voor minder sterk negatieve waarden van de roosterspanning neemt de afstand tussen de naast elkaar gelegen krommen toe. Bij de transistor lopen de (gestippeld getekende) krommen voor verschillende waarden van de basisstroom op vrijwel gelijke afstanden. Op beide punten wint de transistor het van de buis.





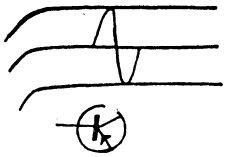


Fig. 47. Variatie van de anodestroom bij een pentode als functie van de anodespanning voor verschillende waarden van de negatieve roosterspanning.

Vr. — Waarom is dat zo?
W. — Snap je niet dat een transistor minder vervorming geeft dan een pentode, vooral bij grote signalen? Even grote basisstroomveranderingen naar de positieve of naar de negatieve richting leveren ook even grote collectorstroomveranderingen op. Bij de pentode zijn de stroomveranderingen tijdens de positieve en de negatieve periodehelft niet even groot.
Vr. — Wat je kunt horen als dat ontzettend lelijke geluid, dat ze niet-lineaire vervorming noemen. Het is dus zo, dat transistoren beter zijn dan pentoden vanwege hun betere lineariteit. Leve de transistoren!

Hoe halen wij zoveel mogelijk uit de krommen?

W. — Ik wilde nog eens terugkomen op de karakteristieken van fig. 46 om je te laten zien hoe je er een volledige indruk van de belangrijkste transistoreigenschappen uit kunt krijgen. Je kunt er de steilheid uit afleiden voor elk willekeurig punt van de basisspanning.

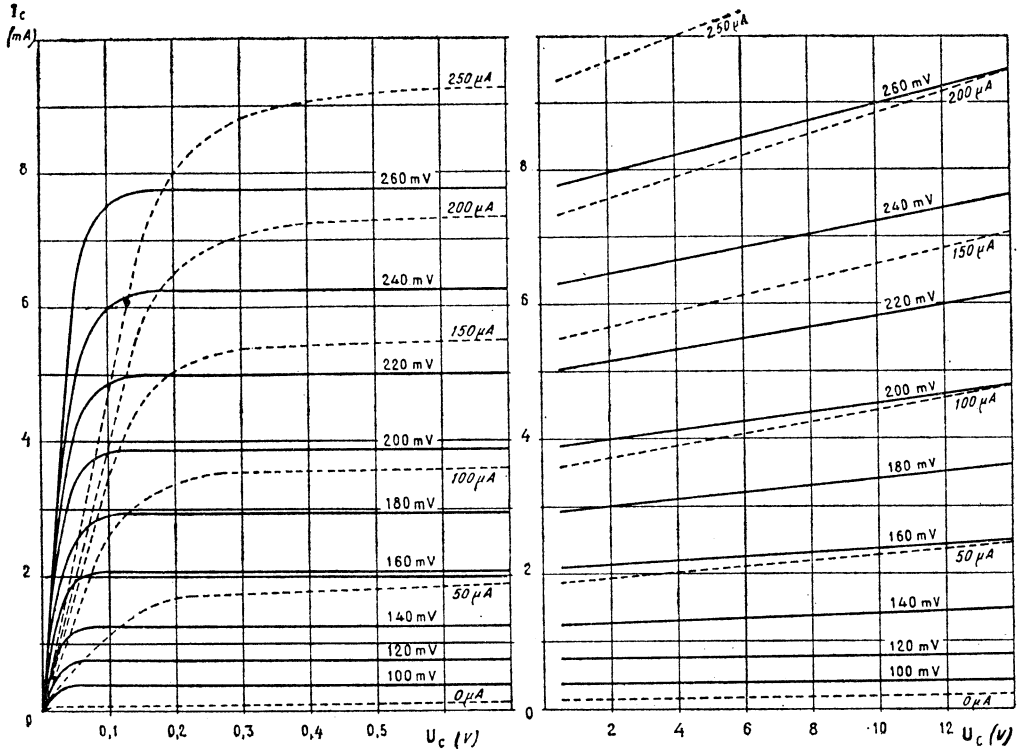
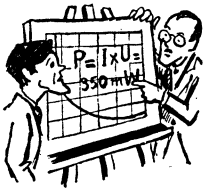


Fig. 48. I_c/U_c-krommen van een transistor voor laag vermogen. In de linkerhelft van de figuur zijn de spanningen op een grotere schaal getekend, om duidelijker te laten uitkomen hoe het verloop van de karakteristieken is tussen 0 en 0,7 V. Uit de figuur blijkt duidelijk, dat bij lage waarden van pe collectorspanning de basisstroom niet langer evenredig met de basisspanning is.

Vr. — Als ik dat doe en de basisspanning bijvoorbeeld van 0,4 op 0,5 V breng (van A naar B), neemt de stroom toe van 75 naar 125 mA, dat is met 50 mA. De steilheid is 50 : 0,1 = 500 mA/V.

W. — Het is even gemakkelijk om uit de krommen de stroomversterking af te lezen.

Vr. — Ik denk dat je daarvoor van de ene I_b-kromme naar de andere moet. Als wij bijvoorbeeld de punten C en D bij de kop nemen, waarvoor de basisstroom 1 mA verschilt, verandert de collectorstroom van 220 naar 275 mA, d.w.z. een toename van 55 mA. Daaruit volgt dus voor de door ons gezochte waarde van de stroomversterking: $\beta = 55 : 1 = 55$.



Dat is helemaal niet ingewikkeld... Maar wat is het nut van die rare kromme die van links boven naar rechts beneden loopt en waar je 350 mW bij hebt gezet?

W. — Die kromme geeft het maximaal toegestane vermogen van de transistor aan. In ieder punt van die kromme is het produkt van collectorspanning en stroom gelijk aan 350.

Vr. — Dat betekent dus, dat bij 10 V een stroom van 35 mA behoort en bij 5 V een stroom van 70 mA. Is dat de grens, waar je niet boven mag komen?

Alweer delta's

W. — Ja, die kromme is een hyperbool. Maar daar hebben we het nog wel over. Intussen zou ik je wat willen vertellen over nog een uiterst nuttige eigenschap van de transistor: zijn hoge *uitgangsweerstand.* Begrijp je wat ik bedoel?

Vr. — Met het laatste beetje fosfor dat ik nog in mijn hersens heb, zal ik proberen eruit te komen. Ik neem aan, dat je de weerstand bedoelt, die zijn werking doet gelden op de collectorstroom, wanneer je de grootte daarvan probeert te veranderen door verandering van de collectorspanning. Heb ik dat goed gezegd?

W. — Heel goed, Vraagal. Je moet er nog bij zeggen, dat de basisspanning hierbij constant moet worden gehouden. En denk dan eens aan de Wet van Ohm, waar je alles mee uit kunt rekenen.

Vr. — Ik snap het. Die uitgangsweerstand zal de verhouding van de collectorspanning tot de -stroom moeten zijn.

W. — Die definitie is nog niet helemaal goed. Er mankeren nog een paar delta's aan...

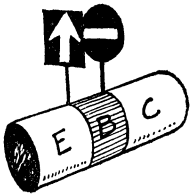
Vr. — Met zo'n goede hulp kan ik met niet meer vergissen. Ik kan een definitie geven, waar mijn oude wiskundeleraar stil van zou worden. De uitgangsweerstand van een transistor is de verhouding van een kleine collectorspanningsvariatie tot de erdoor veroorzaakte collectorstroomvariatie.

In formule: $r_c = \frac{\Delta U_c}{\Delta I_c}$ (wat overeenkomt met $R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}$ bij buizen).

W. — Ik begrijp, dat je daar trots op bent. Die geweldige tong die je gegeten hebt, werkt nog steeds reuze gunstig op je verstand... Zou je verder alweer uit de krommen van fig. 46 de uitgangsweerstand van die transistor kunnen bepalen bij een basisspanning van laten we zeggen 0,6 V?

Vr. — Dat is niet moeilijk... Als ik uitga van twee punten E en F, overeenkomend met de spanningen op de collector van 10, resp. 20 V, dat is dus een verschil van 10 V, dan zie ik dat de collectorstroom van 180 mA tot ca. 182 mA toeneemt, dus een toename van 2 mA of wel 0,002 A, daaruit volgt, dat de uitgangsweerstand gelijk is aan 10 : 0,002 = 5000 ohm.

W. — Dat is in orde. Als je de uitgangsweerstand had uitgerekend voor grotere waarden van de stroom, had je nog lagere waarden gevonden. Maar vergeet niet, dat je een transistor voor middelmatig groot vermogen hebt genomen. Als je een type voor klein vermogen had genomen, bijvoorbeeld een waarvan de krommen in fig. 48 getekend zijn, had je een veel hogere uitgangsweerstand gevonden. Het komt er op neer, dat deze grafieken hier bijna horizontaal verlopen. En zelfs een flinke toename van U_c levert nu maar een onbelangrijke toename van I_c op. Dat wil zeggen, dat het quotiënt van die twee grootheden in de tientallen kilo-ohm loopt.



Vr. — Wat een gek ding is toch zo'n transistor met zijn lage ingangsweerstand en zijn hoge uitgangsweerstand. Je zou bijna zeggen dat hij het met opzet deed, om de spot te drijven met de buizen... Zou het overigens juist zijn om te zeggen, dat de ingangsweerstand zo laag is, omdat de emitter-basis-overgang de gelijkstroom doorlaat? In tegenstelling hiermede is de basis-collector-overgang in de verkeerde richting voorgespannen, zodat de stroom daar slechts met moeite doorheen kan komen, wat een hoge uitgangsweerstand betekent.

W. — Ik heb geen enkel bezwaar tegen die methode van bekijken. Maar ik ben er bang voor, dat je voorraad fosfor voor vandaag op begint te raken.... en dat daarmee je ingangsweerstand reuzegroot wordt.

ZEVENDE PRAATJE

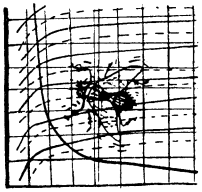
RECHTEN EN KROMMEN

In de loop van hun laatste praatje hebben Weetal en Vraagal achtereenvolgens de belangrijkste eigenschappen van de transistor bekeken. Hierbij viel het op, dat het mogelijk is deze eigenschappen in een aantal getallen uit te drukken, waarbij ieder getal de verhouding tussen twee veranderingen aangeeft. Een beter inzicht wordt verkregen door het tekenen van krommenbundels, die aangeven hoe bepaalde grootheden variëren als functie van bepaalde andere grootheden. Door zo van grafieken gebruik te maken, verkrijgt men een veel vollediger beeld van de eigenschappen van de transistor dan uit parameters in getalvorm, die uitsluitend gelden in het aangegeven werkpunt. Want laten we maar eerlijk toegeven... bij transistoren hangt alles van elkaar af.

In dit praatje gaan onze beide vrienden uit de karakteristiekenbundels na, hoe de transistor precies werkt wanneer hij als versterker is geschakeld met een belastingsweerstand. Ondertussen bestuderen ze ook, welke hulp-gelijkspanningen moeten worden aangelegd en hoe dat in de praktijk gebeurt.

Samenvatting: Statische en dynamische karakteristieken. — Het trekken van de belastingslijn. — Het werkpunt. — Stroom-, spannings- en vermogensversterking. — Maximale uitsturing. — Kniespanning. — Keuze van de belastingsimpedantie. — Dynamische steilheid. — Het instellen van de basisgelijkspanning.

Bij de transistor is ook nog een schakeling nodig



Vraagal. — Na ons laatste praatje heb ik last gehad van hevige nachtmerries. Ik droomde dat ik een vlieg was, die gevangen zat in een geweldig spinneweb bestaande uit bundels transistorkarakteristieken. Ik heb me wanhopig geweerd, maar het lukte me niet te ontsnappen... Vind je dat niet erg?

Weetal — Het spijt me dat ik je zulke moeilijke nachten heb bezorgd... Je hebt zeker geen zin om nog verder over die fraaie krommen te praten?

Vr. — Nee, nee, laten we er toch maar mee doorgaan. Ik wilde graag dat je me uitlegde wat voor nut die krommen hebben, als je echt met transistoren werkt.

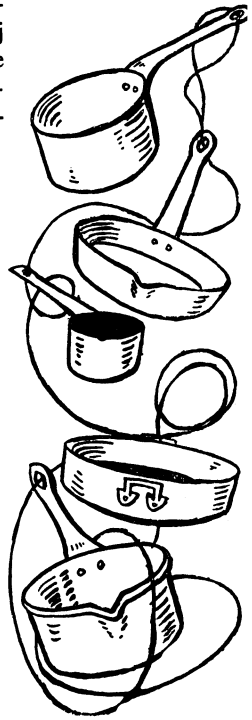
W. — Hoe bedoel je?

Vr. — Je hebt die krommen opgenomen met de collector-emitter-spanning U_c als variabele. En je hebt dat gedaan voor verschillende waarden van de basisstroom I_b (of wat op hetzelfde neerkomt voor verschillende waarden van de basisspanning U_b). Maar in werkelijkheid wordt een transistor nooit zonder bijbehorende schakeling gebruikt. De spannings- en de stroomvariaties hebben een bepaalde bedoeling... De transistor moet spanning of stroom leveren aan een andere transistor in een volgende trap, of misschien vormt hij wel de laatste uit een rij en moet de nodige watts aan een luidspreker leveren. Hoe dan ook, in de collectorkring moet altijd een belastingsimpedantie worden opgenomen. Ook in het geval van twee RC-gekoppelde transistortrappen is er tussen collector en batterij U_{ec} een weerstand R aanwezig.

W. — Dat heb je keurig gezegd. Maar waar zit je dan nog mee?

Alweer de potten en pannen

Vr. — Dat de collectorspanning nu afhankelijk is van de collectorstroom. De spanning die werkelijk op de collector staat, is veel lager dan die van de voedingsbatterij U_{ec}, omdat er een spanningsverlies over de weerstand R staat ten gevolge van de collectorstroom I_c. En als nu een basisstroomvariatie een collectorstroomvariatie teweeg brengt, zal de collectorstroom toenemen, en daarmee zal tevens het spanningsverlies over R toenemen. De collectorspanning daalt hierdoor dus.



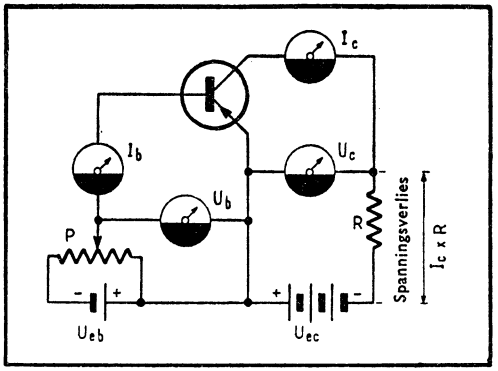
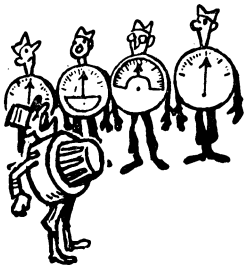


Fig. 49. Om de dynamische karakteristieken van een transistor op te nemen, moet in de collectorkring van de schakeling uit fig. 42 nog een belastingsweerstand R worden opgenomen. (In dit schema wordt de transistor voorgesteld door het meest gebruikte symbool; ook in alle volgende schema's zal hiervan gebruik worden gemaakt.)

W. — Dat heb je goed bekeken, Vraagal! En ik begrijp je vraag: in die krommenbundels schijnt geen rekening gehouden te zijn met een collectorweerstand R.

Vr. — Ik moet weer heel erg aan die potten en pannen denken. Ik had toen alle pannen met touwtjes aan elkaar gebonden... Dank zij die belastingsweerstand zitten alle stromen en spanningen ook aan elkaar. Draai aan de potentiometer P, en je ziet de wijzers van alle vier meters keurig tegelijk in beweging komen, als soldaten die een commando uitvoeren...

Naast alle krommen komt er ook een rechte



W. — Laten we proberen een beetje orde op zaken te stellen. Als voorbeeld nemen we een voortrap-transistor, laten we zeggen een met 75 mW dissipatie. Hier heb ik de karakteristiekenbundel. Het maximum is er als punt-streeplijn bijgetekend. De transistor mag dus beslist niet boven die 75 mW belast worden. Laten we nu eens uitgaan van een batterijspanning U_{ec} van 9 V. Kun je me nu zeggen, in welk geval de collectorspanning eveneens 9 V is?

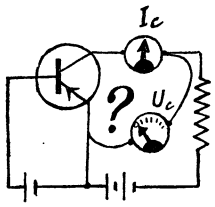
Vr. — Er moet helemaal geen spanningsval over de weerstand R zijn, waaruit volgt, dat de stroom I_c dan nul is.

W. — Daarmee hebben wij alvast één punt gekregen, dat wij in onze grafiek kunnen intekenen. Wij zetten een A bij $U_c = 9$ V, $I_c = 0$. Laten wij nu eens uitgaan van een belastingsweerstand R van 275 ohm. Zou je kunnen uitrekenen, bij welke collectorstroom er helemaal geen collectorspanning overblijft?

Vr. — Als ik goed begrijp, kun je dat met de wet van Ohm vinden, want je vraagt de stroomsterkte I_c die over een weerstand van 275 ohm juist een spanningsval U van 9 V geeft, zodat er van de batterijspanning U_{ec} niets meer overblijft. Je vindt dan

$$U_c = \frac{U}{R} = \frac{9}{275} = 0{,}0327 \text{ A} = 32{,}7 \text{ mA}.$$

W. — Heel goed! Nu kunnen we het tweede punt in de grafiek aantekenen. We zetten een B bij $E_c = 0$, $I_c = 32{,}7$ mA. Het enige wat we nog moeten doen is met een lineaal een mooie rechte lijn trekken tussen de punten A en B. We noemen die lijn de *belastingslijn* voor 275 ohm.



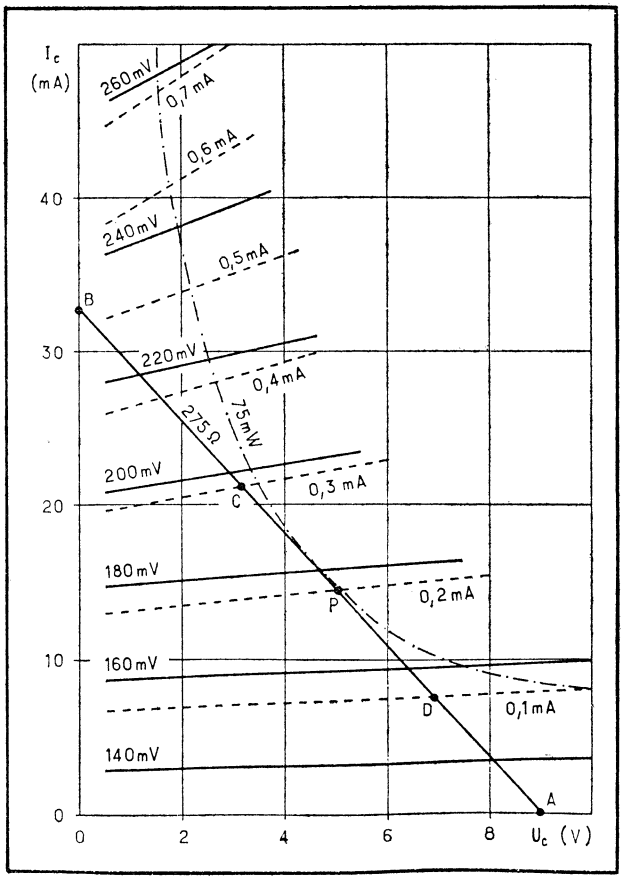
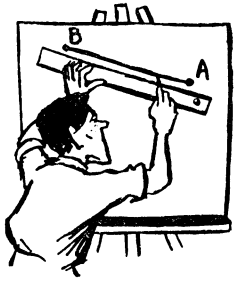


Fig. 50. Grafieken van een transistor voor laag vermogen.



Vr. — Daarmee schieten we wel een eind op! Want ik zie niet in, wat die belastingslijn eigenlijk voorstelt. Om maar mee te beginnen, hoe denk je dat de collectorstroom ooit 32,7 mA kan worden, want er blijft helemaal geen spanning meer op de collector over!

W. — Je komt in de war, omdat je geen verschil maakt tussen statische en dyna-

mische karakteristieken. Uit de eerstgenoemde kun je zien hoe de ons interesserende spanningen en stromen variëren, als er geen belastingsweerstand in de collectorkring is opgenomen. Dat hebben wij de vorige maal samen bekeken. Vandaag gaan we eens kijken, wat er gebeurt wanneer er wel een belastingsweerstand in de collectorkring wordt opgenomen en — tot nog toe heb ik daar een beetje omheen gepraat — wanneer een wisselspanning U_b op de ingang van de transistor wordt gezet, d.w.z. tussen basis en emitter. Nu moet je uit de dynamische karakteristieken kunnen zien, hoe de transistor werkt en de belastingslijn, die we zojuist hebben getekend, maakt dit mogelijk.

De twee componenten

Vr. — Ik zie uit je schema, dat de ingangswisselspanning U_i een uitgangswisselspanning U_u opwekt. Ik geloof, dat ik al begin te begrijpen, wat er gebeurt. In de collectorkring vindt precies hetzelfde plaats als in de anodekring van een elektronenbuis: het vreedzaam naast elkaar bestaan van twee stromen. Ten eerste de gelijkstroomcomponent, dat is de gemiddelde collectorstroom (bepaald door het werkpunt, dat wil zeggen bij buizen door de negatieve roosterspanning) en hiernaast de wisselstroomcomponent (veroorzaakt door spanningsvariaties van het stuurrooster ten opzichte van de kathode).

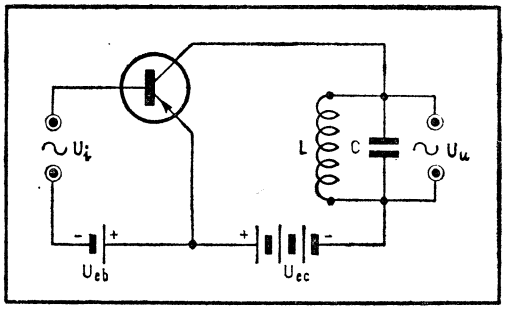
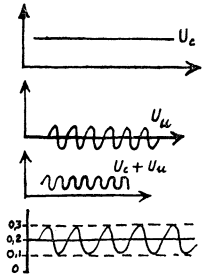


Fig. 51. Op de ingangsklemmen van een transistorversterker wordt een wisselspanning U_i gezet tussen basis en emitter. Op de uitgangsklemmen ontstaat de wisselspanning U_u over de belastingsweerstand R.



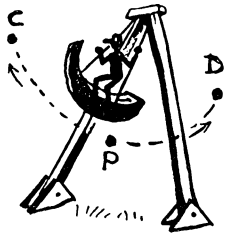
En die wisselstromen moeten opgeteld worden bij of afgetrokken worden van de gelijkstroomcomponent (afhankelijk van hun polariteit).

W. — Dat begint al wat duidelijker te worden, Vraagal... In een transistor gebeurt eigenlijk precies hetzelfde. De batterij U_{eb} zorgt voor de instelling op het juiste werkpunt. Men moet erop letten, dat dit zo gekozen wordt dat de amplitude van de uitgangswisselspanning U_u zo groot mogelijk kan zijn.

Vr. — Daarom moeten we de schakeling zo instellen, dat de gemiddelde collectorspanning U_c gelijk is aan de helft van de voedingsspanning U_{ec}. In ons geval wordt dat de helft van 9 V, dat is 4,5 V.

W. — Daarom zet ik een letter P op de belastingslijn bij $U_c = 5$ V. Dat is bijna op het midden van die lijn; en zoals je straks wel zult zien is het beter P iets boven het midden te kiezen, vandaar die 5 in plaats van 4,5 V. Verder worden de collectorstroom- en de collectorspanningsvariaties geheel bepaald door de getrokken belastingslijn, waarlangs het momentele instelpunt op en neer loopt, afhankelijk van de momentele waarde van de basisstroom of -spanning.

Vr. — Ik vind dat nogal een duur verhaal. Geef mij maar liever een concreet voorbeeld.



Schommelen

W. — Vooruit dan maar. Laten wij dan maar eens aannemen, dat tussen basis en emitter een wisselspanning staat met een amplitude van ongeveer 20 mV, waardoor basisstroomvariaties ontstaan met een amplitude van 0,1 mA ten opzichte van de gemiddelde stroom, die in het werkpunt P 0,2 mA bedraagt.

Vr. — Waaruit dus volgt dat de basisstroom zal schommelen tussen 0,2 + 0,1 = = 0,3 mA en 0,2 — 0,1 mA.

W. — Dat heb je goed uitgerekend. De eerstgenoemde waarde komt op de belastingslijn met het punt C overeen (snijpunt van deze lijn met een kromme voor I_b = 0,3 mA). En de laatstgenoemde waarde bereiken wij in het punt D (snijpunt met de kromme voor I_b = 0,1 mA).

Vr. — Volgt hier dan uit dat de ogenblikswaarden van U_c en I_c langs de belastingslijn heen en weer schommelen tussen de punten C en D, waarbij P het middelpunt van de schommelbeweging vormt?

W. — Dat is inderdaad zo. Je ziet, dat de collectorspanning dan op en neer gaat tussen 3,2 V en 6,8 V. Midden hiertussen ligt bij 5 V het punt P.

Vr. — Dat wordt een amplitude van 1,8 V en omdat die wordt veroorzaakt door een amplitude van 20 mV = 0,02 V op de basis, lijkt het me dat de spanningsversterking 1,8 : 0,02 = 90 maal is, is het niet?

W. — Ik zal je niet tegenspreken. En hoe groot is de stroomversterking?

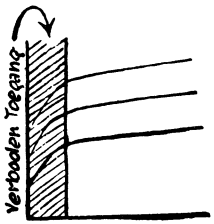
Vr. — Die is al even gemakkelijk te vinden. De collectorstroomverandering naar de ene kant, van P naar C, of naar de andere kant, van P naar D, bedraagt 7 mA. Deze wordt veroorzaakt door een basisstroomverandering van 0,1 mA. Daaruit volgt voor de stroomversterking 7 : 0,1 = 70 maal.

W. — Ik geloof dat je een halve viswinkel leeggekocht hebt om je hersens weer van een nieuwe voorraad fosfor te kunnen voorzien... Nu begrijp je dat het vermogen — dat is het produkt van spanning en stroomsterkte — hiermee is gestegen tot...

Vr. — ...90 × 70 = 6300 maal. Dat is fantastisch!

Weg met de vervorming!

W. — Dat is doodgewoon. Maar wat ik je aan het verstand wilde brengen is, dat de amplitude van de collectorwisselspanning U_c niet boven de 4,5 V mag komen. Wanneer de amplitude die waarde heeft bereikt, doorlopen de waarden van U_c en I_c de hele belastingslijn van A tot B. Als we even aannemen dat het werkpunt P precies in het midden lag, zou de maximumuitwijking naar de ene kant in A en die naar de andere kant in B terecht komen.



Vr. — Volgt hieruit, dat dit de grenswaarden zijn die de spanning op de collector kan bereiken?

W. — Ja. Maar in werkelijkheid mag de collectorstroom nooit in het punt B komen waar de collectorspanning nul wordt, want de karakteristieken lopen daar niet recht meer. Uit fig. 46, en nog beter uit fig. 48, heb je kunnen zien, hoe de krommen naar beneden buigen bij lage waarden van U_c. De spanning, waarbij de kromme begint te buigen, wordt kniespanning genoemd en bedraagt enige tienden volt. Als men geen vervorming wil hebben, moet ervoor gezorgd worden dat de transistor niet verder dan de *kniespanning* wordt uitgestuurd.

Vr. — Is het niet beter om het punt P niet op de halve waarde van de batterijspanning te kiezen, maar iets hoger?

W. — Als je het erg goed wilt doen, is dit zeker beter en daarom heb ik ook 5 V genomen in plaats van 4,5 V.[1]

Vr. — Ik heb een vermoeden dat het geen zuiver toeval is, dat je voor de belastingsweerstand een waarde van 275 ohm hebt gekozen. Hoe zou het er hebben uitgezien, als je een andere waarde had genomen?

Een bundel belastingslijnen

W. — Ik heb hier een paar belastingslijnen getrokken voor andere waarden dan 275 ohm. Als je een waarde van 1000 ohm kiest, krijg je een veel kleiner vermogen, want de beschikbare stroomvariatie wordt veel kleiner (dit geldt zowel voor de basisstroom als voor de collectorstroom). Aan de andere kant nemen de stroomamplitude en het vermogen toe voor waarden beneden de 275 ohm ... Maar dan kom je op het verboden gebied, omdat het vermogen boven 75 mW komt te liggen.

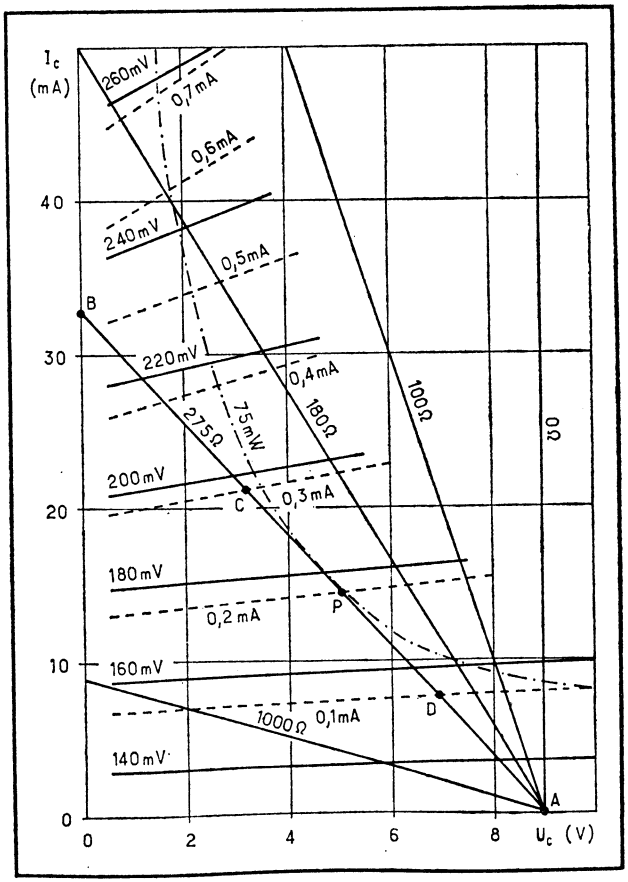
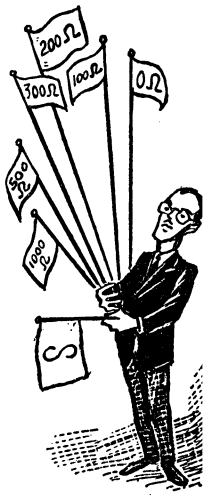


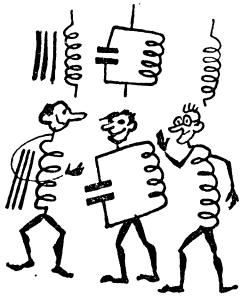
Fig. 52. Transistorkarakteristieken met ingetekende belastingslijnen voor verschillende waarden van R. Hoe lager R is, des te steiler lopen de belastingslijnen. De belastingslijn voor R = 0 ohm loopt recht omhoog.



[1] Weetal vertelt niet precies waarom hij deze waarde gekozen heeft: zijn belangrijkste reden om het punt P bij 5 V te plaatsen, is, dat dit punt juist op de kromme voor I_b = 0,2 mA ligt; bij deze keuze worden ronde waarden voor de verschillende spanningen en stromen gevonden. (*Opmerking van de schrijver.*)

Vr. — En daarom heb jij, grappenmaker die je bent, voor die weerstand een waarde van 275 ohm gekozen, waardoor je een belastingslijn krijgt, die raakt aan de hyperbool die het maximaal toegestane vermogen voorstelt... Ik zie dat je zelfs de belastingslijn voor R = nul hebt getrokken.

W. — Ja, Vraagal. En die zo mooi verticaal lopende lijn is de enige statische karakteristiek tussen al die dynamische karakteristieken. Want vind je niet dat de collectorspanning bij een belastingsweerstand nul constant moet blijven en niet van de stroom mag afhangen?



Vr. — Dat ben ik met je eens. Maar hebben wij niet kortgeleden over belasting-impedanties gesproken, die er anders uitzien dan zo'n gewone ohmsche weerstand? Ik kan me nog best dat stelletje impedanties voorstellen dat je me hebt geleerd, waar de spoelen en de afgestemde kringen toe behoren.

W. — Ik vind, dat je volkomen gelijk hebt daarover te beginnen. Bij dit type impedanties kun je de gelijkstroomweerstand rustig verwaarlozen. Dan komt het werkpunt te liggen op de verticale lijn, die door de voedingsspanning U_{ec} getrokken

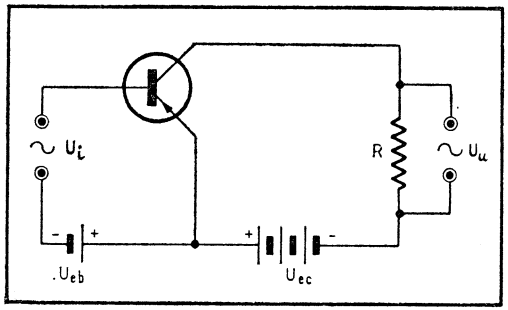
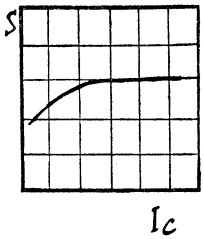


Fig. 53. De belastingsweerstand behoeft geen ohmweerstand te zijn, maar kan ook een impedantie zijn. Hiernaast is hiervoor een LC-kring gekozen, die afgestemd is op de signaalfrequentie.

kan worden. In dit geval kan zonder bezwaar indien de collectorspanning door nul gaat, een wisselspanningsamplitude ter grootte U_{ec} worden bereikt en kan het punt A (waar de belastinglijn de horizontale U_c-as snijdt) bij de dubbele waarde van de batterijspanning U_{ec} worden gezet. Zo wordt bij een batterijspanning van 9 V het punt A op 18 V gelegd.

Vr. — Daaruit volgt dat je, voor het trekken van een belastingslijn, eerst het punt A op de horizontale as moet kiezen bij U_{ec} of 2 U_{ec}, al naar de impedantie uit een weerstand bestaat of niet. Het punt B op de verticale as staat bij een waarde van U_{ec}: R of 2 U_{ec} : Z, al naar het karakter van de impedantie.

W. — Je hebt heel goed onder woorden gebracht, welke regel voor het kiezen van het werkpunt moet worden gevolgd, en ik verwacht niet, dat je veel moeite zult hebben met het trekken van belastingslijnen; je zult er heel wat nuttige gegevens uit kunnen halen. Het is dan bijvoorbeeld niet moeilijk meer om een kromme te tekenen, waaruit je kunt aflezen hoe de collectorstroom I_c verloopt als functie van de basisspanning U_b. Daarvoor behoef je alleen maar de waarden van I_c af te lezen, behorende bij alle snijpunten van de belastingslijn met de krommen voor U_b = constant en deze in een grafiek uit te zetten tegen U_b. Je zult dan zien, dat deze meestal op een rechte lijn liggen. Daaruit volgt, dat de steilheidsvariaties slechts gering zijn, omdat we bij hoge collectorstroom hebben gemeten. De transistor versterkt daarbij voldoende lineair.



Vr. — Ik zie, dat je in dit geval een steilheid van 300 mA/V krijgt.

W. — Ja, dat is de *dynamische steilheid.* Je had met even weinig moeite de kromme kunnen vinden voor I_c als functie van I_b.

Alle spanningen uit één batterij

Vr. — Natuurlijk. Maar ik wou maar gauw ophouden met die krommenbundels, want anders ga ik me zelfs, klaarwakker, weer net als die vlieg in het spinneweb voelen en komen die nachtmerries weer terug... Ik zit overigens al even met een vraag. In al je schema's gebruik je twee batterijen: U_{ec} voor de collectorspanning en U_{eb}

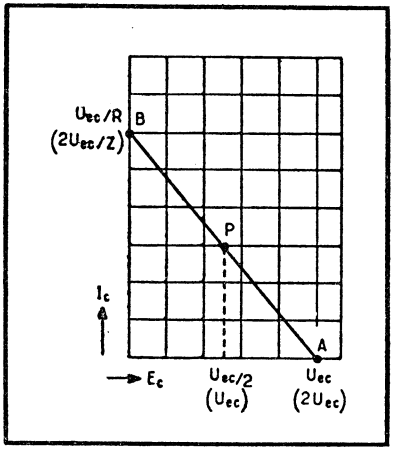


Fig. 54. Algemene regel voor het trekken van belastingslijnen. Indien als belasting een ohmse impedantie met te verwaarlozen gelijkstroomweerstand is aangebracht, gelden de tussen haakjes geplaatste waarden.

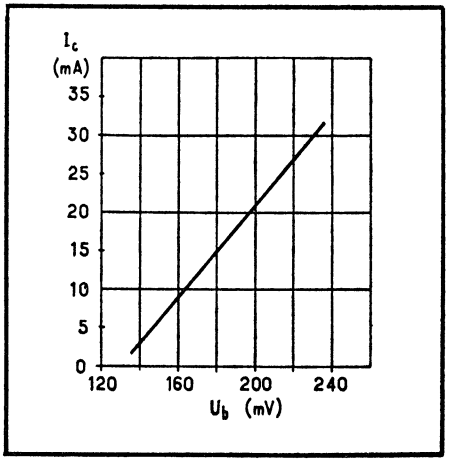
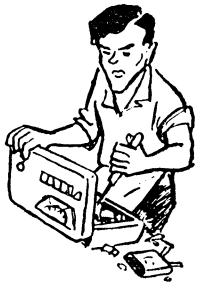


Fig. 55. De hier getekende dynamische collectorstroom-basis-spanningskarakteristiek is gevonden door voor verschillende punten van de belastingslijn uit fig. 50 de waarde van de collectorstroom en de basisspanning op te nemen en tegen elkaar uit te zetten.

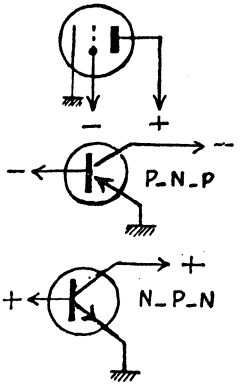


om de basisstroom op een geschikte waarde in te stellen. Maar ik heb alle transistorontvangers van mijn vrienden opengepeuterd en ik heb daarbij gemerkt, dat er altijd maar één batterij in zit, van 4,5 V of van 6 V, of soms van 9 V. Die dient vast en zeker voor de collectorvoeding. Maar waarvandaan komt dan de basisvoorstroom?

W. — Uit dezelfde batterij. Dat gaat bij buizen toch net zo!

Vr. — Daar levert de anodestroom meteen de roostervoorspanning; die anodestroom loopt namelijk door een weerstand tussen kathode en rooster, waarbij de kathode positief wordt ten opzichte van het rooster of, anders uitgedrukt, het rooster negatief ten opzichte van de kathode... Doet men dat net zo bij een transistor door een spanningsval te laten ontstaan over een weerstand in de collectorkring?

W. — Nee, Vraagal. Bij een transistor liggen de zaken eenvoudiger dan bij een buis. Daar moet de anode positief en het rooster negatief zijn ten opzichte van de kathode. In tegenstelling hiermee moeten bij een P-N-P-transistor collector en basis beide negatief zijn ten opzichte van de emitter.



Vr. — Bij een N-P-N-transistor is de situatie net zo. Daar moeten collector en basis alle twee positief zijn ten opzichte van de emitter. Ik denk dat je alleen maar

een spanningsdeler over de batterijklemmen moet aanbrengen, samengesteld uit de weerstanden R_1 en R_2. De basis wordt in dat geval van de juiste stroom voorzien.
W. — Dat heb je goed opgemerkt. En om tegelijkertijd wisselspanning op de basis te kunnen zetten, is nog een koppelcondensator C nodig. Het is echter ook mogelijk de benodigde basisvoorstroom nog eenvoudiger op te wekken, namelijk met behulp van slechts één weerstand R_p, die verbonden moet worden met de klem van de batterij

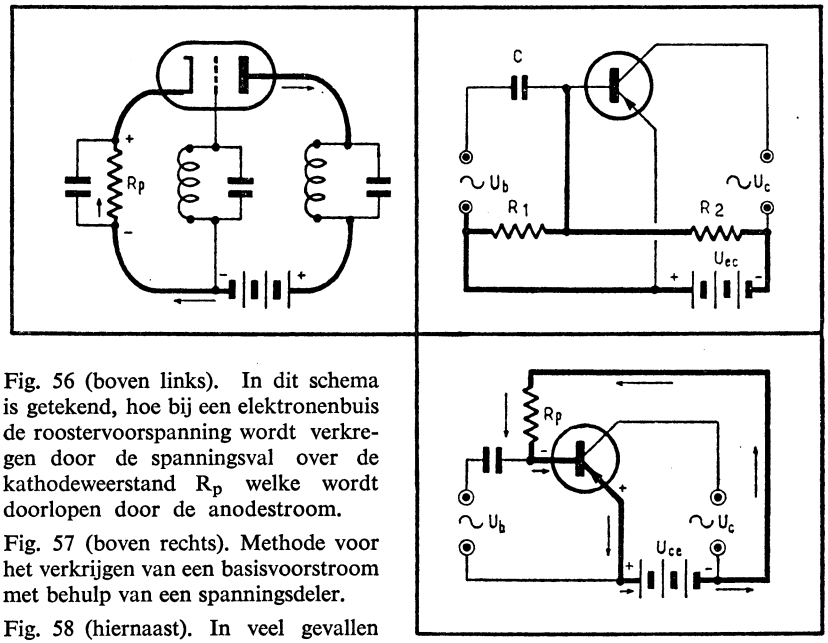


Fig. 56 (boven links). In dit schema is getekend, hoe bij een elektronenbuis de roostervoorspanning wordt verkregen door de spanningsval over de kathodeweerstand R_p welke wordt doorlopen door de anodestroom.

Fig. 57 (boven rechts). Methode voor het verkrijgen van een basisvoorstroom met behulp van een spanningsdeler.

Fig. 58 (hiernaast). In veel gevallen wordt slechts één weerstand R_p gebruikt tussen voedingsbatterij en basis. De gelijkstroom loopt via deze weerstand naar de basis-emitter-overgang.

waaraan de collector ligt, dus de negatieve bij een P-N-P-transistor (of de positieve bij een N-P-N).
Vr. — Ik begrijp al wat er gebeurt. Door R_p loopt een stroom van basis naar emitter.
W. — Die stroom, Vraagal, wordt *basisvoorstroom* genoemd. En déze stroom bepaalt het werkpunt. Zo is bij het werkpunt P in fig. 50 de stroomsterkte 0,2 mA. Als je een batterij van 9 V gebruikt, en de spanning over de basis-emitterovergang verwaarloost (die is toch laag omdat deze overgang in doorlaatrichting staat), wat wordt dan de waarde van R_p.
Vr. — Als je dat met de wet van Ohm mag uitrekenen, krijg je 9 V : 0,2 mA of wel 45 kΩ.
W. — Je ziet alweer dat wij alles kunnen uitrekenen zonder ingewikkelder berekeningen te maken dan een eenvoudige vermenigvuldiging of deling . . .
Vr. — Desondanks heb ik het gevoel, dat mijn hoofd stampvol zit met krommen en rechten en met een dikke brij van elektrische grootheden. Als ik daar maar geen last van heb, wanneer wij weer bij elkaar komen . . .

ACHTSTE PRAATJE

WIL JE DE WERELD VERBETEREN? BEGIN DAN BIJ JEZELF

In buizenschema's maakt men dikwijls gebruik van tegenkoppeling om vervorming en de invloed van voedingsspanningsschommelingen te verminderen. Ook in transistorschema's levert de toepassing van tegenkoppeling dezelfde voordelen op. Hierbij komt nog, dat met behulp van tegenkoppeling de invloed van temperatuurswisselingen met een zekere factor kan worden gereduceerd. Dit is juist bij transistorschakelingen een belangrijk punt, omdat, zoals algemeen bekend, de eigenschappen van halfgeleiders sterk temperatuur-afhankelijk zijn. Als onze jonge vrienden de verschillende toepassingen van tegenkoppeling nagaan, merken zij dat de transistor vanzelf al een zekere mate van inwendige tegenkoppeling bezit. Waaruit weer eens blijkt dat alle grootheden bij transistoren van elkaar afhangen . . .

Samenvatting: De voordelen van tegenkoppeling. — Stroom en spanningstegenkoppeling. — Schema's met buizen en transistoren. — Invloed van de tegenkoppeling op in- en uitgangsweerstand. — Fazevervorming bij gebruik van transistoren. — Inwendige tegenkoppeling. — De invloed van de temperatuur op de vervorming. — Compensatie hiervan door tegenkoppeling. — Gebruik van temperatuur-afhankelijke weerstanden.

De werkelijkheid is erger dan de verbeelding

Weetal. — Wat zie ik daar, Vraagal? Ben je bezig een heel stel boeken te verbranden? Wat betekent die brandstapel?

Vraagal. — Het zijn maar Science Fiction-boeken. Wat heeft het voor nut al die toekomstverwachtingen te bewaren, als de werkelijkheid veel sterker staaltjes te zien geeft dan de schrijvers van die boeken ooit hebben kunnen verzinnen. En daarom wilde ik je een vraag stellen over die geweldige ballonnen, die op een hoogte van 35 000 km om de aarde draaien met een snelheid van één omwenteling in 24 uur, waarmee ze voortdurend boven hetzelfde punt van de aarde blijven.

W. — Je weet best, dat die ballonnen bedoeld zijn om lange-afstandradioverbindingen mogelijk te maken, omdat de radiogolven tegen hun gemetalliseerde huid terugkaatsen. Op die manier kan een televisiesignaal over grote afstanden worden overgebracht.

Vr. — Ja, dat wist ik. Maar ik vraag me af, waarom de voor die kunstmatige satellieten gebruikte ballonnen pas worden opgepompt, nadat ze in hun baan zijn gebracht. Ik vind het maar een moeilijke manier van werken.

W. — Laten we eens zien, Vraagal! Dacht je, dat een ballon met een dergelijke diameter ooit in staat is zich met een snelheid van meer dan 11 km per seconde door de aardatmosfeer te bewegen? Maar in het luchtledige dat heerst op de hoogte waar de ballon zich ontvouwt, wordt de beweging van de ballon nergens door belemmerd.

Vr. — Ik geef toe, dat het me veel duidelijker is geworden en ik schaam me dat ik dat zelf niet heb bedacht. En toch ken ik de wet, die Newton al lang geleden opstelde, heel goed: door iedere actie wordt een reactie opgeroepen, die in de tegengestelde richting werkt en even groot is als de actiekracht. In grote trekken berust

daarop ook de tegenkoppeling, die wij nog niet zo lang geleden bij de radio bekeken hebben.

Het gaat erom je fouten af te leren

W. — Niet helemaal. Zeker, bij de tegenkoppeling gaat het ook om een signaal dat in tegengestelde richting werkt (anders gezegd een tegenfaze-signaal). Maar je moet niet vergeten dat, zoals ik je al nauwkeurig uit de doeken heb gedaan, het tegenkoppelsignaal wordt verkregen door een deel van de uitgangsenergie terug te voeren naar de ingang van de versterker. Zo ontstaat dus . . .

Vr. — Een soort systeem, waarbij de schakeling zijn eigen fouten verbetert. Dat lijkt een beetje op wat er gebeurt, wanneer ik een stommiteit uithaal en zin heb om me zelf ergens een flinke schop te geven als afstraffing, om er de volgende keer aan te denken beter mijn best te doen . . .

W. — De term beter doen komt hier eigenlijk wel goed van pas. Ik herhaal dat de tegenkoppeling eigenlijk een soort tovermiddel is; alle vervormingen worden erdoor verkleind: de lineaire vervorming (d.i. vervorming als functie van de frequentie), de niet-lineaire (afhankelijk van de amplitude en oorzaak van de ongewenste harmonischen) en tenslotte de fazevorming.

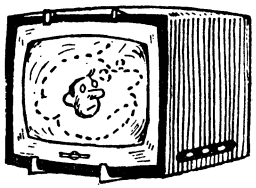
Vr. — Ja, dat herinner ik me nog wel. Die worden allemaal verzwakt, omdat het weer in tegenfaze op de ingang teruggebrachte uitgangssignaal al die vervormingscomponenten bevat. Ze komen dus in tegengestelde zin terug en compenseren uiteindelijk alle veranderingen van het signaal door de versterker zelf veroorzaakt.

W. — Dat heb je goed gezegd, Vraagal! Je weet het nog helemaal. Weet je ook nog, dat tegenkoppeling in staat is de gevolgen van voedingsspanningsschommelingen te verminderen?

Vr. — Dat komt prachtig uit. Ik zal tegenkoppelschakelingen moeten inbouwen in alle trappen van de televisieontvanger in ons zomerhuisje. De netspanning is daar niet erg stabiel. En daardoor begint het beeld op een wonderlijke manier te dansen: zo is het veel te licht, en dan weer veel te donker. Bovendien varieert de grootte van het plaatje, zodat ik het hoofd van iemand op het scherm zie uitdijen of inkrimpen . . . 't is wel een leuk gezicht.

W. — In zo'n geval kan tegenkoppeling inderdaad nut hebben, omdat ieder type storing van het signaal op de uitgangsklemmen door het weer naar de ingang teruggevoerde vervormde signaal, voor een gedeelte wordt opgeheven. Toch zou in jouw geval een netspanningsstabilisator tussen net en televisieontvanger beter helpen.

Vr. — Waarom? Is tegenkoppeling dan niet altijd het beste middel?

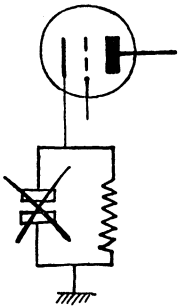


Terug naar de buis

W. — Ik merk dat je nog maar pas komt kijken. Je hebt er nog geen weet van dat je in de natuur niets voor niets krijgt. Als tegenkoppeling de vervorming vermindert, daalt hiermee tevens de versterking. Daarom kun je alleen maar tegenkoppeling toepassen, wanneer je over voldoende versterkingsreserve beschikt . . . Misschien, Vraagal, zou je onder het praten een paar schemaatjes kunnen tekenen van de belangrijkste tegenkoppelschakelingen die bij buizen worden gebruikt.

Vr. — Je kunt tegenkoppelen door tussen kathode en min-voedingsspanning een weerstand R_k op te nemen en die niet door een ontkoppelcondensator te overbruggen.

Afgezien van die ontbrekende condensator is de schakeling precies gelijk aan die welke ik bij ons vorig praatje (fig. 56) heb getekend, voor het opwekken van de automatische negatieve roosterspanning. Maar dat ene ontbrekende onderdeel maakt dat de werking belangrijk verandert. Wanneer nu het rooster positiever wordt en daardoor de anodestroom toeneemt, neemt ook de spanningsval over R_k toe, waardoor de kathode positiever wordt, en dus het rooster negatiever ten opzichte van de kathode. Dit werkt de oorspronkelijke roosterspanningsverandering tegen.



W. — Dat is ongelofelijk, Vraagal, jij begint al even duidelijk uit te leggen als mijn goeie Oom Radiolus, die mij vroeger de grondbeginselen van de radio heeft ingehamerd ... Feitelijk wordt in je eerste schema de tegenkoppeling door de anodestroom veroorzaakt. Daarom spreekt men van *stroomtegenkoppeling*.

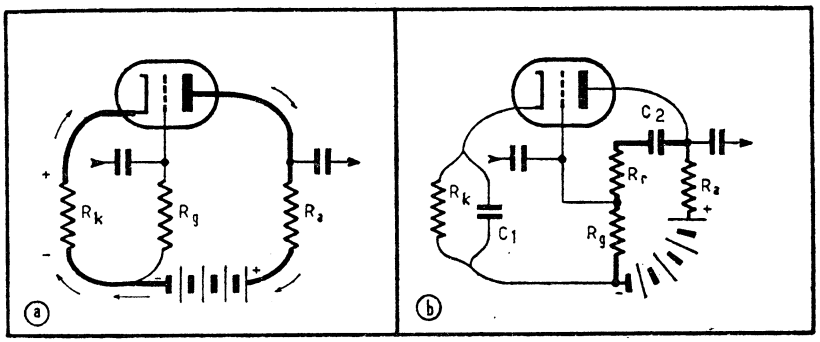
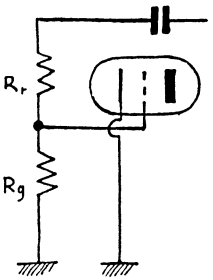


Fig. 59. Tegenkoppeling bij elektronenbuizen. – In a ontstaat stroomtegenkoppeling door in de kathodeleiding een weerstand R_k op te nemen, die zich dan zowel in de roosterketen als in de anodeketen bevindt. – In b wordt spanningstegenkoppeling verkregen door een gedeelte van de over de belastingsweerstand R_a opgewekte wisselspanning via C_2 en de spanningsdeler R_r—R_g naar het stuurrooster terug te voeren. – De schema's zijn op een vrij ongebruikelijke wijze getekend om de manier waarop de tegenkoppeling ontstaat beter te laten uitkomen.



Vr. — In mijn tweede schema zou je van *spanningstegenkoppeling* kunnen spreken, want daarin wordt de uitgangswisselspanning, die over R_a staat, naar het stuurrooster teruggevoerd. Om geen gelijkspanning door te laten is de condensator C_2 aanwezig, terwijl de juiste mate van tegenkoppeling wordt ingesteld met behulp van de weerstand R_r.

W. — Dat klopt. Waarom zet je niet de hele uitgangswisselspanning op het rooster?

Vr. — Omdat ik dan een te sterke tegenkoppeling zou krijgen. De weerstanden R_r en R_g vormen een spanningsdeler, die er voor zorgt dat slechts het over R_g staande deel van de uitgangswisselspanning op het rooster belandt. En omdat men voor

R_r een veel hogere waarde kiest dan voor R_g, wordt slechts een gering gedeelte van de uitgangsspanning tegengekoppeld.[1])

Van de buis naar de transistor

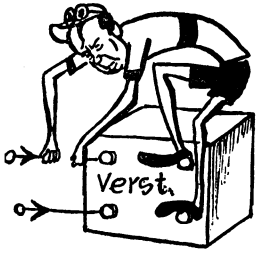
W. — Nu je me zo duidelijk hebt verteld hoe tegenkoppeling bij buizen in zijn werk gaat, zullen we er bij transistoren ook wel uitkomen. Want — hoe kan het zo uitkomen — daar wilde ik het juist met je over hebben. Ik heb daarom een schema met *stroomtegenkoppeling* en een met *spanningstegenkoppeling* getekend.

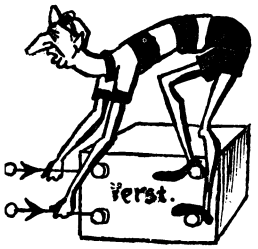
Vr. — Mag ik eens even kijken of ik ze snap? In je eerste schema zie ik een weerstand R_r die zowel door de basis- als door de collectorwisselstroom wordt doorlopen. Dat lijkt precies op een buizenschema, waar de tegenkoppelweerstand gemeenschappelijk was aan de roosterketen en aan de anodeketen. Het moet dus net zo werken. Als je er geen bezwaar tegen hebt, wil ik toch eens proberen of onze beproefde methode met plus- en mintekens ook uitkomt.

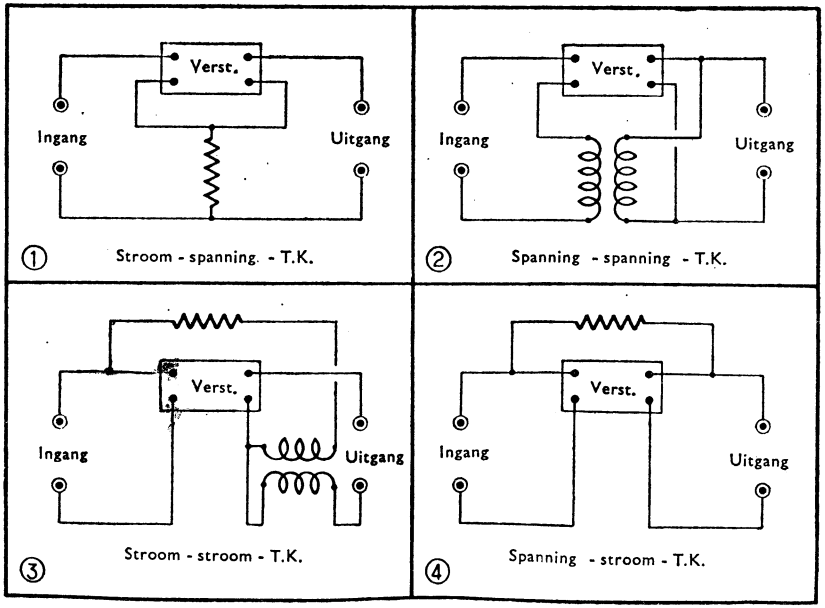
W. — Dat vind ik een heel goed idee.

Vr. — Laten we beginnen met aan te nemen, dat het ingangssignaal de basis iets

[1]) Eigenlijk bestaan er vier verschillende manieren om een versterker van tegenkoppeling te voorzien. De tegenkoppeling kan evenredig zijn met de uitgangsstroom (fig. 1 en 3) of met de uitgangsspanning (fig. 2 en 4). Het tegengekoppelde signaal kan als spanning in serie met de ingangsklemmen worden gezet (fig. 1 en 2) of als stroom parallel op de ingangsklemmen (fig. 3 en 4).







De schakelmethoden 1 en 4 worden meestal toegepast bij tegenkoppeling over één trap.

De methoden 2 en 3 zijn geschikt voor die gevallen, waarin een uitgangstransformator wordt toegepast en ook wanneer over twee trappen wordt tegengekoppeld (zie bijv. fig. 61 waarin een spanning-spanning-tegenkoppeling is gebruikt).

sterker negatief maakt. De collectorstroom zal daardoor toenemen. En door de spanningsval over R_r zal de emitter meer negatief worden ten opzichte van de basis of, wat op hetzelfde neerkomt, de basis sterk positief ten opzichte van de emitter. En ja hoor: we hebben hier weer met tegenkoppeling te doen, want het teruggevoerde signaal werkt het oorspronkelijke signaal tegen.

W. — Je hebt de situatie heel goed uit de doeken gedaan. Laten we nu eens naar het tweede schema kijken.

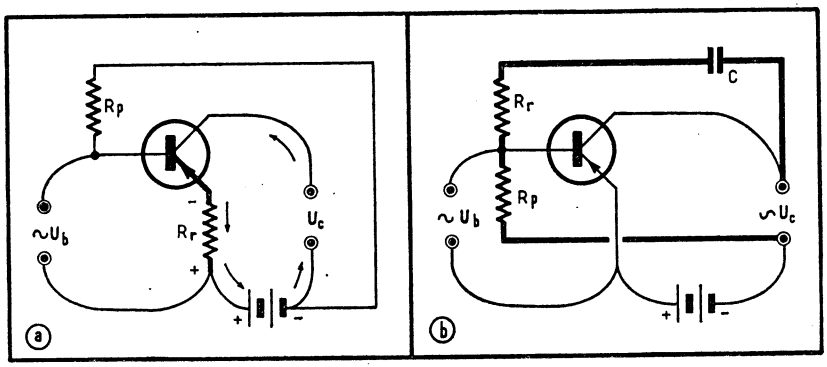
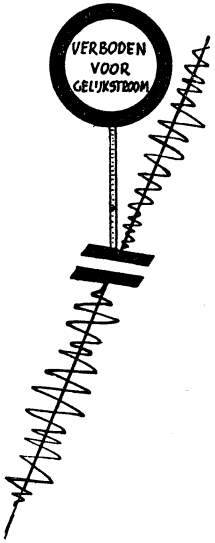


Fig. 60. De twee tegenkoppelmethoden uit fig. 59 overgebracht naar het terrein van de transistoren. – In a hebben we stroomtegenkoppeling, ten gevolge van weerstand R_r, die gemeenschappelijk is voor de basis- en collectorketen. In b is spanningstegenkoppeling verkregen door een gedeelte van de collectorspanning naar de basis terug te voeren via C en de spanningsdeler $R_r - R_p$.

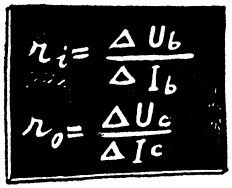


Vr. — Ook hier zie je weer direct de overeenkomst met het buizenschema. De weerstand R_p voor het instellen van de basisvoorstroom heb je meteen gebruikt om er samen met de weerstand R_r een spanningsdeler over de uitgang van te maken. Dat vind ik slim van je, want op die manier komt een gedeelte van de uitgangsspanning U_c tussen basis en emitter terecht, d.w.z. op de ingang van de transistor. Als ik het bij het juiste eind heb, staat dat signaal in tegenfaze met het ingangssignaal. Bovendien houdt de condensator C de gelijkspanning tegen, terwijl de wisselspanning wordt doorgelaten; de basisgelijkspanning wordt dus uitsluitend door R_p bepaald.

W. — Dat is zo. Let er meteen op dat je de condensator C niet te klein maakt, want anders laat hij de lage frequenties te slecht door, zodat die minder sterk tegengekoppeld worden dan de hoge frequenties.

Vr. — Je bedoelt, dat de versterking bij lage tonen minder wordt verkleind, waardoor die lage tonen sterker doorkomen. Dat is meteen een middel om de weergavekarakteristiek van de versterker te regelen. Volgens mij is het geen erg goede methode, want hoe meer je de lage tonen ophaalt, des te meer vervorming krijg je, omdat je de tegenkoppeling bij de lage tonen hebt gereduceerd. Maar je zou die methode best toe kunnen passen om de herrie bij die draagbare ontvangertjes een beetje minder te maken.

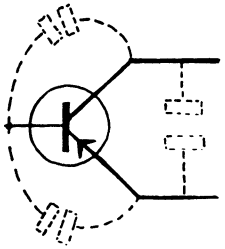
W. — Ik merk dat je weer aardig wat fosfor in je hersens hebt. Ik twijfel er dan ook geen ogenblik aan, of je weet wel te vertellen wat er met de in- en de uitgangsweerstand van een transistor gebeurt, als je stroomtegenkoppeling toepast.



Alweer delta's

Vr. — Daar moet je weer van die delta's voor gebruiken. De ingangsweerstand is de verhouding tussen een kleine basisspanningsvariatie tot de bijbehorende basisstroomvariatie. Als je op de ingangsklemmen een even grote basisspanningsvariatie zet, zal bij tegenkoppeling de basisstroomvariatie kleiner zijn. Met andere woorden, bij dezelfde ΔU_b krijg je een kleinere ΔI_b. Dan moet het quotiënt van die beide, dat is de ingangsweerstand, toenemen.

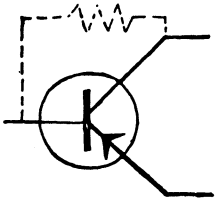
W. — Dat heb je goed uitgekiend. Ik zou je hersens niet willen overbelasten door je ook nog op dezelfde manier uit te laten zoeken wat er met de uitgangsweerstand gebeurt. Je zou dan merken dat die eveneens toeneemt bij stroomtegenkoppeling. Bij spanningstegenkoppeling krijg je een lagere ingangsweerstand en ook een iets lagere uitgangsweerstand.



Vr. — Ik merk steeds weer hoe verbazend veel een transistor lijkt op dat stelletje met touwtjes aan elkaar gebonden pannen. Zodra je ergens aankomt, komt alles in beweging. Is het nu werkelijk nodig om tegenkoppeling toe te passen, als alles daardoor zo verandert?

W. — Je moet niet denken, Vraagal, dat ze de tegenkoppeling alleen maar uitgevonden hebben om jou te plagen. Tegenkoppeling vermindert de vervorming en die is bij transistoren net zo erg als bij buizen.

De fazevervorming is zelfs erger. Want laagfrequenttransistoren hebben nogal vrij grote capaciteiten tussen emitter, basis en collector; daardoor ontstaan fazedraaiingen van het uitgangssignaal ten opzichte van het ingangssignaal. Verder maakt de tegenkoppeling dat je geen moeilijkheden krijgt, wanneer de batterij leeg begint te raken. De hierdoor ontstane veranderingen worden namelijk teruggeregeld, zolang de batterij niet àl te leeg is.



Nog een methode voor tegenkoppeling

Vr. — Ik begin te geloven dat tegenkoppeling geld opbrengt.

W. — Ik merk dat dergelijke laagbijdegrondse argumenten je milder kunnen stemmen ten aanzien van de tegenkoppeling. Ondertussen moet je er wel om denken, dat er, zelfs al zou je het niet willen, altijd al enige tegenkoppeling aanwezig is, want in iedere transistor zit een onzichtbare bron van tegenkoppeling.

Vr. — Wat is dat voor een geheimzinnig verschijnsel?

W. — Iedere transistor lijdt aan *inwendige tegenkoppeling,* een verschijnsel dat bij buizen praktisch niet optreedt. Bij transistoren wordt dit veroorzaakt door de inwendige weerstand van de basis-collector-overgang, welke enige honderden kilo-ohm bedraagt.

Vr. — Hoe merk je die inwendige tegenkoppeling?

W. — Doordat een klein gedeelte van de uitgangswisselspanning naar de basis wordt teruggevoerd. Je kunt dat meten door de collectorspanning te veranderen (zonder uitwendige collectorweerstand), en daarbij de basisspanningsverandering te meten. In het algemeen is die verandering van U_b maar een paar 10 000ste delen van de verandering van U_c.

Met andere woorden de inwendige tegenkoppelfactor is gemiddeld 0,05%. Men geeft dit aan met de letter μ (dat is de Griekse letter mu).

Vr. — Ik heb zo'n vaag gevoel, dat je me niet met de formule $\mu = \frac{\Delta U_b}{\Delta U_c}$ wou lastig vallen. Dank je wel... Maar omdat die μ zo'n kleine grootheid is, geloof ik dat je tegenkoppeling hiérdoor wel kunt verwaarlozen.

W. — Dat kun je inderdaad, mits de belastingsweerstand klein is ten opzichte van de uitgangsweerstand, waaraan meestal wel wordt voldaan.

Wat gebeurt er met de faze?

Vr. — Je weet best, Weetal, dat ik altijd graag echte schema's bestudeer. Verder had ik mijn oom Joop beloofd een moderne transistorontvanger voor hem in elkaar te zetten, om mee te nemen naar Dakar. Hij wil daar proberen in de zon van zijn reumatiek af te komen. Ik ben van plan daar een tweetraps-laagfrequentversterker in te zetten. Kan ik nu over die twee trappen tegenkoppelen door het uitgangssignaal weer naar de ingang terug te voeren?

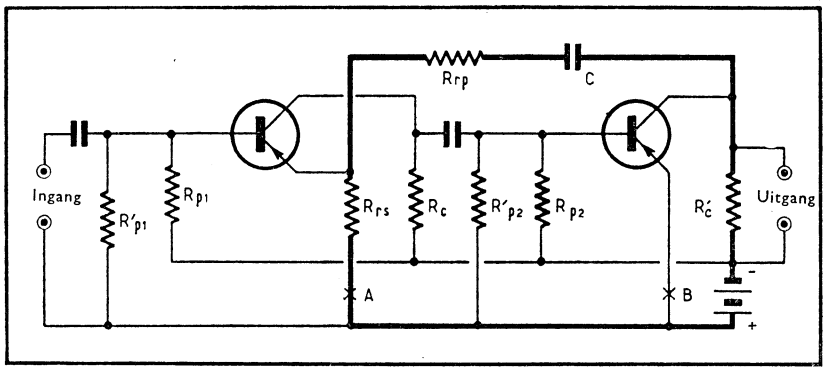


Fig. 61. Laagfrequent-versterker, met spanningstegenkoppeling over twee trappen. Hiernaast levert de niet-ontkoppelde emitterimpedantie van de eerste transistor nog een zekere mate van stroomtegenkoppeling op.

W. — Ja, dat kan. Maar je moet er bij transistoren voor oppassen, niet over meer dan twee trappen tegen te koppelen. Want door die inwendige capaciteiten waar we zopas over spraken, draait de faze per versterkertrap nogal veel. En bij een groter aantal trappen dan twee weet je beslist niet meer waar je aan toe bent.

Vr. — Je zou dus kunnen zeggen, dat je het risico loopt dat de tegenkoppeling in terugkoppeling overgaat?

W. — Dat is helemaal niet onmogelijk . . . Maat hier heb je een schema dat je wel zal bevallen. Het bevat precies twee trappen laagfrequentversterking met RC-koppeling. En de uitgangswisselspanning is via de condensator C en de weerstanden R_{rp} en R_{rs} naar de emitter van de eerste transistor tegengekoppeld.

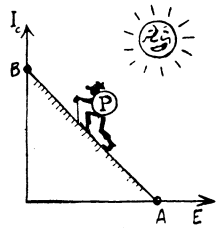
Vr. — Wat is dat nou weer, waarom niet naar de basis, zoals je dat bij één trap hebt gedaan?

W. — Omdat in iedere trap de faze omdraait. Na twee trappen krijg je dus weer een signaal met dezelfde faze als het ingangssignaal. Daarom kun je het uitgangssignaal dan ook niet naar de eerste basis terugvoeren. Je zou terugkoppeling krijgen, waarmee je de zaak behoorlijk aan het genereren had gemaakt. De juiste oplossing is, het signaal naar de emitter terug te voeren, wat tegenkoppeling oplevert. Bovendien ontstaat er een extra stroomtegenkoppeling in de eerste trap over de weerstand R_{rs}.

Vr. — Ik vind het een prachtschema. Het is net wat voor mijn oom.

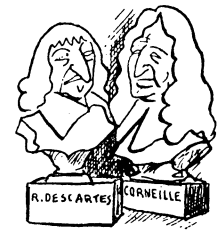
Warmer en warmer

W. — Ik denk niet dat je er wat aan zult hebben. Want zo goed als de tropenzon is voor je oom, zo slecht is hij voor een transistorontvanger.
Vr. — Ja, dat begrijp ik: halfgeleiders kunnen slecht tegen de warmte. Moet ik een zak met ijs op de ontvanger leggen? En in hoeverre wordt de goede werking van de ontvanger geschaad door het toenemen van de stromen bij hoge temperatuur?
W. — Ik was vandaag niet van plan over karakteristieken te praten. Ik dacht dat je daar wel niet veel zin meer in zou hebben. Maar, je moet er wel om denken, Vraagal, dat de collectorruststroom bij iedere 8 °C dat het warmer wordt, met een factor 2 toeneemt. Van 0 naar +40 °C neemt de lekstroom dus met een factor 32 toe. Hieruit volgt, dat bij temperatuursverhoging alle waarden van de collectorstroom toenemen, waardoor alle collectorstroomkrommen hoger komen te liggen. Laten we de temperatuur toenemen van 20 naar 40 °C, dan kan de collectorlekstroom best zoveel toenemen dat de totale stroom tweemaal zo groot wordt. Daaruit volgt, dat het werkpunt (dat, ik zeg het nog eens, het snijpunt is van de belastingslijn met een van de krommen voor constante basisstroom of spanning) in plaats van op het midden van de belastingslijn te liggen een eindje naar links zal lopen, meegetrokken door de stijging van het gehele karakteristiekenveld. En dan ligt het werkpunt niet langer zo mooi midden op de belastingslijn. En afgelopen is het met de perfecte lineariteit van de versterker!



Vr. — Wat een ramp! Ik voel me diep in de put... Maar dat gaat wel weer over, want ik weet wel wat jouw manier van werken is: je stelt me de zaken eerst heel erg somber voor en daarna komt er, net als het konijn uit de hoge hoed van de goochelaar, een geneesmiddel waar alles weer mee kan worden verholpen. Kom maar op met je konijn!
W. — Ik geloof, dat je al weet waar ik naar toe wil. Want ook hier komen wij er weer uit door tegenkoppeling toe te passen. Want die is niet alleen goed voor het reduceren van vervorming, maar is ook een zeer bruikbaar middel voor het tegengaan van langzame veranderingen van de stroom ten gevolge van temperatuurswisselingen.

Vr. — Volgt daaruit, dat de tegenkoppelingsschakelingen die we bekeken hebben, ook meteen voor temperatuurcompensatie kunnen worden gebruikt?
W. — Ja, dat is zo. Mits zij tegelijkertijd ook voor gelijkstroom werkzaam zijn (wat niet het geval is in fig. 60b en in fig. 61). Maar meestal moet je daarvoor nog meer tegenkoppeling toepassen.
Vr. — Maar wordt dan de tegenkoppeling niet zo erg, dat je te veel versterking kwijt raakt? Dat lijkt wel een drama, zoals Corneille ze schreef.
W. — Om daar een oplossing voor te vinden, moeten we de beproefde methode van Descartes toepassen en de problemen los van elkaar proberen te zien. Laten we even afzien van het verlagen van de vervorming door het aanbrengen van tegenkoppelweerstanden en alleen letten op het compenseren van temperatuursinvloeden. Ook hier kan weer van stroomtegenkoppeling gebruik worden gemaakt (zie fig. 62).



Het gaat alweer om een klein verschil

Vr. — Maar ik zie geen enkel verschil met het wisselspanningstegenkoppelingsschema, of het moest de condensator C zijn.
W. — Dat kleine verschilpuntje doet het hem nu juist. Want die condensator C heeft een flinke capaciteit (meestal nemen we er een elektrolytische condensator voor).

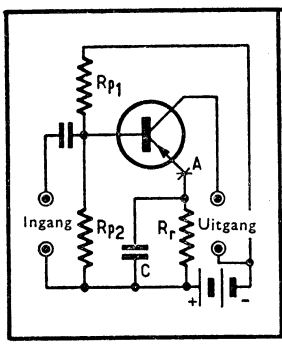


Fig. 62. Temperatuurcompensatie door gelijkstroomtegenkoppeling. De basisspanning wordt gestabiliseerd met de spanningsdeler R_{p1}–R_{p2}.

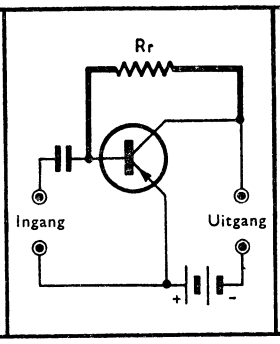


Fig. 63. Temperatuurcompensatie met behulp van een weerstand tussen collector en basis.

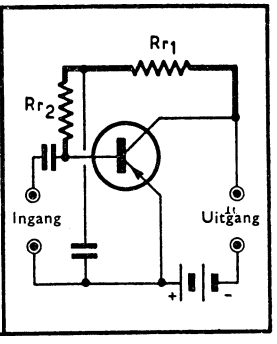
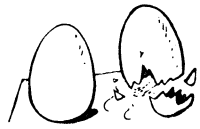


Fig. 64. Uitbreiding van de schakeling van fig. 63 met een ontkoppelcondensator op een aftakking van de tegenkoppelweerstand. Hierdoor wordt bereikt, dat de tegenkoppeling uitsluitend voor gelijkstroom werkzaam is.



Voor wisselstroom is de impedantie van die condensator veel lager dan de weerstand R_r. Door de weerstand loopt alleen maar gelijkstroom, waaruit volgt dat de tegenkoppeling uitsluitend voor gelijkstroom werkzaam is.

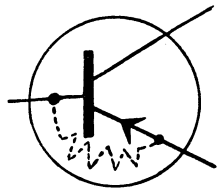
Vr. — Dat vind ik echt het ei van Columbus. Maar wat moet je doen, als je ook de wisselstroom wilt tegenkoppelen?

W. — Er is helemaal geen bezwaar tegen om in de emitterleiding op de in het schema met A aangegeven plaats in serie met R_r nog een niet-ontkoppelde tegenkoppelweerstand op te nemen.

Vr. — Dat is duidelijk. Zou je ook spanningstegenkoppeling kunnen toepassen voor temperatuurcompensatie?

W. — Dat heb je bij het rechte end. Maar dan moet je in het schema van fig. 60b de condensator weglaten, die was aangebracht om de gelijkstroomcomponent tegen te houden. Op de basis koppel je op die manier zowel een gedeelte van de collectorgelijkspanning als van de collectorwisselspanning terug (fig. 63).

Vr. — Je spreekt over een gedeelte, maar een potentiometer bestaat toch uit twee weerstanden. Ik zie er maar één.



W. — Dat is toch goed. De andere tak van de potentiometer wordt gevormd door de inwendige basis-emitter-weerstand van de transistor. Verder kun je, als je alleen maar voor gelijkstroom wilt tegenkoppelen — en daar heb ik geen bezwaar tegen — de wisselspanningscomponent nog met een condensator naar aarde kortsluiten. Deze condensator staat dan tussen een aftakking op de weerstand R_r (zie fig. 64) en aarde.

Vr. — Om weer eens op het toestel van mijn goeie oom terug te komen, ik geloof dat ik begrepen heb dat in het schema van fig. 61 op de punten A en B extra weerstanden voor temperatuurcompensatie moeten worden opgenomen.

W. — Dat moet je zeker doen en dan moet je de eerste nog door een flinke condensator ontkoppelen, anders wordt de tegenkoppeling van het uitgangssignaal veel te groot... Maar ik heb het nog niet met je gehad over een leuke manier om geen last te krijgen van de temperatuursafhankelijkheid van halfgeleiders. Daarvoor moet je de ene temperatuursafhankelijkheid met de andere bestrijden.

Het kwaad met kwaad bestrijden

Vr. — Bedoel je dat ernstig? Het lijkt wel op homeopathie waar je de ziekte met de ziekte bestrijdt.

W. — Je zult het zo wel begrijpen. Omdat de stroom door halfgeleiders bij verwarming toeneemt, neemt hun weerstand daarbij af. Hiervan maakt men gebruik door weerstanden te vervaardigen uit P- of N-halfgeleidermateriaal, waarvan de

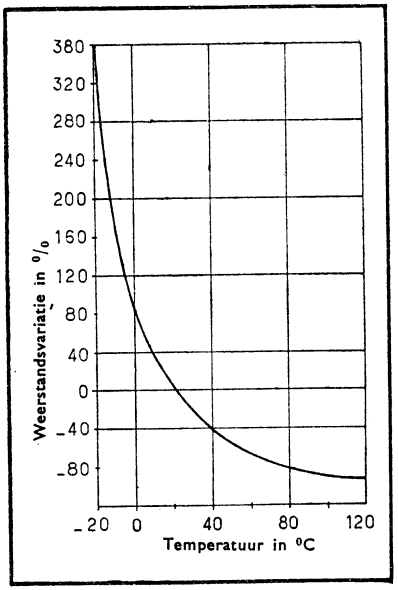


Fig. 65. Verandering van de waarde van een NTC-weerstand als functie van de temperatuur ten opzichte van de weerstand bij een omgevingstemperatuur van 20 °C.

weerstand zeer snel met de temperatuur daalt. Ik heb een kromme van een dergelijke weerstand meegebracht. Men noemt zulke weerstanden *thermistoren* of NTC-weerstanden (weerstanden met negatieve temperatuurscoëfficiënt). Bij een temperatuursstijging van 20 tot 40 °C gaat de weerstand van een thermistor ongeveer 45% naar beneden. En bij 60 °C is de weerstand al tot beneden de halve waarde gedaald.

Vr. — Zo'n weerstand kan slecht tegen warmte! Ik vraag mij af, waarom je juist een dergelijke weerstand moet gebruiken om van de door de warmte veroorzaakte narigheden af te komen.

W. — Dat is niet moeilijk, want je moet zo'n weerstand in de spanningsdeler voor de instelling van de basisspanning opnemen. Iedere spanningsdeler kan door een balans worden voorgesteld en hier wordt de ene arm van de balans gevormd door de weerstand R_1 en de andere bestaat uit een combinatie van enige weerstanden: de thermistor R_t is erin opgenomen samen met een serieweerstand R_2 en een parallelweerstand R_3. Wat gebeurt er nu, als het warmer wordt?

Vr. — De weerstand van de thermistor neemt af, en daarmee neemt tevens de weerstand van de tak van de spanningsdeler, bestaande uit R_2, R_3 en R_t af. Aangezien de weerstand R_1 niet daalt (of zelfs in geringe mate met de temperatuur stijgt), wordt de basisspaning minder negatief en daardoor wordt de collectorstroom weer lager. Het is reusachtig.

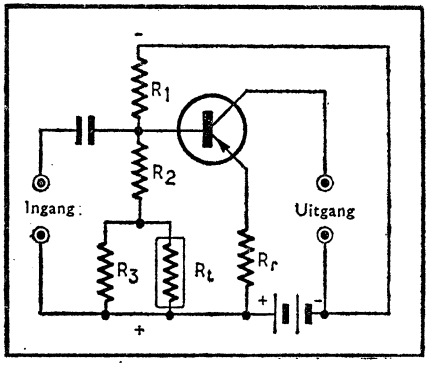
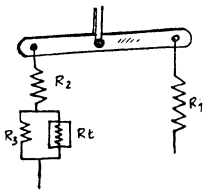


Fig. 66. Temperatuurcompensatie met behulp van een NTC-weerstand R_t in de basisketen.

W. — Je ziet dat het in het leven de kunst is om voldoende rekening te houden met de slechte eigenschappen van de dingen (of van de mensen) en dat wij die kunst hier hebben toegepast.

Vr. — Maar waarom heb je het schema zo ingewikkeld gemaakt met die weerstanden R_2 en R_3?



W. — Om de gewenste mate van temperatuurcompensatie nauwkeurig in te kunnen stellen. De waarden van die weerstanden moeten nauwkeurig worden uitgerekend. Soms kun je een van de twee weglaten, als de thermistor toevallig precies het gewenste weerstandsverloop heeft.

Vr. — Ik kan heel moeilijk weerstand bieden aan een opkomend gevoel van slaperigheid.

W. — Laten we dan voor vandaag maar ophouden.

NEGENDE PRAATJE

EMITTER-, BASIS,- EN COLLECTORSCHAKELING

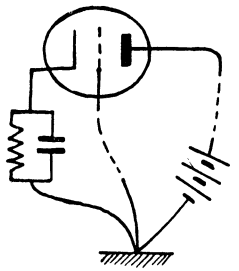
In de loop van hun vorige praatjes zijn Weetal en Vraagal aardig wat aan de weet gekomen over de werking van transistoren en versterkers. Zij zijn daarvoor uitgegaan van de meest toegepaste schakeling, waarin het ingangssignaal tussen basis en emitter wordt gezet en het versterkte signaal tussen collector en emitter staat. Deze schakeling komt overeen met die, welke aanvankelijk ook bij elektronenbuizen gebruikt werd. Desondanks kan het soms, om dezelfde redenen als bij buizen, voordeel opleveren andere schakelingen toe te passen. Daarom is het goed om, voor wij met de studie van volledig uitgevoerde schakelschema's beginnen, eerst de opzet en de werking van dergelijke afwijkende transistorschakelingen te onderzoeken. In de volgende praatjes zijn onze vrienden zover gevorderd, dat ze in de echte schema's kunnen duiken.

Samenvatting: Schakeling van een buis met gemeenschappelijke kathode, rooster of anode — Schakelingen van een transistor met gemeenschappelijke emitter, basis of collector. — Stroom- en spanningsversterking in de drie fundamentele schakelwijzen. — Bijbehorende in- en uitgangsweerstanden. — Overzichtstabel van de kenmerkende eigenschappen.

Het toeval speelt dikwijls een grote rol

Vraagal. — Hoe komt het dat pas veertig jaar na de uitvinding van de elektronenbuis de transistor werd uitgevonden? Zo op het eerste gezicht lijkt het toch veel eenvoudiger om verontreinigingen in een halfgeleider aan te brengen, dan om een glasballon volledig vacuüm te zuigen en daarin een gloeikathode te monteren die door een rooster elektronen naar de anode zendt.

Weetal. — In de geschiedenis van de uitvindingen spreekt ook het toeval een woordje mee. Het zou inderdaad best mogelijk zijn geweest, dat de transistor eerder was uitgevonden dan de elektronenbuis. Een Russische radiotechnicus, Lossev, slaagde er namelijk al in 1922 in, om bij zijn proeven met kristaldetectoren van zinkiet elektrische trillingen met een kristal op te wekken en deze te versterken. Zijn schema (dat hij „cristadyne" had gedoopt) is echter nooit verder gebruikt. Maar als de transistoren het eerst waren uitgevonden en dan pas de buizen, zou men de komst van de vacuümbuizen met vreugde hebben begroet en van een grote verbetering hebben gesproken . . . En dan had men bij vacuümtrioden de fundamentele schakelwijzen toegepast, die voor kristaltrioden in gebruik waren. Op die manier zou men uiteindelijk gekomen zijn tot de schakelingen met gemeenschappelijke kathode, rooster of anode.



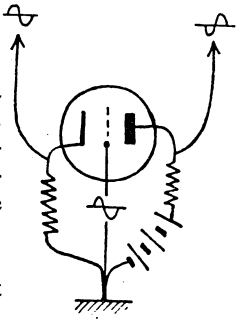
Vr. — Waarom neemt men bij al die schakelingen steeds een ander punt gemeenschappelijk?

De drie fundamentele buizenschakelingen

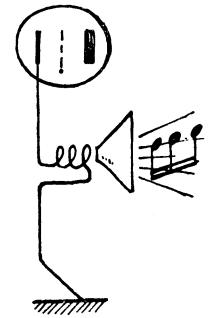
W. — Dat gemeenschappelijk punt wordt dikwijls met aarde verbonden en bezit in elk geval een vaste potentiaal ten opzichte van aarde. Bij een buizenschema is dit het punt waar rooster- en anodekring elkaar raken.

Vr. — Ik dacht dat dit altijd de kathode was.

W. — Dat is zo in de meest gebruikte schakeling, die versterker met gemeenschappelijke kathode wordt genoemd. De kathode is daarbij voor wisselstroom geaard, want de kathodeweerstand is kortgesloten door de ontkoppelingscondensator. Maar ben je de schakeling met gemeenschappelijk rooster vergeten?
Vr. — Die zijn we inderdaad tegengekomen, toen we de frequentiemodulatie bekeken. De schakeling, die je roosterschakeling noemde, wordt gebruikt voor de versterking van signalen met hoge frequentie. Het rooster werkt dan als afscherming tussen in- en uitgangskring en het ingangssignaal wordt op de kathode gezet.
W. — Tenslotte hebben we nog de derde mogelijkheid: de anodepotentiaal vasthouden door die voor wisselstroom met aarde te verbinden (via de hoogspanningsvoeding uiteraard). Het ingangssignaal wordt dan op het stuurrooster gezet en het versterkte uitgangssignaal kan worden betrokken van een belastingsweerstand tussen kathode en aarde.



Vr. — Dat is een leuk schema. Ik begrijp, dat de anodestroom ook in dit schema door de belastingsweerstand loopt, zodat daarover het versterkte signaal komt te staan.
W. — Hé! Ik versprak me, toen ik over een versterkt signaal sprak, want de spanningsversterking van deze schakeling, die ook wel *kathodevolgerschakeling* wordt genoemd, is minder dan één; de belastingweerstand levert tegenkoppeling op, zodat de schakeling in plaats van versterking eerder een kleine verzwakking geeft.
Vr. — Wat heb je dan aan zo'n schakeling?
W. — Heel wat! Je moet in de eerste plaats eens nagaan wat de faze is van het uitgangssignaal op het punt P ten opzichte van het ingangssignaal op het rooster.
Vr. — Die twee spanningen zijn in faze en tussen rooster en kathode staat slechts een kleine verschilspanning. De buis is dus zeer zwaar tegengekoppeld.
W. — Inderdaad. Maar als je nu bij het punt Q nog eens een belastingsweerstand in de anodeleiding aanbracht op de plaats waar dat in normale schema's met geaarde kathode gebruikelijk is . . .
Vr. — . . . dan zou de wisselspanning op dat punt in tegenfaze zijn met de ingangsspanning. Op die manier zou je met één buis tegelijkertijd een faze- en een tegenfaze-signaal kunnen maken! Dat is een reuze handig schema voor het sturen van een balanstrap!
W. — Dat is een van de toepassingen van de kathodevolger, maar deze schakeling wordt ook gebruikt als men een zeer lage uitgangsweerstand wil bereiken. Het is nl. voordelig, als de eindversterker direct gekoppeld is met een belasting met lage impedantie. Het is zelfs mogelijk een eindbuis op die manier direct stroom te laten leveren aan de spreekspoel van een luidspreker, zonder gebruik van een aanpassingstransformator. Dit scheelt heel wat vervorming!



Vr. — Ik ben helemaal gewonnen voor die kathodeschakeling van jou. Maar Weetal, ik ken je langer en ik weet dat je overal een bepaalde bedoeling mee hebt. Als je met zoveel enthousiasme over die drie fundamentele buizenschakelingen praat, ben je vast van plan de ermee overeenkomende transistorschakelingen te gaan bekijken.

Van buizen naar transistoren

W. — Het valt ook niet mee om voor jou iets verborgen te houden. Inderdaad komt met ieder van die drie schakelingen ook een transistorschakeling overeen. Om je dit wat duidelijker te maken, zal ik de overeenkomstige schakelingen op twee manieren tekenen. Eerst zal ik de transistor als een staafje voorstellen, zoals wij dat in het begin gedaan hebben; dan kun je beter de stroomloop door de drie gebieden van de

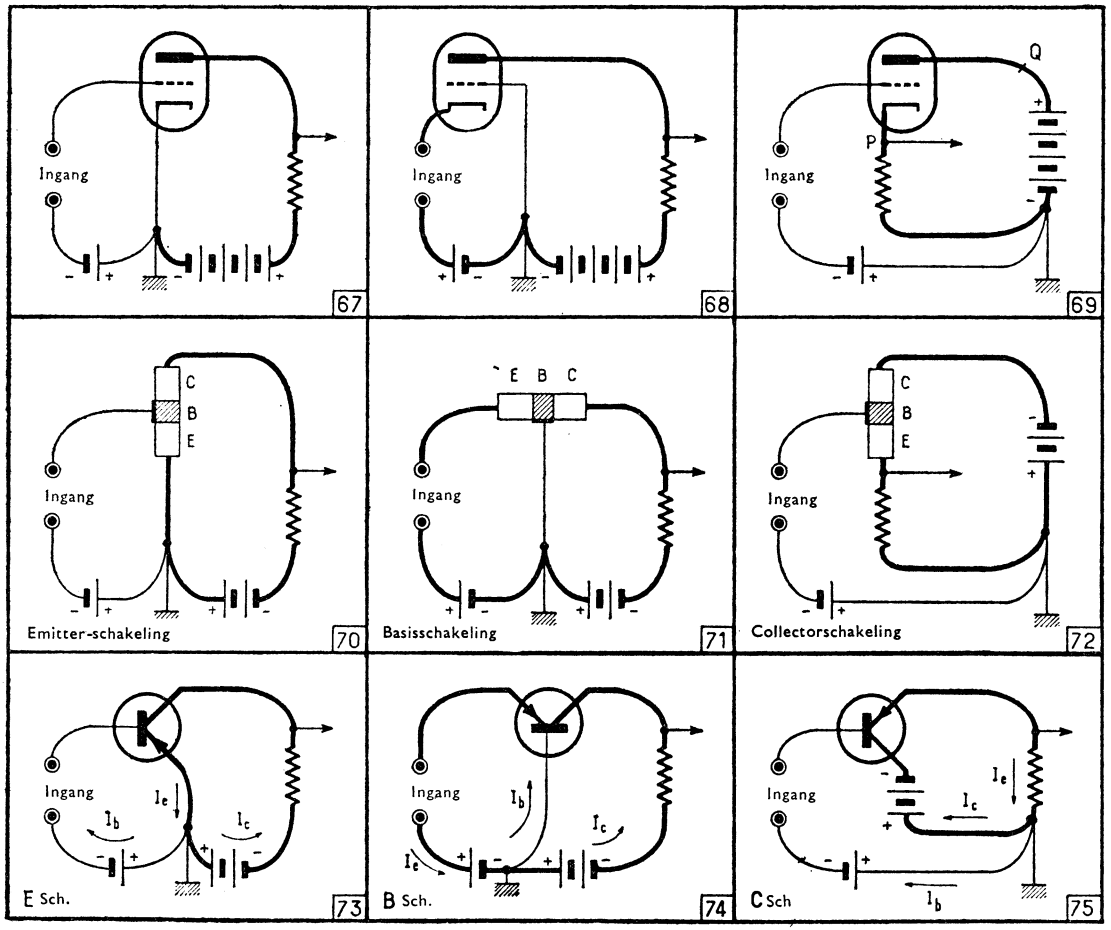


Fig. 67. Buis in kathodeschakeling; het meest gebruikte schema.

Fig. 68. Geaarde roosterschakeling.

Fig. 69. Anodeschakeling (kathodevolger).

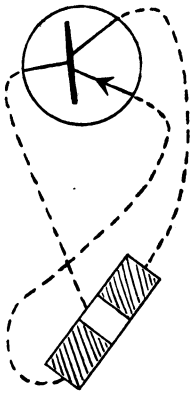
Fig. 70. Emitterschakeling, het meest gebruikt bij transistoren.

Fig. 71. Basisschakeling, die bij transistoren het eerst gebruikt werd.

Fig. 72. Collectorschakeling.

Fig. 73, 74, 75. De drie fundamentele transistorschakelingen in een zodanige vorm gebracht, dat duidelijker te zien valt op welk punt van de uitwendige schakeling de emitterstroom I_e in twee delen wordt gesplitst: de basisstroom I_b en de collectorstroom I_c.

transistor nagaan. Ik vind het nog altijd jammer dat ze dat symbool niet algemeen in gebruik hebben genomen. Daaronder teken ik dezelfde schakelingen met het gebruikelijke symbool. Maar ook in die schema's wil ik de basis- en de collectorkring beslist duidelijk van elkaar onderscheiden, zodat ik niet mijn best gedaan heb om ze met mooie rechte lijnen te tekenen. En verder heb ik de *anodekring* bij de buizen en de *collectorkring* bij de transistoren extra *dik getekend,* zodat deze duidelijk in het oog springen.



Vr. — De schema's lijken werkelijk nog maar weinig op wat ik gewend ben. Maar ze zien er in elk geval niet moeilijk uit. Ik zie, dat ook hier weer drie schakelwijzen bestaan: *de schakeling met gemeenschappelijke emitter, de schakeling met gemeenschappelijke basis* en de *schakeling met gemeenschappelijke collector.*

W. — Dat is zo. Omdat het onbelangrijk is, welk punt van de schakeling aan aarde ligt, spreekt men hier ook liever niet van schakeling met geaarde basis, rooster of collector.

Vr. — In ieder van die schema's is een van de drie gebieden van de transistor zowel met de ingangskring als de uitgangskring verbonden ... Ik voel me eigenlijk net zo onwetend als de man, die niet wist dat wat hij zei altijd proza en nooit poëzie was, want voordat je het over de schakeling met gemeenschappelijke emitter had, heb ik nooit geweten dat die schakeling zo heette.

W. — We hebben ons inderdaad al heel lang met die schakeling bezig gehouden, want hij wordt verreweg het meest gebruikt.

Vr. — Om dezelfde reden als de vanouds gebruikte schakeling van de buis met gemeenschappelijke kathode.

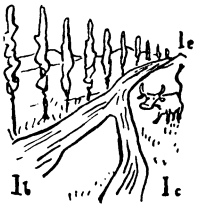
W. — Dat ben ik met je eens. Je weet natuurlijk, dat er met die schakeling, als hij goed is uitgevoerd, een behoorlijk hoge versterking kan worden gehaald, zowel in stroom als in spanning en dus ook in vermogen. Ik wil je er verder nog eens op wijzen, dat in de schakeling met gemeenschappelijke emitter het uitgangssignaal in tegenfaze met het ingangssignaal staat en dat de ingangsweerstand een paar honderd ohm bedraagt, terwijl de uitgangsweerstand enige tientallen kilo-ohm groot is.

Is dat wel een versterker?

Vr. — Ik geloof niet dat ik dat ooit kan vergeten. Zou ik me nu ook op onbekend terrein durven wagen en uitzoeken hoe de schakeling met gemeenschappelijke basis werkt? In die schakeling wordt het ingangssignaal ook weer tussen emitter en basis gezet. Maar nu speelt de emitter voor stuurelektrode en blijft de basis zonder signaal. Indien het ingangssignaal de emitter positiever maakt, neemt de basisstroom toe en de collectorstroom ook; dus moet de spanningsval over de collectorweerstand ook toenemen, waardoor de uitgangsspanning meer naar de positieve kant gaat. Ongetwijfeld staat hier het uitgangssignaal in faze met het ingangssignaal.

W. — Ik ben het helemaal met je uiteenzetting eens, maar je bent nog wat vergeten. Je hebt namelijk niet nagegaan hoe groot in deze schakeling de stroomversterking wordt.

Vr. — Op dat punt kom ik er nog niet helemaal uit. In de ingangskring loopt de emitterstroom I_e, terwijl in het uitgangscircuit slechts de collectorstroom I_c loopt, welke nog iets kleiner is dan de emitterstroom, want deze laatste splitst zich (kijk maar naar het plaatje) in twee delen: de bassistroom I_b en de collectorstroom I_c. En de regels die gelden voor de gelijkstromen zijn eveneens van toepassing voor kleine variaties hiervan, daaruit volgt dat de stroomversterking, dat is de verhouding van een kleine uitgangsstroomvariatie ΔI_c tot een kleine ingangsstroomvariatie ΔI_e



kleiner moet zijn dan één, omdat I_c kleiner is dan I_e. In plaats van een versterking levert de transistor dus eerder een kleine verzwakking. [1]

W. — Dat is zo. Men gebruikt hiervoor de letter α, terwijl de stroomversterking in emitterschakeling met β wordt aangegeven.

Vr. — Ik vind het niet voor de hand liggen, dat ze de eerste letter van het Griekse alfabet hebben gekozen voor de minst gebruikte schakeling.

W. — Dat heeft een historische achtergrond. Toen de transistoren pas uitgevonden waren, bestonden er alleen nog maar puntcontact-transistoren en daar kon je alleen maar stabiele schakelingen mee maken, wanneer je ze in basisschakeling toepaste. Die schakeling werd alzo het eerst gebruikt en daarom geven de transistorfabrikanten nog dikwijls de instelgegevens voor deze schakeling, al komt die maar weinig meer voor.

V. — Uit wat we besproken hebben maak ik op dat, afgezien van een zekere eerbied voor het verleden, de schakeling met gemeenschappelijke basis van weinig belang meer is, omdat deze schakeling niet versterkt, maar verzwakt.

Toch niet alleen van historisch belang

W. — Daar heb je de jeugd weer, die zo vlug is om een definitief oordeel uit te spreken, met alle gevaren van dien! ... Heus er zijn nog heel wat gevallen waarin het de moeite waard is om de basisschakeling toe te passen. Je kunt er hogere frequenties mee versterken dan met de andere schakelingen. En de versterking van die schakeling valt best mee.

Vr. — Ben je van plan me voor de gek te houden? Je hebt het over versterking bij een versterking onder de één? ...

W. — Dat is de stroomversterking. Maar dikwijls heb je meer interesse in spanningsversterking of vermogensversterking. En dan is de basisschakeling heel best te gebruiken. Je moet dat zelf maar eens narekenen, waarbij je erop moet letten, dat in de basisschakeling de transistor een heel lage ingangsweerstand heeft. Deze ligt, afhankelijk van het type, tussen de 3 en de 500 ohm.

Vr. — Dat vind ik eigenlijk heel natuurlijk, want de ingangsweerstand is de verhouding van een kleine ingangsspanningsvariatie tot de erdoor veroorzaakte stroomvariatie. En hier is dan een variatie van de emitterstroom en die is veel groter dan de basisstroom. De ingangsweerstand zal dus ook heel laag worden.

W. — Dat heb je goed beredeneerd. De uitgangsweerstand kan in deze schakeling juist heel hoge waarden bereiken, in de buurt van een megohm.

Vr. — Stommeling die ik ben! Nu zie ik ineens, dat veranderingen van de uitgangs-

---

[1] Het is niet moeilijk de waarde voor de met α aangegeven stroomversterking op te schrijven. Men vindt: $\alpha = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_e} = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_c + \Delta I_b}$ omdat $\Delta I_e = \Delta I_c + \Delta I_b$.

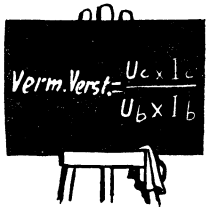
Delen we teller en noemer door ΔI_b, dan krijgen we: $\alpha = \frac{\Delta I_c/\Delta I_b}{\Delta I_c/\Delta I_b + 1}$.

Hieruit ziet men, dat α kleiner is dan één. Verder stelt $\Delta I_c/\Delta I_b$, zoals men zich wel zal herinneren de stroomversterking voor in emitterschakeling. Wij noemden deze grootheid β. Hieruit volgt:

$$\alpha = \frac{\beta}{1+\beta}$$

Voor transistoren met een hoge waarde van β nadert α vrijwel tot één; anders gezegd de uitgangsstroomvariaties zijn vrijwel even groot als de variaties van de ingangsstroom.

stroom, die praktisch even groot is als de ingangsstroom, over de veel hogere uitgangsweerstand een aanzienlijk versterkt uitgangssignaal moeten opwekken. Met de basisschakeling kun je dus een flinke spanningsversterking krijgen.



W. — Dat kan. Je kunt wel een paar duizend maal versterking halen en daarom kan je ook een flinke vermogensversterking bereiken. Jammer genoeg lukt het meestal niet deze versterking nuttig te gebruiken.

Vr. — Je bezorgt me een behoorlijk koude douche, Weetal. Net voel ik weer iets voor de basisschakeling, of je komt al weer met bezwaren. Maar waarom kun je die versterking niet nuttig gebruiken?

W. — Omdat er een goede kans bestaat dat die transistor in basisschakeling gevolgd wordt door andere versterkertrappen, waarvan de ingangsweerstand veel lager is dan de uitgangsweerstand van de eerste trap. Daardoor zou er niet veel overblijven van de hoge versterking die je met een hoge belastingsweerstand dacht te behalen.

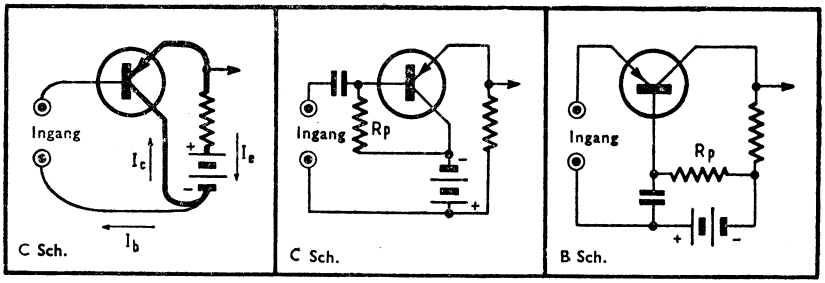


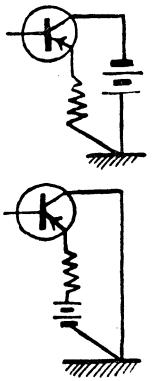
Fig. 76. Door in de schakeling van fig. 75 de batterij en de weerstand in de collectorketen van plaats te verwisselen, ontstaat een variant van de collectorschakeling.

Fig. 77. Methode voor het opwekken van de basisvoorstroom in het schema van fig. 75.

Fig. 78. Methode voor het opwekken van de basisvoorstroom in het schema van fig. 74.

De derde schakeling

Vr. — Nou is het mooi geweest! Ik wil niets meer horen over die vervelende basisschakeling. En ik hoop dat de schakeling met gemeenschappelijke collector mij niet zo zal tegenvallen.



W. — Voordat ik er dieper op in ga, zou ik eerst op willen merken dat er twee varianten van bestaan al naar de voedingsbatterij tussen aarde en collector of tussen aarde en belastingsweerstand is geplaatst. Beide schakelingen komen voor het signaal op hetzelfde neer. Maar bij de tweede schakeling krijgt de basis vanzelf een zekere voorspaning ten opzichte van de emitter.

Vr. — Moet je daar in de eerste schakeling dan een aparte batterij voor gebruiken?

W. — Helemaal niet. Je hoeft alleen maar een weerstand R_p tussen basis en negatieve batterijklem te zetten en alles is voor elkaar, net als bij de emitterschakeling. Ik geef je meteen maar het in de praktijk bij de basisschakeling toegepaste schema voor het opwekken van de basisvoorstroom (zie fig. 78).

Vr. — Daar voel ik meer voor dan voor die twee batterijen die je tot nog toe gebruikt hebt in de schema's voor het uitleggen van de theorie, ook al denken de batterijfabrikanten daar misschien iets anders over... Maar om weer op de collectorschakeling terug te komen, ook bij deze schakeling is het uitgangssignaal weer in faze met het ingangssignaal. Want een negatief gaand signaal op de basis laat de emitterstroom sterk toenemen, waardoor de spanningsval over de belastingsweerstand toeneemt en de emitterspanning naar beneden gaat.

W. — Dat klopt, Vraagal. Van de drie schakelingen die we bekeken hebben, kan alleen de emitterschakeling de faze omdraaien. Laten we nu eens kijken wat voor stroomversterking we krijgen.

Vr. — Over de ingangsklemmen loopt hier de basisstroom, die altijd heel klein is. Aan de uitgang loopt de emitterstroom, dat is de grootste van de drie. Daaruit volgt, dat deze schakeling een nog grotere stroomversterking moet geven dan de emitterschakeling. Heb je er bezwaar tegen, dat ik voor die stroomversterking maar weer een letter uit het Griekse alfabet haal en hem gamma noem?[1])

W. — Ik geloof niet, dat de oude Grieken daar bezwaar tegen zouden hebben. En jij voelt je natuurlijk gelukkig met die schakeling waar je zo'n grote versterking mee kunt halen. Vind je het erg, als ik je jeugdig enthousiasme al weer probeer te bekoelen?

Vr. — Ik denk, dat je me weer een reuze teleurstelling bezorgt door te vertellen dat bij deze schakeling de inwendige weerstanden zodanige waarden hebben, dat je in de praktijk niet veel kunt doen met die stroomversterking.

W. — Ik zal je de treurige waarheid moeten onthullen. Je vermoeden is inderdaad juist. Bij deze schakeling is, evenals bij de overeenkomende kathodevolgerschakeling de ingangsweerstand erg hoog (deze kan wel een megohm worden), en de uitgangsweerstand erg laag (tussen de 50 en de 500 ohm).

Vr. — Dat is net andersom als bij de basisschakeling! Kunnen we met die schakeling dan nog wel spanningsversterking halen?

W. — Dat gaat inderdaad niet, Vraagal. Je had dat al kunnen uitrekenen, als je er op had gelet dat de belastingsweerstand bij deze schakeling een heel sterke tegenkoppeling oplevert. Wanneer de basiswisselspanning tijdelijk negatief is, neemt de basisstroom toe, en daarmee ook de emitterstroom, waardoor de emitter meer negatief wordt, wat de ingangsverandering tegenwerkt.

Vr. — Wat voor nut heeft die schakeling dan, als je er toch geen spanningsversterking mee kunt krijgen?

W. — Hij wordt soms gebruikt voor het leveren van de sterke stroom die nodig is om een vermogenstransistor te sturen, of ook wel als voor een juiste aanpassing een lage uitgangsweerstand nodig is, zoals bij directe koppeling van een luidspreker aan de eindtransistor.

---

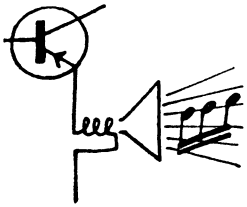
[1] De stroomversterking is in de collectorschakeling:

$$\gamma = \frac{\Delta I_e}{\Delta I_b} = \frac{\Delta I_c + \Delta I_b}{\Delta I_b} = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} + \frac{\Delta I_b}{\Delta I_b} = \beta + 1$$

Hieruit ziet men, dat bij de collectorschakeling de stroomversterking hoger is dan bij de emitterschakeling. Het is mogelijk een betrekking op te schrijven voor het verband tussen de drie stroomversterkingen. Men vindt:

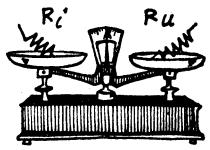
$$\alpha \times \gamma = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_e} \times \frac{\Delta I_e}{\Delta I_b} = \frac{\Delta I_c}{\Delta I_b} = \beta$$

Vr. — Ik zie dat het oude gezegde, dat de waarheid in het midden ligt, ook hier weer van toepassing is. Bij transistoren ligt die juiste middenweg beslist bij de emitterschakeling, waar de ingangs- en de uitgangsweerstand redelijke waarden hebben, zodat je er een redelijke versterking mee kunt bereiken zowel in stroom, spanning als vermogen.



W. — Je hebt gelijk, Vraagal. De waarden van de in- en uitgangsweerstand kunnen worden vergeleken met twee schalen van een balans. Terwijl ze bij de emitterschakeling behoorlijk in evenwicht zijn, gaat de schaal van R_i bij de basisschakeling sterk naar beneden, maar bij de collectorschakeling gaat hij juist omhoog en gaat R_u naar beneden. En als je me belooft het aan niemand te vertellen, zal ik je een geheim verklappen: Voor een bepaalde transistor is het produkt van ingangs- en uitgangsweerstand ($R_i \times R_u$) bij alle drie de schakelingen even groot.

Vr. — Daaruit begrijp ik, dat als je in emitterschakeling een R_i van 500 ohm en een R_u van 20 kilo-ohm had, het produkt 10 000 000 is. Dezelfde transistor in basisschakeling zou dan, laten we zeggen, een ingangsweerstand $R_i = 50$ ohm hebben; om het produkt constant te houden, zou de uitgangsweerstand 200 kilo-ohm moeten zijn. En als in collectorschakeling de R_i 200 000 ohm is, zou R_u 50 ohm moeten zijn... Als je het goed vindt, maak ik van de belangrijkste eigenschappen van de drie door ons bestudeerde schakelingen een vergelijkingstabel.



W. — Dat vind ik een reuze idee. En daarmee zullen we meteen maar een eind maken aan dit gesprek, waarin we een heel stuk opgeschoten zijn.[1])

---

[1] In de voetnoot op de vorige bladzijde hebben we een heel eenvoudige betrekking gevonden tussen de waarden van de stroomversterking bij de drie mogelijke schakelingen:

$$\beta = \alpha \times \gamma \text{ of } \alpha = \frac{\beta}{\gamma}$$

Onderstaande tabel geeft direct het verband aan tussen de waarde van de stroomversterking in de ene schakeling en die in de andere twee schakelingen:

SCHAKELING	EMITTER	BASIS	COLLECTOR
EMITTER	β	$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$	$\beta = \gamma - 1$
BASIS	$\alpha = \frac{\beta}{1+\beta}$	α	$\alpha = \frac{\gamma - 1}{\gamma}$
COLLECTOR	$\gamma = 1+\beta$	$\gamma = \frac{1}{1-\alpha}$	γ

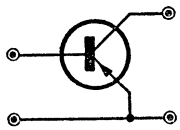
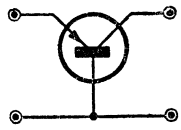
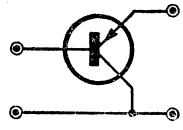
Schakeling	Emitterschakeling	Basisschakeling	Collectorschakeling
Schema			
Ingangsweerstand r_i	$\Delta U_b/\Delta I_b$ 200 à 2000 ohm	$\Delta U_e/\Delta I_e$ 3 à 500 ohm	$\Delta U_b/\Delta I_b$ 0,2 à 1 megohm
Uitgangsweerstand r_u	$\Delta U_c/\Delta I_c$ 10 à 100 kilo-ohm	$\Delta U_c/\Delta I_c$ 0,5 à 2 megohm	$\Delta U_e/\Delta I_e$ 50 à 500 ohm
Stroomversterking	$\beta = \Delta I_c/\Delta I_b$ 20 à 200	$\alpha = \Delta I_c/\Delta I_e$ minder dan 1	$\gamma = \Delta I_e/\Delta I_b$ 20 à 200
Spanningsversterking	Verscheidene honderden	Verscheidene honderden of duizenden	Ongeveer 1
Vermogensversterking	Verscheidene duizenden	Verscheidene honderden	Verscheidene tientallen
Faze van het uitgangssignaal ten opzichte van het ingangssignaal	Tegenfaze	In faze	In faze
Toepassing	Algemeen Als versterker en fazedraaier	Voor zeer hoge frequenties Aanpassing op een bron met lage R_i; voor het signaal-leveren aan een hoge belastingsweerstand	Voor het verkrijgen van een hoge ingangsimpedantie Voor het signaal-leveren aan een lage belastingsweerstand

Fig. 79. Tabel met de voornaamste gegevens van de drie fundamentele transistorschakelingen.

TWEE BRIEVEN

AANPASSINGSMOEILIJKHEDEN

Evenals (en wellicht meer dan) dit bij buizenschakelingen het geval is, vormt de kwestie van de impedantie-aanpassing een probleem van de eerste orde bij het opzetten van transistorschema's.
Vraagal blijkt echter nogal wat moeite te hebben met dit probleem, omdat hij een manco heeft in zijn kennis van de grondbeginselen van de elektrotechniek. Weetal ziet zich dan ook genoodzaakt daar iets aan te doen. Hij behandelt met zijn vriend die grondbeginselen, waarvan de kans groot is dat heel wat technici ze nog niet helemaal hebben begrepen . . . (N.B.: de lezer die alles van impedantie-aanpassing afweet, behoeft deze brieven niet te lezen).

Samenvatting: Spanningsbronnen en belastingen. — Elektromotorische kracht en inwendige weerstand. — Klemspanning. — Spanningssturing. — Stroomsturing. — Voorwaarde voor maximale vermogensoverdracht. — Impedantie-aanpassing. — Gebruik van een transformator. — Gunstigste transformatieverhouding.

Brief van Vraagal aan Weetal

Beste Weetal,

Al kan ik door een vervelende griepaanval niet bij je komen, ik kan toch wel nadenken over alles wat je me de laatste keer hebt verteld.
Daarbij heb ik gemerkt, dat je veel belang hecht aan het probleem van de in- en de uitgangsweerstand. De waarden daarvan veranderen met de gekozen schakeling en je hebt meer dan eens aangedrongen op het belang van een zo goed mogelijke aanpassing van die weerstanden.
Ik geef toe, dat ik dat deel van je uiteenzetting niet zo erg goed begrepen heb. En ik voel me als een halfgeleider van P-materiaal: Ik heb last van open plekken!
Zou je die gaten kunnen opvullen? Bij voorbaat dank. Je vriend Vraagal.

Antwoord van Weetal aan Vraagal

Mijn arme Vraagal,

Je bent wel heel erg door het lot getroffen! Je lijdt zowel aan griep, als aan hinderlijke gaten in je kennis . . .
De eerste kwaal zal ik maar aan de zorgen van de dokter overlaten, maar ik zal mijn best doen je van de tweede af te helpen.
Ik geef toe, dat het probleem van het vinden van de juiste aanpassingsweerstand of (meer algemeen) impedantie heel belangrijk is. En je zou me een plezier doen als je dit goed bestudeerde.
In alle schema's die we zullen gaan bekijken, gaat het er om elektrische energie van het ene element naar het andere over te brengen met zo min mogelijk verliezen. Anders gezegd: met een zo groot mogelijk nuttig effect.
Er is dus altijd sprake van een element waar de energie uitstroomt en van een tweede element waar de energie naar toe gaat. Vanuit dit laatste element bekeken, vormt het eerste een energiebron en vanuit de energiebron gezien, vormt het tweede element (waaraan de energie wordt geleverd) een verbruiker. Kort gezegd: leverancier en afnemer.

Vergeef me, Vraagal, dat ik deze grondwaarheden zo naar voren haal door ze een beetje van de filosofische kant te bekijken. In het leven kom je overal energiebronnen en verbruikers tegen. De zaklantaarnbatterij is een bron en de gloeidraad van het lampje dat er door wordt gevoed, is de verbruiker. De generatoren uit de elektrische centrale vormen een bron en alle verlichtings- en verwarmingsapparaten die met het net verbonden zijn vormen de belasting.
Op dezelfde manier vormt de antenne van een ontvanger een bron en de ingangskring van de HF.-voorversterker die er mee verbonden is, de belasting. Volgens hetzelfde principe is de eindbuis de bron en de luidspreker de belasting.
Wanneer we transistorschema's bekijken, vormt op precies dezelfde manier de uitgang van iedere transistor de bron voor de ingang van de volgende trap die de belasting levert.
Maar wat heeft het voor zin er nog meer voorbeelden bij te halen. Beter is het om je duidelijk in je geheugen te prenten, dat een energiebron door twee grootheden wordt bepaald:
1. De *elektromotorische kracht.* Dat is de maximale spanning die de bron kan leveren: je zou kunnen zeggen dat deze waarde aangeeft hoeveel fut er in zit...
2. De *inwendige weerstand.* Want als een spanningsbron stroom levert, ondervindt die stroom altijd een bepaalde inwendige weerstand. Meer in het algemeen wordt van *inwendige impedantie* gesproken.

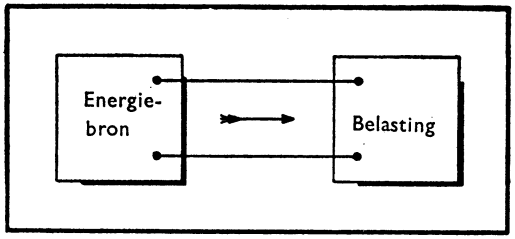


Fig. 80. Schema waarin in de meest algemene vorm is aangegeven hoe energietransport van een energiebron naar een verbruiker plaats vindt.

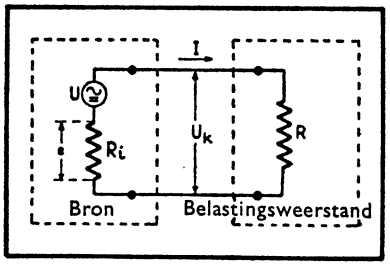


Fig. 81. De elektromotorische kracht U (gelijk- of wisselspanning) levert een stroom I via zijn inwendige weerstand R_i (waarover een spanningsverlies U_v ontstaat) en de uitwendige weerstand R, ook wel belastingsweerstand genoemd (waarover de klemspanning U_k ontstaat).

Je moet goed onthouden, dat de spanningsval welke bij stroomdoorgang over de inwendige weerstand R_i ontstaat, moet worden afgetrokken van de elektromotorische kracht U. De overblijvende spanning heet klemspanning U_k en deze spanning staat over de belastingsweerstand R. De klemspanning U_k zal dus lager zijn dan EMK U, waarbij het verschil tussen deze twee spanningen evenredig met de stroomsterkte I is. Daaruit volgt zonder meer, dat bij een stroomsterkte nul de klemspanning gelijk is aan de EMK. Men noemt dit de open spanning. Deze treedt op bij een oneindig hoge belastingsweerstand.

Ik hoop dat je koorts er niet erger door wordt, maar ik wilde je toch voorstellen een eenvoudig sommetje te maken. De totale weerstand in de keten bedraagt R + R. Daaruit volgt volgens de Wet van Ohm voor de stroomsterkte:

$$I = \frac{U}{R_i + R}$$

Over de inwendige weerstand R_i veroorzaakt die stroom een spanningsval:

$$U_v = \frac{UR_i}{R_i + R}$$

en over de belastingsweerstand R staat een spanningsverschil:

$$U_k = \frac{UR}{R_i + R}$$

Als je nog een potloodje kunt vinden, moet je die twee spanningen maar eens optellen, dan komt er:

$$U_v + U_k = U$$

hetgeen je ook kon verwachten. Je ziet, dat de EMK gelijk is aan de som van twee spanningen: de inwendige spanningsval U_v en de spanningsval over de belasting U_k. De laatstgenoemde spanning kan op de klemmen van de spanningsbron worden gemeten. Deze spanningen verhouden zich evenredig met de weerstanden van bron en belasting. Indien de inwendige weerstand van de spanningsbron heel klein is in vergelijking met de belastingsweerstand, staat over de inwendige weerstand slechts een geringe spanningsval. De klemspanning U_k is dan maar weinig lager dan de EMK U. In dat geval zullen variaties van de EMK praktisch even grote variaties over de belasting teweeg brengen en hebben wij te doen met *spanningssturing.*

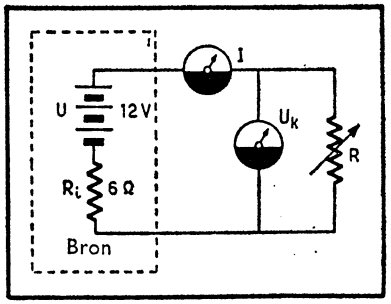


Fig. 82. Opstelling om de krommen van fig. 83 op te nemen. Omdat de batterij slechts een geringe inwendige weerstand bezit, is voor deze proef in serie hiermede een extra weerstand R_i aangebracht, die tezamen met de inwendige weerstand juist 6 ohm oplevert. De stroommeter I moet een zeer laag spanningsverlies hebben en de spanningsmeter U_k mag slechts heel weinig stroom opnemen, willen de experimenteel gevonden resultaten met de theorie kloppen.

Nemen we het omgekeerde geval: de inwendige weerstand R_i van de spanningsbron is veel hoger dan die van de belasting. Er staat dan een niet te verwaarlozen spanningsval over die inwendige weerstand. En de spanning U_k die over de klemmen van de belastingsweerstand over blijft, is veel kleiner dan de EMK U. Nu staan de zaken er zo voor, dat de spanning over R evenredig is met I en dus de variaties van I meemaakt, terwijl I zelf vrijwel niet van R afhangt. Immers R_i is veel groter dan R. Men noemt deze situatie *stroomsturing.* Bij transistoren kunnen deze beide uiterste gevallen voorkomen, maar in het algemeen is het ook daar het beste de juiste middenweg te kiezen.

Wanneer twee versterkerbuizen met elkaar moeten worden gekoppeld, streeft men ernaar op de ingang van de tweede buis een zo hoog mogelijke spanning te bereiken. En in dit geval treffen wij het bijzonder goed, want de impedantie tussen rooster en kathode is bij een buis meestal oneindig hoog. Hier werkt de EMK voor de volle 100% als sturing tussen rooster en kathode, dat is dus een geval van zuivere spanningssturing.

Maar beste Vraagal, bij transistoren staan de zaken er anders voor: op de ingangsklemmen moet niet alleen spanning, maar ook vermogen worden geleverd omdat, hoe de waarden van de onderdelen ook zijn gekozen, er altijd stroom loopt. Erg onwetenschappelijk gezegd, buizen zijn tevreden met volts. Maar transistoren waar je volts op zet, nemen tegelijkertijd ampères op. En volts maal ampères geeft watts.

Verder is het probleem van de vermogensoverdracht niet zo eenvoudig. Daar moet je zelf maar eens induiken.

Het is namelijk de bedoeling zoveel mogelijk vermogen aan de belasting te leveren, dat wil zeggen de hoogste stroomsterkte bij de hoogste spanning.

Zou je het leuk vinden samen eens na te gaan, hoe groot de belastingsweerstand moet zijn om dit het beste te bereiken?

Als de belastingsweerstand klein is ten opzichte van de inwendige weerstand, zal er ook een grote stroom lopen. Dat ziet er goed uit! Maar de spanning over die kleine belastingsweerstand zal toch maar klein blijven, want de grote stroomsterkte veroorzaakt een grote spanningsval over de inwendige weerstand en dat ziet er weer minder goed uit!

Laten we de andere kant eens opgaan. We nemen een belastingsweerstand, die veel groter is dan de inwendige weerstand. Dan komt (net als bij de radiobuizen) bijna de gehele EMK over de belasting te staan. Dat lijkt in orde! Maar de stroomsterkte is maar heel klein. En dat is weer helemaal mis! . . .

Je zult nu wel kunnen raden, Vraagal, dat ook hier weer de beste oplossing is om de juiste middenweg te kiezen: een belastingsweerstand die niet veel groter, maar ook niet veel kleiner is dan de inwendige weerstand.

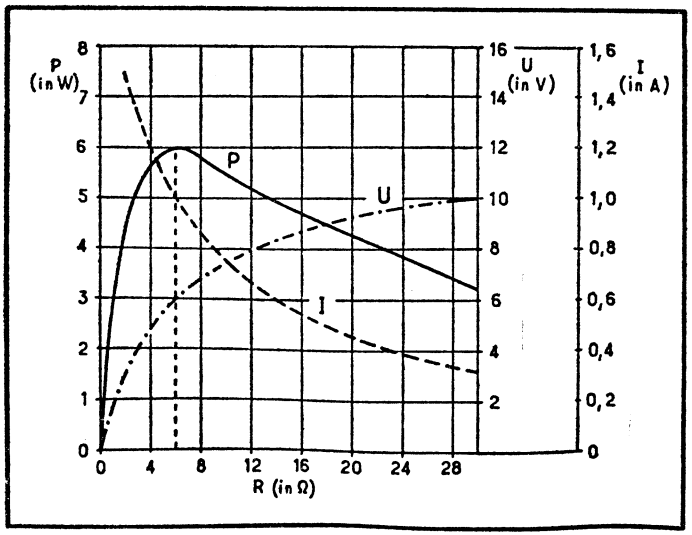


Fig. 83. Grafische voorstelling waarin het vermogen P dat in de weerstand R wordt geleverd, benevens de klemspanning U en de stroom door de weerstand I zijn uitgezet als functie van de waarde van de belastingsweerstand R. Men dient er op te letten, dat voor P, U en I verschillende schalen gebruikt zijn.

Anders gezegd: *het vermogen wordt het best overgebracht wanneer de belastingsweerstand even groot is als de inwendige weerstand.* Wanneer hieraan is voldaan, zegt men dat er aanpassing tussen de weerstanden of (meer algemeen) de impedanties bestaat. Om dit beter in je geheugen te prenten, heb ik de moeite genomen een grafiek te tekenen waarin het overgebrachte vermogen P, de stroomsterkte I en de klemspanning U_k als functie van de belastingsweerstand R zijn uitgezet voor een spanningsbron met EMK U = 12 V en inwendige weerstand R_i = 6 ohm. Daaruit kun je zien, dat al naar gelang R toeneemt, I daalt en R stijgt. Hun produkt P bereikt snel een maximale waarde bij $R = R_r = 6$ ohm en daalt hierna weer langzaam. Vind je die grafiek niet overtuigend?
Nu moet je niet denken dat voor optimale energie-overdracht ook altijd volledige aanpassing nodig is. Bijkomstige eisen, zoals bijvoorbeeld het bereiken van een goede lineariteit, kunnen soms leiden tot een afwijkende keuze van de belastingsweerstand. Maar ik heb zo'n idee, dat er al lang een vraag bij je opgekomen is: hoe kun je twee onderdelen met sterk verschillende impedantie laten samenwerken zonder al te veel energieverlies? Hoe zou je bijvoorbeeld in ons geval een transistor met lage ingangsweerstand moeten laten sturen door een andere transistor met hoge uitgangsweerstand? Hoe zou je de spreekspoel van een luidspreker koppelen aan de hoge inwendige weerstand van een eindbuis? Of hoe moet je een elektrodynamische pickup met lage weerstand aan een versterkerbuis met zeer hoge ingangsimpedantie worden gekoppeld . . . ?

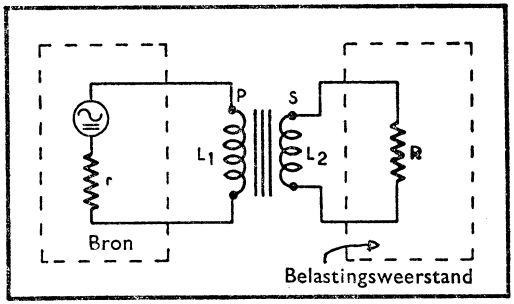


Fig. 84. Om de onderling afwijkende impedanties van spanningsbron en belasting op elkaar aan te passen, wordt een transformator met juist gekozen windingsverhouding toegepast.

Het antwoord zul je wel kunnen raden: Onze oude vriend de transformator, kan dienst doen als impedantieaanpassingslid. En let daar goed op, het gaat bij een transformator om de verhouding tussen de primaire en de secundaire. Natuurlijk moet de primaire aanpassing geven op de spanningsbron. Ook de impedantie van de secundaire moet zijn aangepast op de belastingsweerstand.
Wanneer je het precies berekent, blijkt dit neer te komen op evenredigheid van de impedanties van de transformatorwikkelingen met de uitwendige impedanties.

Nu weet je wel, dat de impedantie van een spoel gelijk is aan de zelfinductie vermenigvuldigd met $2\pi f = \omega$. Als je de zelfinductie van de primaire L_1 noemt en die van de secundaire L_2, krijg je:

$$\frac{R_i}{R} = \frac{\omega L_1}{\omega L_2} = \frac{L_1}{L_2}.$$

Dan mag ik je er verder nog eens aan herinneren, dat de zelfinductie evenredig is met het kwadraat van het aantal windingen. Als we de aantallen windingen van de primaire en van de secundaire met N_1 en N_2 aangeven, kunnen we opschrijven:

$$\frac{R_i}{R} = \frac{L_1}{L_2} = \frac{N_1^2}{N_2^2} = \left[\frac{N_1}{N_2}\right]^2$$

En, Vraagal, waar hebben wij die verhouding N_1/N_2 meer gezien? Herinner je je, dat die verhouding van de aantallen windingen, transformatieverhouding (n) genoemd wordt? Je kunt dus zeggen dat:

$$\frac{R_i}{R} = n^2, \text{ waaruit volgt } n = \sqrt{\frac{R_i}{R}}$$

Dit is een formule die je onthouden moet. Wanneer je een eindbuis neemt met een inwendige weerstand R = 9000 ohm en je wilt deze aanpassen aan een luidspreker met

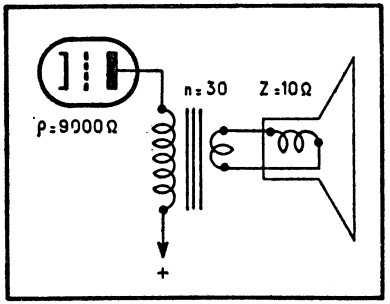


Fig. 85. Luidsprekertransformator, die de lage spreekspoelimpedantie van de luidspreker aanpast aan de hoge inwendige weerstand van de eindbuis.

een spreekspoelimpedantie van 10 ohm, dan moet je ze aan elkaar koppelen via een transformator met een windingsverhouding van:

$$n = \sqrt{\frac{9000}{10}} = \sqrt{900} = 30.$$

Hiermee stop ik, want anders zou ik weer verknoeien wat de dokter met aspirine goed heeft gemaakt. Spoedig beterschap!

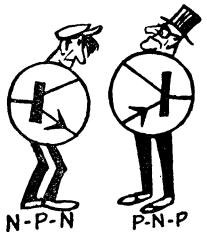
Je vriend Weetal.

TIENDE PRAATJE

VERSCHILLENDE KOPPELMETHODEN

Bij hun vorige gesprekken hebben Weetal en Vraagal het over schakelingen gehad, waarin maar één transistor voorkwam. Nu ze daar genoeg van weten, gaan ze ook eens kijken hoe een aantal transistoren samenwerken. Daartoe worden in ontvangers koppelnetwerken tussen de transistoren aangebracht. Deze moeten een zo groot mogelijk deel van de door een transistor geleverde energie naar de volgende transistor overbrengen. Wij zien dat, naast de klassieke koppelnetwerken uit de buizentechniek, nog gebruik kan worden gemaakt van een aantal vernuftig gekozen combinaties van transistoren. Vraagal raakt hierdoor wel een beetje in de war, maar na verloop van tijd begint hij enthousiast te worden . . .

Samenvatting: Fundamentele transistorschakelingen met N-P-N-transistoren. — Voor- en nadelen van transformatorkoppeling. — Geluidssterkteregeling. — RC-koppeling. — Waarde van de koppelcondensator. — Gelijkstroomkoppeling. — Gelijkstroomversterkers. — Schema's met complementaire transistoren. — Serieschakelingen van transistoren.



Vraagal. — Naar mijn smaak heb je de laatste tijd de N-P-N-transistoren nogal verwaarloosd, Weetal, want je heb alleen maar over P-N-P-transistoren gepraat.

Weetal. — Daar had ik twee redenen voor. De eerste reden is, dat de P-N-P-transistor verreweg het meeste voorkomt. En de tweede reden is, dat alles, wat wij over de P-N-P hebben gezegd, evengoed van toepassing is op de N-P-N, waarbij alleen de polariteit van de voedingsspanningen moet worden omgedraaid, evenals die van de elektrolytische condensatoren, voor zover die zijn gebruikt.

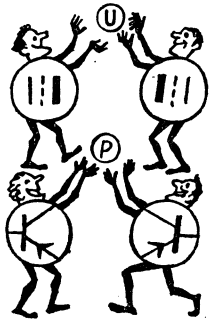
Vr. — Dat heb ik ook gedaan toen ik de drie fundamentele schakelingen van de vorige keer heb overgetekend voor N-P-N-transistoren. Ik had het behoorlijk te pakken, toen ik die schema's tekende.

W. — Overdrijf niet zo! Als ik zie hoe goed je die schema's hebt getekend, dan deden je hersens het nog best, al had je dan een beetje griep.

Vr. — Ik hoop dat je gelijk hebt, want ik wil gauw beginnen met de studie van volledige versterker- en ontvangerschema's. Verder heb ik zo'n idee, dat alles wat voor buizen is uitgezocht, even goed op transistoren kan worden toegepast, wanneer natuurlijk rekening wordt gehouden met de waarden van hun in- en uitgangsweerstand.

Een fundamenteel verschil

W. — Krek, wat je zegt, meneer Vraagal. Natuurlijk kunnen alle koppelnetwerken ook bij transistoren dienst doen. Maar er is toch één diepgaand verschil: in schema's met buizen levert iedere trap *spanning* aan de volgende trap. Alleen de uitgangstrap wordt in de meeste gevallen wel met spanning gestuurd, terwijl hij vermogen afgeeft. In tegenstelling hiermee levert iedere trap in een transistortoestel *vermogen* aan de volgende trap, zodat alle trappen vermogensversterkers moeten zijn. Volgen wij de versterker van in- naar uitgang, dan neemt alzo het vermogen voortdurend toe.



Vr. — Ik zie in dat er wel enig verschil is. Je hebt me in je brief heel duidelijk uitgelegd, dat je de waarde van de belastingsweerstand hoog moet kiezen om een zo groot mogelijke spanningsversterking te krijgen. In schema's met buizen wordt dat ook doelbewust zo gedaan. Dat gaat daar heel goed, omdat de uitgangsweerstand bij buizen zeer hoog is. Maar bij de transistoren, waar we het nu over hebben, moeten we er op letten zoveel mogelijk vermogen van de ene trap naar de andere over te brengen. Daarvoor moet de belastingsweerstand even groot zijn als de generatorweerstand. En in de drie schakelingen voor transistoren hebben de in- en de uitgangsweerstand totaal verschillende waarden. Daarom vind ik het volkomen logisch dat je altijd een transformator moet gebruiken voor aanpassing van de impedanties. Dat lijkt me beslist de enig mogelijke oplossing voor het koppelen van transistortrappen.

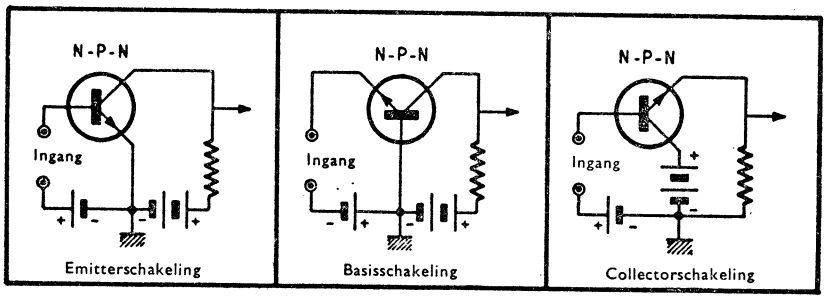
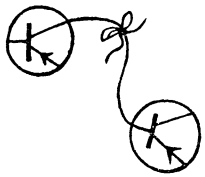


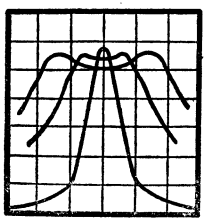
Fig. 86. De drie fundamentele transistorschakelingen bij gebruik van N-P-N-transistoren. Men lette op de polariteit van de gebruikte batterijen.



W. — Hè, wat draaf je weer door! Ik kan wel zien, dat je nog jong bent. Het is jammer, dat ik je zal moeten teleurstellen, maar ook bij transistoren blijkt de weerstandskoppeling (en meer algemeen de impedantiekoppeling) bestaansrecht te hebben. Het is zelfs mogelijk het bij transistoren helemaal zonder koppelnetwerken te doen en de uitgang van de ene trap direct aan de ingang van de volgende te knopen. Ik kom daar nog op terug.

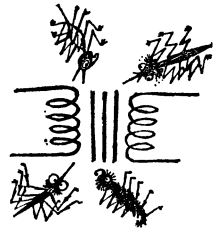
Vr. — Wat? Alleen maar met een draadje?

De transformator heeft ook nadelen



W. — Ja dat kan. Maar laten we bij het begin beginnen. En omdat je zoveel voor het gebruik van transformatoren voelt, zullen we die maar het eerst bij de kop nemen. Over één belangrijke eigenschap van transformatoren heb je het al gehad: met een transformator kun je de uitgangsimpedantie van de ene trap nauwkeurig op de ingangsimpedantie van de volgende trap aanpassen. Daarmee weet je dan zeker, dat je de best mogelijke vermogensoverdracht krijgt. Maar transformatoren hebben nog andere voordelen. De spanningsval over de lage ohmweerstand van de wikkelingen is zo gering, dat heel lage gelijkspanningen kunnen worden gebruikt. En dan moet je vooral niet vergeten, dat in hoogfrequent- of middenfrequenttrappen de primaire of de secundaire wikkeling van de transformator, of beide, kunnen worden afgestemd om de gewenste mate van selectiviteit te bereiken. Door de koppeling tussen de beide windingen te variëren, is het ook nog mogelijk de bandbreedte te regelen.

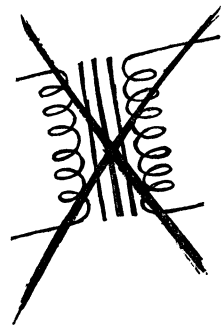
Vr. — Je bent het dus met me eens dat een transformator alleen maar voordelen oplevert. En ik zie niet in waarom . . .
W. — Dan zal ik je ook de keerzijde van de medaille moeten laten zien. Allereerst, hoe klein de onderdelen in de toekomst ook zullen worden, transformatoren zullen altijd meer ruimte innemen dan de onderdelen voor een RC-koppeling. Althans in het audiogebied, want voor hogere frequenties gebruikt iedereen transformatoren. Maar daartegenover staat, dat transformatoren voor geluidsfrequenties te duur zijn om met weerstandskoppelingen te kunnen concurreren.
Vr. — Ik vind het maar een kleinzielig gedoe om geen transformatoren te gebruiken vanwege de kosten of de benodigde ruimte!
W. — De toestelconstructeurs doen niet aan filantropie en als hun om steeds kleinere toestellen wordt gevraagd, kunnen ze zowel kosten als ruimte besparen door geen transformatoren te gebruiken. Overigens hebben transformatoren nog een nadeel, wanneer zij in de ingangsketen van een versterker worden gebruikt en de versterking hoog is.
Vr. — Wat is dat nou weer?
W. — In de ruimte lopen altijd krachtlijnen van parasitaire bromvelden en die kunnen door transformatoren met hun vele windingen gemakkelijk worden opgevangen, zodat de versterker gaat brommen. Om hier iets tegen te doen, heb je dikke afschermmantels nodig van speciaal materiaal, dat ook weer duur en zwaar is.



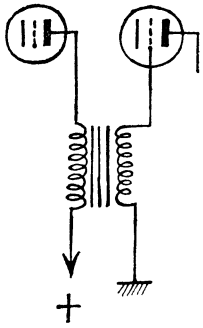
En nu echte versterkerschema's

Vr. — Die arme transformatoren krijgen ook overal de schuld van! . . . Maar ook al is dat zo, ik zou toch graag van je horen hoe transformatoren geschakeld moeten worden, in die gevallen waar toepassing van transistoren economisch verantwoord is en weinig gevaar voor inductiestoringen bestaat.
W. — Een dergelijk schema komt vrijwel geheel overeen met dat wat we bij buizen gebruiken. Zoals je ziet (blz. 100), heb ik twee transistoren in emitterschakeling getekend. De eerste wordt gestuurd via TR1 en de koppeling *tussen* de transistoren wordt verzorgd door TR2. De laatstgenoemde transformator moet een secundaire hebben met veel minder windingen dan de primaire. Als de uitgangsweerstand van de eerste transistor 20 000 ohm is en de ingangsweerstand van de tweede 250 ohm, moet de transformatieverhouding voor aanpassing gelijk worden aan:

$$n = \sqrt{\frac{r_o}{r_i}} = \sqrt{\frac{20000}{250}} = \sqrt{80} = \text{circa } 9.$$



Op die manier krijgen we in de secundaire een negenmaal zo sterke stroom als in de primaire.
Vr. — Ik zie, dat de spanningsdelers R_1-R_2 en R_3-R_4 voor de juiste instelling van de basisspanningen zorgen en dat ontkoppelcondensatoren zijn aangebracht. Verder zie ik, dat je in de emitterkringen weerstanden R_5 en R_6 hebt aangebracht voor temperatuurcompensatie.
W. — Heel goed, Vraagal! Je geheugen heeft gelukkig niet onder de griep te lijden gehad.



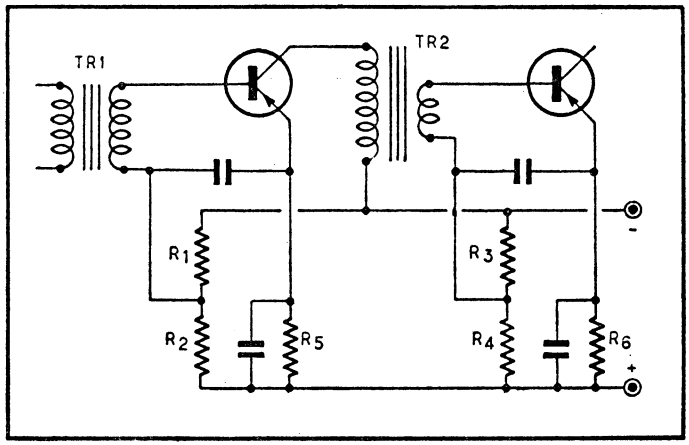


Fig. 87. Twee transistoren in emitterschakeling met transformatorkoppeling. Voor de koppeling van het ingangssignaal met de eerste trap is eveneens een transformator gebruikt.

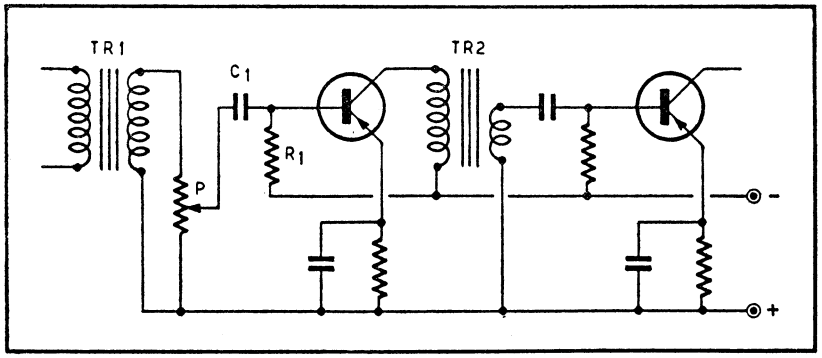
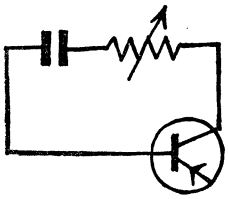
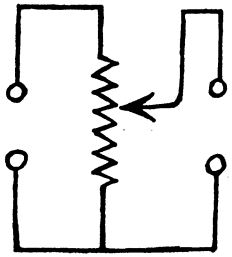


Fig. 88. Schakeling, waarin zowel van transformatoren als van RC-netwerken gebruik gemaakt is, met versterkingsregeling door middel van een potentiometer P.



Vr. — Als ik het schema van jou bekijk, vraag ik me af, hoe je er in slaagt de geluidssterkte te regelen.
W. — Daarvoor moet je de versterking regelen. Dat zou je kunnen bereiken door een regelbare mate van tegenkoppeling toe te passen. Persoonlijk vind ik dat een buitengewoon onsympathieke methode. Verder kun je daarmee de versterking niet nul maken als je het geluid geheel weg wilt draaien. En zo verander je tegelijk met de geluidssterkte ook het vervormingspercentage, dat juist maximaal is bij de hoogste geluidsssterkte.
Vr. — En hier valt het juist het minst mee, om die vervorming aan te horen. Maar hoe wil je het dan doen?

W. — Als je de versterkingsregeling niet direct bij de ingang van de versterker toepast, waarom zou je dan geen potentiometer P over de uitgang van de ingangstransformator zetten om er een variabel gedeelte van het signaal mee op de basis van de eerste transistor te kunnen zetten. Het lukt in dat geval zonder moeite de geluidssterkte te regelen. Tussen loopcontact en basis wordt een koppelcondensator aangebracht en de voorstroom wordt ingesteld met weerstand R_1. De tweede transistor wordt op vrijwel dezelfde manier geschakeld (fig. 88).



Vr. — Dat tweede schema vind ik een beetje halfslachtig: je hebt daarin zowel van transformatoren, als van weerstanden en condensatoren gebruik gemaakt.

W. — Ik erken, dat je in dit schema de eenvoud van het 100% transformator-

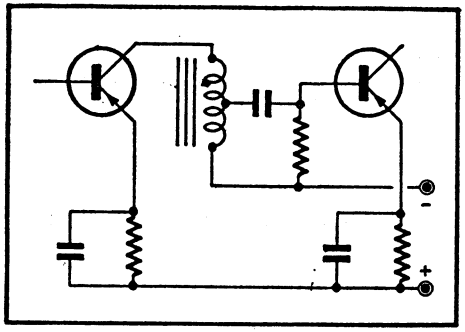


Fig. 89. Koppeling met behulp van een autotransformator.

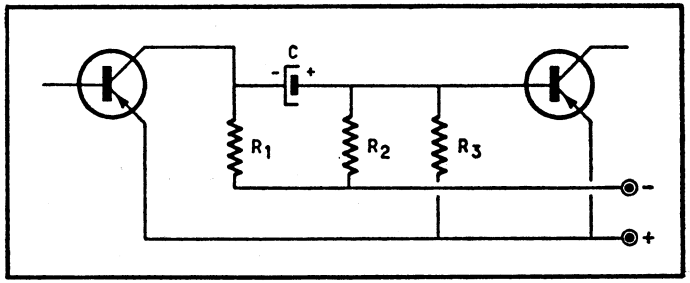


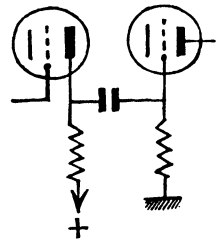
Fig. 90. Koppeling met weerstanden en een koppelcondensator.

schema mist. Misschien voel je je daarom meer tevreden met het, hier direct van afgeleide, schema; daarin is een autotransformator gebruikt. Die zal naar beneden moeten transformeren om de hoge uitgangsweerstand van de voorafgaande transistor aan te passen aan de lage ingangsweerstand van de volgende transistor, aangenomen dat beide in emitterschakeling staan.

Vr. — Ik vind zo'n schakeling noch vis, noch vlees.

De echte RC-schakeling

W. — Omdat je een afkeer hebt van dergelijke halfslachtige schakelingen, zullen we maar overgaan tot de echte RC-gekoppelde versterker, waarvan ik hier een schema getekend heb (fig. 90).



Vr. — Maar dat schema lijkt als twee druppels water op het schema met buizen! De belastingsweerstand R_1 van de collector komt overeen met de anodeweerstand bij een buis. De weerstanden R_2 en R_3 die de basisspanning bepalen, zijn de zusjes van de roosterlekweerstand. En de koppelcondensator ... ik vind het wel vreemd dat je daar een elektrolyt voor hebt genomen. Kan je daar geen goede papiercondensator voor gebruiken, van zo ongeveer 50 nanofarad (50 nF = 0,05 μF)? Een dergelijke waarde doet het bij buisversterkers altijd heel goed.

W. — Dat zou hier beslist niet gaan. Bij buizen werkt die condensator samen met de

roosterlekweerstand, waarvoor al sinds onheugelijke tijden een waarde van 0,5 megohm wordt gebruikt. Maar hier ziet de koppelcondensator de parallelschakeling van R_2 en R_3, dat wordt een weerstand in de orde van 1000 ohm, waarover bovendien nog de ingangsweerstand R_i van de tweede transistor staat. Die is wel niet in het schema getekend, maar toch werkelijk aanwezig, en zijn waarde ligt ook in de buurt van 1000 ohm.

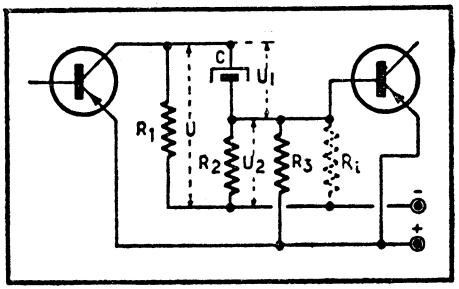
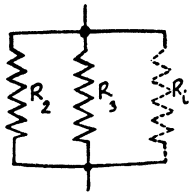


Fig. 91. Het schema van fig. 90 overgetekend in zodanige vorm, dat de spanningsdeling over de koppelcondensator C en de parallelschakeling van de weerstanden R_2, R_3 en R_i duidelijker naar voren komt. De inwendige impedantie van de voedingsbron kan worden verwaarloosd.



Vr. — Dat wordt dan met zijn drieën parallel een weerstand van 500 ohm. Maar ik zie nog steeds niet in, waarom . . .

W. — Wacht maar! Ik zal het schema in een iets andere vorm voor je tekenen, zodat je duidelijk de spanningsdeler kunt zien, bestaande uit de condensator C en de parallelschakeling van de weerstanden R_2, R_3 en R_i. Deze spanningsdeler staat parallel aan de belastingsweerstand R_1, waarover de spanning U staat. Hoe groot is de capacitieve weerstand (=reactantie) van die condensator?

Vr. — Dit hangt van de frequentie af. Bij hogere frequenties is hij lager.

W. — Uiteraard. En als je nu voor de condensator C de waarde, die jij zo graag hebben wilde, van 0,05 μF neemt, en daarvan bij een frequentie van 50 Hz (je kunt beter hertz zeggen dan perioden per seconde) de reactantie uitrekent, kom je op ongeveer 65 000 ohm of 130 maal meer dan de parallelschakeling van R_2, R_3 en R_i.

Vr. — Wat een ramp! Wanneer de spanningen U_1 en U_2 evenredig zijn met de impedanties, is U_2 maar het 130ste deel van U. Op de tweede transistor komt dus maar een heel klein beetje signaal terecht.[1])

$$Z_c = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2 \times 3{,}14 \times 50 \times 0{,}00000005} \cong 65.000\ \Omega$$

W. — Dat is dan ook de reden waarom een flinke condensator nodig is, wil je niet al te veel signaal kwijt raken. Met een elektrolyt van 10 μF wordt de reactantie bij 50 Hz maar 325 ohm. Dan zal meer dan de helft van het signaal op de basis van de tweede transistor terecht komen. Omdat de capacitieve reactantie bij hogere frequenties afneemt, wordt het daar nog beter. Maar als je een te kleine condensator gebruikt, komen de lage tonen maar bar slecht door.

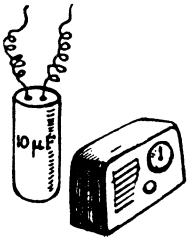
Denk om de polariteit

Vr. — Als ik het goed snap, worden in transistorschakelingen veel elektrolytische condensatoren gebruikt, omdat de waarden van de weerstanden in dergelijke schema's

---

[1] Wanneer we een en ander precies uitrekenen, rekening houdend met de uitgangsweerstand van de eerste transistor, blijkt, dat de situatie in werkelijkheid niet zo erg is. In eerste benadering blijkt echter het boven opgemerkte van kracht.

in het algemeen veel lager zijn dan bij buizen. Is het geen bezwaar dat dergelijke condensatoren tamelijk groot zijn?



W. — Nee dat is het niet. Want laagspanningselco's (zoals die bij transistoren gebruikt worden) hebben heel kleine afmetingen en kunnen zelfs zonder moeite in de bedrading van zakontvangers worden ondergebracht... Maar als je ze gebruikt, moet je heel goed op de juiste polariteit letten.

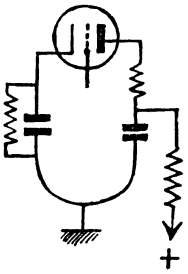
Vr. — Ik heb gemerkt dat je de negatieve kant van de condensator met de collector hebt verbonden, omdat de collector sterker negatief is dan de basis. Ik denk dat je bij schakelingen met N-P-N-transistoren het omgekeerde moet doen.

W. — Daarin vergis je je niet. Om je een duidelijk beeld te geven hoe in transistorversterkers de polariteit van de elco's moet worden gekozen, geef ik je hierbij het schema van een microfoonversterker. Je kunt zien dat in dat schema de versterkingsregeling nog voor de eerste transistor plaats vindt met behulp van de potentiometer P.

Vr. — Het signaal gaat hiervandaan naar de basis van de eerste transistor via de condensator C_1, waarvan in dit schema de negatieve pool met de basis is verbonden. Dat is net andersom als bij de koppelcondensator C_2, die tussen de collector van de eerste transistor en de basis van de tweede aangebracht is. Want omdat de collector sterker negatief is dan de basis, moet de condensator met zijn negatieve zijde aan de collector worden verbonden. Verder merk ik dat beide transistoren van een emitterweerstand (R_3, resp. R_7) zijn voorzien voor temperatuurcompensatie; deze weerstanden zijn ontkoppeld met condensatoren die met hun positieve klem... aan de positieve voedingsdraad liggen. Maar wat voor nut heeft die weerstand R_5, die je in serie met de belastingsweerstand R_4 van de eerste transistor hebt opgenomen? Ik zie dat die weerstand met een elektrolyt C_6 is afgevlakt en dat van C_6 ook weer de positieve kant aan de plus van de voeding ligt.

W. — Herken je daarin geen oude bekende uit de buizenschema's?

Vr. — Wel alle weerstanden en condensatoren! Als dat geen anodeontkoppeling is... Maar, neem me niet kwalijk, ik moet hier collector zeggen in plaats van anode.



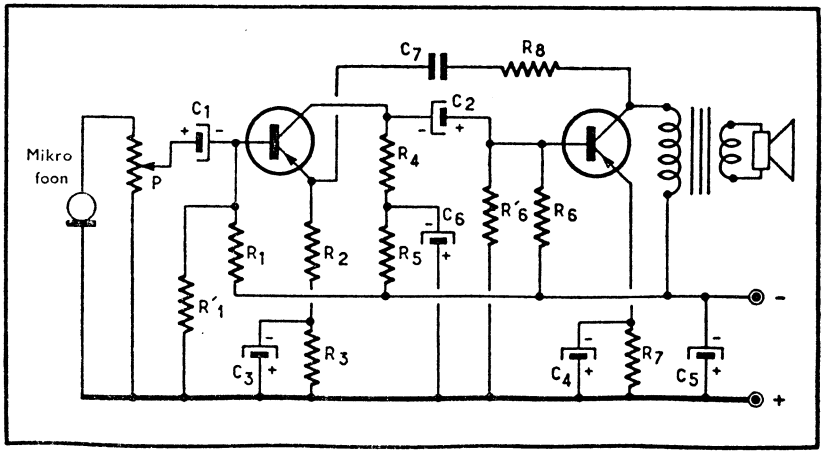
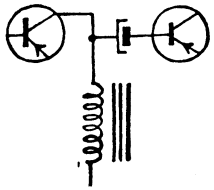


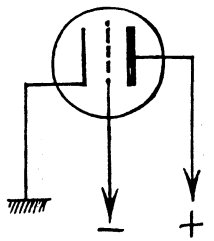
Fig. 92. Volledig schema van een microfoonversterker. Alle condensatoren zijn van het elektrolytische type met uitzondering van de in de tegenkoppelketen opgenomen condensator C_7, die slechts een waarde van 0,05 microfarad behoeft te hebben.

Dient die condensator hier ook om ongewenste koppelingen door de gemeenschappelijke impedantie van de voedingsbron te voorkomen, zodat de schakeling niet spontaan kan genereren?
W. — Inderdaad. De inwendige weerstand van de voedingsbron levert gevaar op voor onaangename terugkoppelingen. Daarom is het een goede gewoonte om de batterijklemmen direct met een voldoend grote condensator C_5 te overbruggen.
Vr. — Als ik alle verfraaiingen, die je in je schema hebt aangebracht, mag opsommen, dan moet ik ook de tegenkoppeling niet vergeten. Een gedeelte van het uitgangssignaal wordt via R_8 en C_7 naar de emitter van de eerste transistor teruggevoerd. Verder is de eerste transistor nog voorzien van stroomtegenkoppeling door de niet-ontkoppelde weerstand R_2 in de emitterketen. In dit schema is op dezelfde manier tegenkoppeling toegepast als we eerder hebben gezien in fig. 61.

Gelijkstroomkoppeling



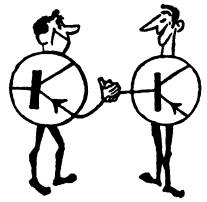
W. — Ondanks het feit dat je al een dagje ouder wordt, Vraagal, doet je geheugen het nog best... Ik zal daarom niet veel tijd besteden aan schakelingen met RC-koppeling of met impedantiekoppeling. Want de collectorweerstand kun je natuurlijk evengoed vervangen door een spoel, die wel duurder en groter is, maar die een lagere ohmweerstand heeft... En omdat je zo netjes hebt geluisterd, zal ik je voor het eerst een schema met gelijkstroomkoppeling geven. Daarin zie je dat de eerste transistor die in collectorschakeling staat, direct met zijn emitter is gekoppeld aan de basis van de tweede in emitterschakeling.
Vr. — Ik moet toegeven, dat je daar maar heel weinig onderdelen voor nodig hebt. Maar ik vraag me af, waarom je de koppelcondensator zo maar weg kunt laten.



W. — Als het om een buizenschema ging, zou dat lang niet zo gemakkelijk gaan, want een anode moet een flinke positieve spanning hebben, terwijl een rooster juist negatief moet zijn ten opzichte van de kathode. Maar bij transistoren staat het er veel beter voor. De spanningsverschillen zijn maar klein en bovendien moeten de basis- en de collectorspanning ten opzichte van de emitter hetzelfde teken hebben. Dit in tegenstelling met buizen, waar het rooster negatief moet zijn en de anode positief. In schema's met transistoren is het dan ook niet moeilijk om alle elektroden op de juiste potentiaal te brengen, door de weerstanden zo te kiezen, dat er precies het gewenste spanningsverlies over ontstaat.
Vr. — Ik ga eens kijken of ik begrijp hoe je schema werkt. Daarvoor zet ik pijltjes in de richting van de voedingsstroom, te beginnen met de negatieve klem van de voeding. De elektronen komen de eerste transistor bij de collector binnen en gaan er bij de emitter weer uit, waar de stroom zich in tweeën verdeelt. Een gedeelte van de elektronen loopt door de belastingsweerstand R_1, waarbij de zijde van die weerstand die met de basis van de tweede transistor is verbonden, negatief wordt ten opzichte van de positieve batterijklem. De rest van de elektronen gaat via de basis van de tweede transistor naar de emitter. Dat is juist de gemiddelde basisstroom... En inderdaad, je hebt gelijk: bij de eerste transistor is de emitter positief ten opzichte van de collector en bij de tweede is de basis negatief ten opzichte van de emitter. Alles klopt. En dat kost een elektrolytische condensator en een weerstand minder.
W. — Maar de toepassing van gelijkstroomkoppeling levert nog wel andere voordelen op. Denk er maar eens aan, dat een condensator nooit in staat is alle frequenties even

sterk door te laten. Zelfs al neem je een heel grote condensator, dan komen de laagste frequenties nog maar met moeite door de condensator. Maar de schakeling die we net hebben bekeken, is een echte *gelijkstroomversterker.*

Vr. — Kom nou, Weetal! Hoe kun je nu spreken over de versterking van een constante grootheid?



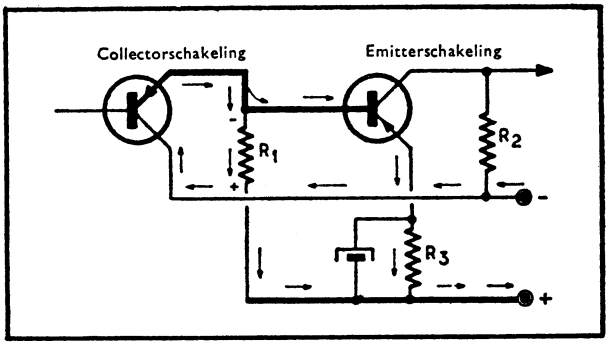


Fig. 93. Twee transistoren in een schakeling met gelijkstroomkoppeling. De pijlen geven de richting van de elektronenstroom aan, waardoor over R_1 de met bijbehorende polariteit aangegeven spanningsval ontstaat.

W. — Ik moet toegeven, dat de term niet zo erg gelukkig is gekozen. Toch gebruikt men die term in de praktijk voor versterkers die in staat zijn zeer laagfrequente signalen door te laten, waarbij periodeduren van een deel van een seconde of zelfs van verscheidene seconden optreden. Verder komen er gevallen voor, waarbij de spanningen of stromen op niet-periodieke wijze variëren. Dat is met name het geval op het terrein van de biologie. Daar kan men alleen maar gebruik maken van gelijkstroomversterkers.

Vr. — Ik zie nog wel een andere toepassing, waar ze goed van pas komen: voor het versterken van televisiebeeldsignalen, waar het heel belangrijk is de gelijkstroomcomponent niet te verliezen, zodat je geen koppelcondensatoren kunt gebruiken.

Eerste toepassing van complementaire transistoren

W. — Je moet je er maar niet over verbazen, Vraagal, dat ze je ook met die schakeling al voor zijn geweest. En om je een beetje over de teleurstelling heen te helpen, want het is natuurlijk niet leuk voor je, als anderen al met je ideeën rond lopen, wanneer je ze zelf nog niet eens hebt bedacht . . . , zal ik je nog een schakeling met gelijkstroomkoppeling laten zien, met beide transistoren in emitterschakeling. Voor de transistoren zijn echter tegengestelde typen gekozen: de ene is een N-P-N en de andere is een P-N-P. In deze schakeling wordt gebruik gemaakt van de onderling tegengestelde eigenschappen van deze *complementaire transistoren.*

Vr. — Als ik de stroomrichtingen van de elektronen weer met pijltjes in het schema aangeef, zie ik dat ook in deze schakeling alles gaat zoals het moet. De collector van de eerste transistor is positief ten opzichte van de bijbehorende emitter, zoals dat moet bij een N-P-N-transistor. En de basis van de tweede transistor, waarvoor een P-N-P-type is gekozen, wordt negatief ten opzichte van de emitter. Wat wil je nog meer?... Kun je niet ook nog de temperatuurstabilisatieweerstanden R_3 en R_4 met de bijbehorende ontkoppelcondensatoren weglaten? Dan krijg je een schema met nog minder onderdelen.

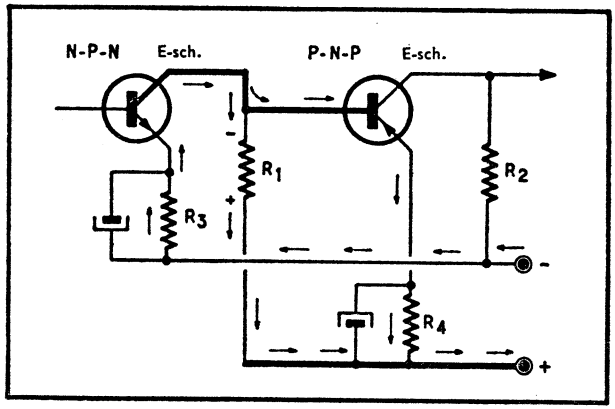


Fig. 94. Andere oplossing voor een versterker met gelijkstroomkoppeling waarbij van complementaire transistoren gebruik is gemaakt.

W. — Als het niet nodig is om de gelijkstroom constant te houden, kun je die onderdelen inderdaad weg laten, maar dan ben je ook meteen de temperatuurcompensatie kwijt.
Vr. — Dat vind ik jammer, want ik wil eerlijk bekennen, dat ik het een leuk schema vind.

Serieschakeling van transistoren

W. — Je moet goed onthouden, mijn vriend, dat er ook nog andere schakelingen met gelijkstroomkoppeling bestaan, die beter tegen temperatuursveranderingen kunnen. Een voorbeeld hiervan wordt geleverd door de tandemschakeling van voorversterker en eindtransistor.
Vr. — Ga je nu een verhaal over fietsen vertellen?
W. — Wanneer twee transistoren in serie worden gevoed, spreekt men wel eens van een tandemschakeling. De gelijkstroom doorloopt dus beide transistoren achter elkaar, zodat de stroom heel behoorlijk constant is. In dit schema staat de eerste

transistor in collectorschakeling en de tweede in emitterschakeling. Snap je hoe het werkt?

Vr. — We moeten maar weer de pijltjes volgen. Dat doet me denken aan mijn padvinderstijd, toen ik bij het spoorzoeken ook van het ene pijltje naar het andere moest lopen . . . Laten we maar weer beginnen bij de negatieve klem van de voedingsspanning. Nadat de elektronen de primaire van de uitgangstransformator gepasseerd zijn, gaan ze de tweede transistor binnen bij de collector en komen er bij de emitter weer uit, waarna ze zich in de richting van de eerste transistor spoeden, ook daar bij de collector naar binnen gaan en er bij de emitter weer uitkomen. Na die geslaagde verkenningstocht moeten ze alleen nog maar door de belastingsweerstand van de eerste transistor lopen en dan zijn ze weer op de verzamelplaats terug, dat wil zeggen bij de positieve voedingsklem.

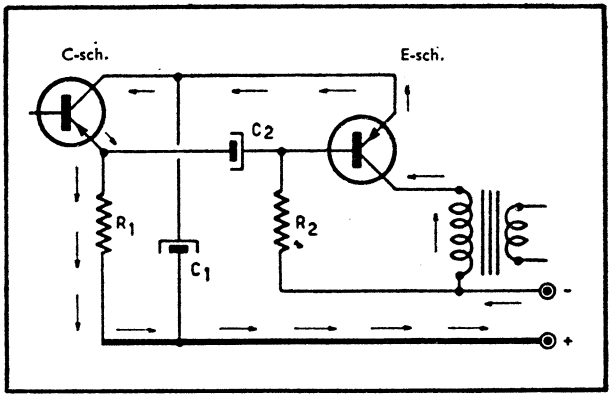


Fig. 95. Cascadeschakeling van twee transistoren, waarbij de voedingsstroom beide transistoren in serie doorloopt. De pijlrichting komt weer overeen met de richting van de elektronenstroom.

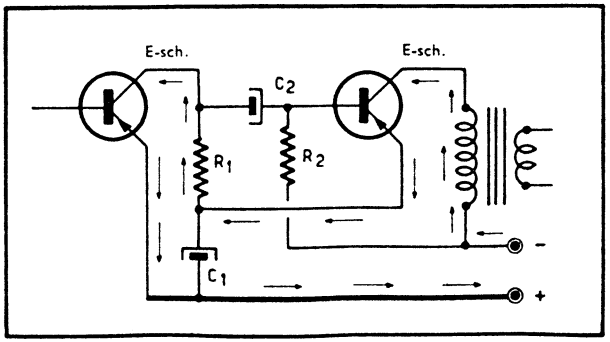


Fig. 96. Nog een cascadeschakeling, waarbij de stroom eveneens beide transistoren in serie doorloopt en waarbij de transistoren in emitterschakeling staan voor het signaal.

W. — Je ziet dat dezelfde stroom achtereenvolgens door beide transistoren loopt, waarbij de collector van de eerste direct is verbonden met de emitter van de tweede, en dat deze doorverbinding met een grote condensator C_1 tegen aarde is ontkoppeld, zodat de spanning niet varieert ten gevolge van de door transistoren lopende wisselstromen.

Vr. — Ik moet toegeven, dat het een heel aardig schema is. Zou je hetzelfde principe kunnen toepassen bij twee transistoren in emitterschakeling?

W. — Dat heb je bij het rechte end. En die serieschakeling levert meestal nog meer versterking dan de schakeling die we net hadden. Je moet de pijltjes maar weer volgen. Dan zie je, dat ook hier dezelfde stroom eerst door de ene en dan door de andere transistor loopt. Voor de gelijkstroomcomponent staan beide dus in serie. Voor de versterkte wisselstromen is de vanouds bekende RC-schakeling toegepast.

Vr. — Ze hebben wel acrobatische toeren uitgehaald om zulke slimme schema's te bedenken. En ik word er een beetje licht van in mijn hoofd.

W. — Dan zal ik je maar weer wat rust gunnen. Wel te rusten!

ELFDE PRAATJE

RENDEMENT EN VERMOGEN

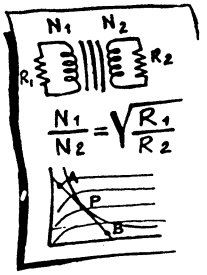
Onze vrienden hebben zich tot nog toe vrijwel uitsluitend bezig gehouden met de koppeling van transistortrappen in versterkers voor lage frequenties. Ook de uitgangstrap is nog niet behandeld. Voor deze trap worden afwijkende schakelingen en instellingen gebruikt, om er voor te zorgen dat een zo groot mogelijk signaal kan worden afgegeven. In dit praatje vindt U hierover meer.

Samenvatting: Keuze van het werkpunt. — Stroombesparende schakeling met glijdend werkpunt. — Balans-B-trap. — Faze-omkering met transformatoren. — Fazeomkeerschakelingen. — Fazeomkeerschakeling met een transistor. — Balanstrap met complementaire transistoren. — Uitgevoerd schema van een uitgangstrap.

Vraagal begaat een heel erge fout

Vraagal. — Ik geloof dat wij nu al zoveel van L.F.-versterkers afweten, dat ik zo'n versterker wel helemaal zou kunnen uitrekenen.

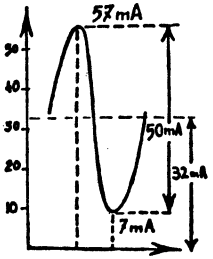
Weetal. — Ik sta nog altijd paf van je bescheidenheid . . .



Vr. — Ik bedoel het serieus. Bij audio-versterkers zie ik echt geen moeilijkheden. Als een koppeltransformator nodig is, kan ik de windingsverhouding zo berekenen, dat een zo goed mogelijke aanpassing wordt bereikt. En je denkt toch niet dat ik bang ben voor het trekken van een vierkantswortel? . . . Bij de RC-koppeling kan ik gebruik maken van de methode, die jij me geleerd hebt om een belastingslijn te trekken. Die trek ik dan zó, dat hij juist raakt aan de hyperbool voor het maximaal toegestane vermogen, dan kan ik het maximale signaal op de ingang zetten, als ik het werkpunt ongeveer in het midden van de belastingslijn kies.

W. — Ik denk dat ik je wel een beetje moet teleurstellen, want het is niet zo eenvoudig als je denkt. In principe ben ik het wel met je eens, maar bij het kiezen van de waarden van de onderdelen moet je net zo goed rekening houden met het op de ingangsklemmen beschikbare vermogen als met de breedte van de door te laten frequentieband, en verder met de tegenkoppeling, met de maximaal toe te laten vervorming en misschien nog wel met meer factoren! . . .

Vr. — Houd alsjeblieft op! Ik geef graag toe dat ik in mijn onwetendheid een heel ernstige fout heb begaan. Alles leek immers zo mooi met die karakteristiekenbundels en belastingslijnen. Het ingangssignaal (daarbij kon je net zo goed uitgaan van de basisspanning als van de basisstroom) kon precies een stuk van de belastingslijn tussen twee punten doorlopen: aan de ene kant het punt A, dat voorbij de knie moest liggen en aan de andere kant het punt B, dat net even boven het afknijppunt (stroom nul) moest liggen.



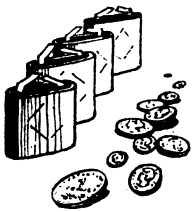
W. — Want als je met het signaal buiten die punten komt, ontstaat er direct niet-lineaire vervorming (distorsie).

Vr. — Dat is zo. Je moet het werkpunt P dan ook even ver van A als van B kiezen. De maximale signaalamplitude kan dan gelijk aan PA = PB zijn, dat komt voor het ingangssignaal neer op het verschil van de daarbij behorende basisstromen of -spanningen. In mijn tekening komt dat overeen met een amplitude van ongeveer 275 mV. Dan loopt de stroom tussen 7 en 57 mA op en neer om een gemiddelde waarde van 32 mA, zodat de wisselstroomamplitude 25 mA bedraagt.

W. — Dat heb je goed uitgerekend, Vraagal. Ik denk dat die transistorversterker het zo best naar je zin zal doen.

Niet te veel verkwisting!

Vr. — Toch niet helemaal. Hoe mooi alles er ook uitziet bij grote signalen, ik heb toch iets tegen de verkwisting van energie, wanneer er geen of slechts een klein stuursignaal aanwezig is. Want het stroomverbruik hangt uitsluitend af van de ligging van het punt P en blijft steeds hetzelfde, onafhankelijk van de grootte van het signaal. Je zou het werkpunt bij zwakke signalen dan ook liever lager hebben willen leggen op een belastingslijn voor kleinere stromen, bijvoorbeeld op P'. Als je dat gedaan had, zou het stroomverbruik geringer zijn, en zou je niet zoveel dure batterijen behoeven te kopen.



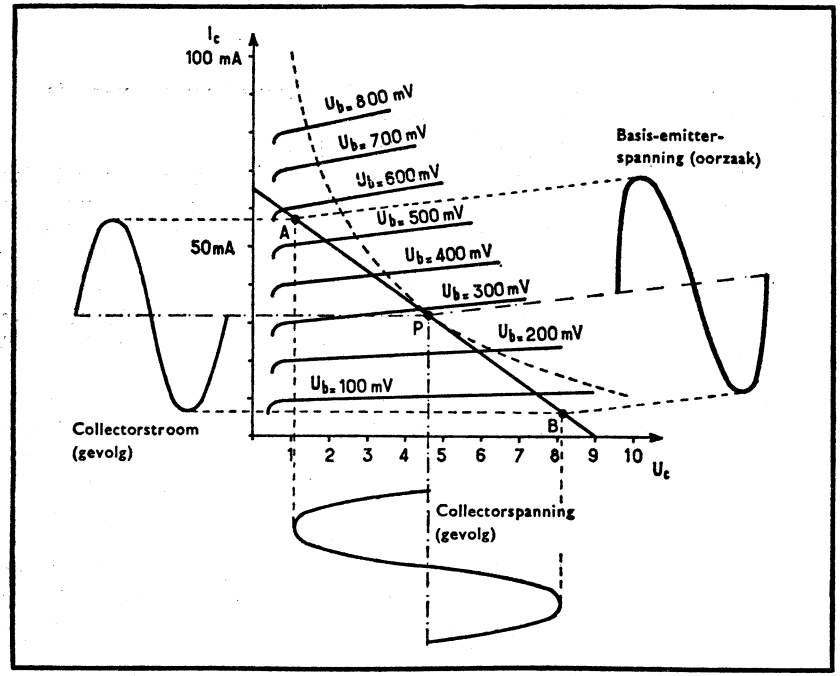
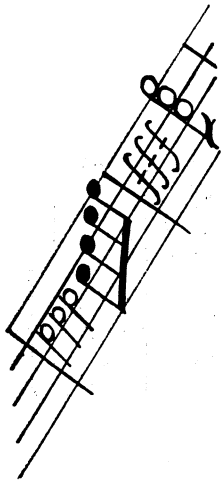


Fig. 97. In deze grafiek is aangegeven hoe de collectorstroom varieert onder invloed van een sinusvormig ingangssignaal. De amplitude hiervan is zo groot mogelijk gekozen.



W. — Maar de batterijfabrikanten moeten ook leven.

Vr. — Dat is zo. Maar ik vind het niet erg voor de hand liggen dat het stroomverbruik bij het luisteren naar een symfonie tijdens de *pianissimi* even hoog is als bij een fortissimo. Alleen weet ik er geen raad op om het werkpunt automatisch zo naar een lager gelegen belastingslijn te laten verschuiven dat steeds juist voldoende batterijvermogen wordt opgenomen om het signaal zonder vervorming te kunnen versterken.

W. — Ik vind het erg loffelijk, dat je zo je best doet om de voedingsbatterij zo min

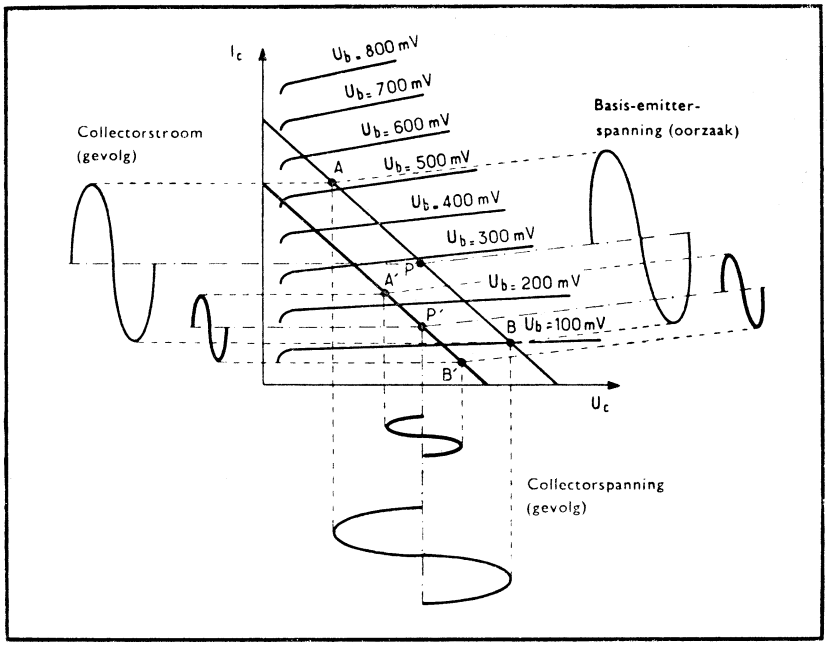
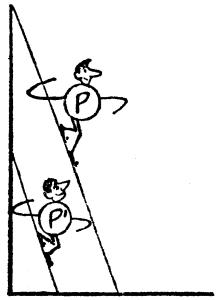


Fig. 98. Voor kleinere signalen is het zuiniger om het werkpunt van P naar P′ te verplaatsen.

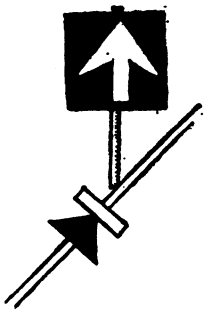
mogelijk te belasten. Daarom wil ik je dan ook graag een schema aan de hand doen. Om te maken dat het werkpunt van de ene belastingslijn naar de andere loopt, moet je de basis een instelbare voorspanning geven.[1]) Bij toenemende signaalamplitude moet de waarde van de voorspanning evenredig toenemen. Je moet de voorspanning dus van het signaal zelf betrekken.

Vr. — Dat begrijp ik niet. Het signaal is een wisselspanning, terwijl de voorspanning een gelijkspanning is.

W. — Je weet anders heel goed hoe je wisselstroom in gelijkstroom moet omzetten: met een gelijkrichter. Dat doen we dan ook. Hier heb je een uitgevoerd schema van een eindtrap in stroombesparende schakeling. Je kunt er nog een aantal varianten van afleiden. Je ziet, dat een hulpwikkeling op de uitgangstransformator de versterkte wisselspanning toevoert aan een gelijkrichtschakeling. Deze is uitgevoerd met een halfgeleiderdiode D en een weerstand R_1, waarover de gelijkgerichte spanning ontstaat. Hierdoor ontstaat op het punt x (fig. 99) een negatieve spanning, waarvan de grootte afhangt van de signaalamplitude. Om te maken dat de spanning niet direct met het



[1] Wanneer we de instelling veranderen, wordt de belastingslijn evenwijdig aan zichzelf verschoven. Hierbij blijft deze lijn dezelfde hoek met de assen maken (deze wordt namelijk bepaald door de grootte van de belastingsimpedantie). De ohmweerstand hiervan kan worden verwaarloosd (weerstand van de primaire van de uitgangstransformator), zodat de gemiddelde spanning U_c op de collector niet van de instelling van de basisspanning afhangt. Het werkpunt verschuift dus van P naar P′ langs een verticale lijn. Indien ohmweerstand aanwezig was, zou hierdoor tevens een verschuiving in horizontale richting plaatsvinden.



signaal mee op en neer gaat, maar alleen van de *gemiddelde* signaalsterkte afhangt, **is een afvlakcondensator C aangebracht.**

Vr. — Zo'n condensator werkt als een vliegwiel, net als de afvlakcondensator bij fadingcompensatie. Die moet ook zo groot zijn, dat met de bijbehorende weerstand een voldoend grote tijdconstante wordt verkregen.

W. — Die vergelijking komt heel goed van pas, want de schakeling die we op het ogenblik bekijken, vertoont heel veel overeenkomst met een fadingcompensatieschakeling, al werkt onze schakeling dan juist andersom. Beide schakelingen komen in zoverre overeen, dat het versterkte uitgangssignaal wordt gelijkgericht en dat met deze gelijkgerichte spanning het werkpunt van de versterker wordt geregeld. In feite wordt de variabele spanning op het punt x verbonden met het knooppunt van R_2 en R_3, die samen zorgen dat de juiste basisstroom door de batterij wordt geleverd. Het is de kunst de drie weerstanden zó te kiezen, dat het werkpunt op de goede manier verschuift bij toenemende signaalamplitude. De basis wordt dan juist zoveel negatiever, als nodig is voor het signaal.

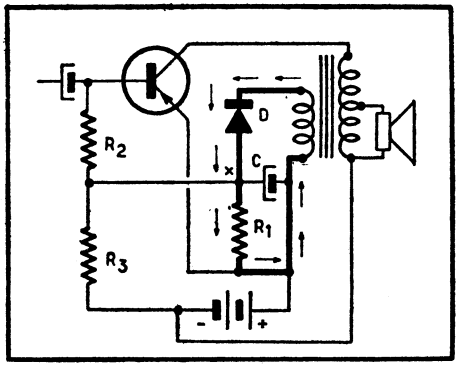
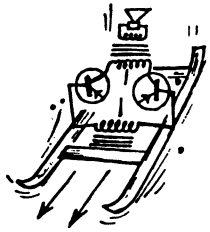


Fig. 99. Uitgangstrap in stroombesparende schakeling. De hulpschakeling, die er voor zorgt dat de basisinstelling verschuift bij toeneming van de signaalamplitude, is in dikke lijnen aangegeven.

De B-versterker doet het niet gek!



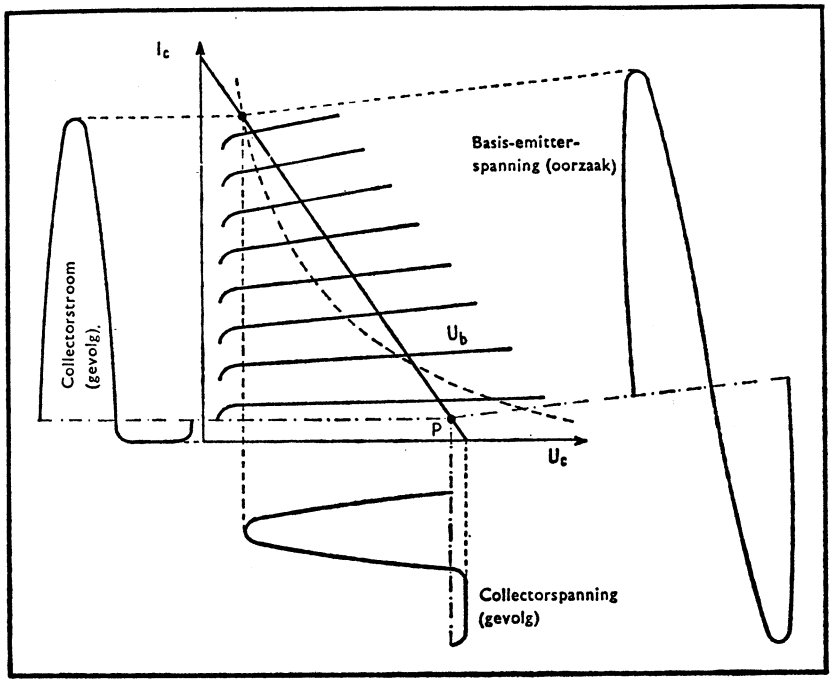
Vr. — Die stroombesparende schakeling van je vind ik erg leuk. In de transistorontvanger die ik voor mezelf ga bouwen, komt een flinke eindtrap, waarbij ik jouw schakeling voor glijdende basisspanning ga toepassen.

W. — Als je een balanstrap inbouwt, bestaat er nog een veel betere oplossing: je moet de basisspanning vast instellen op een zo lage waarde, dat de stroom zonder signaal bijna nul is.

Vr. — Bedoel je soms dat ik de transistoren als B-versterkers moet schakelen? Bij buisversterkers moet je dan de anodestroom met de negatieve roosterspanning vrijwel afknijpen.

W. — Ja, ik dacht inderdaad aan een B-versterker. Bij zo'n versterker moet je het werkpunt P bij een heel lage waarde van de collectorstroom kiezen. Je moet de stroom niet helemaal afknijpen, want dan zouden kleine signalen op een niet-lineair gedeelte van de karakteristiek komen te liggen.

Vr. — Ik zie, dat in die schakeling de collectorstroom bij toenemende basisspanning eveneens flink toeneemt, terwijl de collectorstroom bij afnemende basisspanning bijna niet meer verandert. Zo krijg je een ontzettende vervorming!



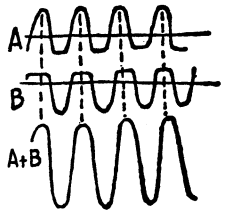
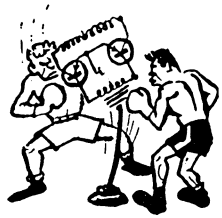


Fig. 100. In de klasse-B-schakeling wordt het werkpunt naar het onderste uiteinde van de belastings lijn verschoven. Hierdoor kan op de transistor een tweemaal zo groot signaal worden gezet als in klasse-A. Zoals uit de figuur blijkt, is de uitgangsstroom sterk vervormd.

W. — Het is dan ook niet de bedoeling, dat je één enkele transistor in klasse-B schakelt. Maar met twee transistoren in balans wordt het werk eerlijk verdeeld: de ene versterkt de positieve zijde van de wisselspanning en de andere de negatieve. Als de schakeling goed symmetrisch is, heffen de vervormingen elkaar juist op.

Vr. — Dan lijkt die klasse-B-balansssschakeling wel op een boksbal, die door twee boksers tegelijk wordt gebruikt bij hun training. Als zij ieder aan één kant van de bal gaan staan, kunnen zij zo stoten dat de bal om beurten naar links en naar rechts uitwijkt.



W. — Daar lijkt het inderdaad op. Met z'n tweeën kunnen ze die bal heel wat grotere uitwijkingen geven dan één alleen zou presteren.

Vr. — Dat klopt. Als je het werkpunt dicht bij het ene uiteinde van de belastingslijn legt, kun je een tweemaal zo grote ingangsamplitude toelaten als in klasse-A-schakeling, waar het werkpunt in het midden van de belastingslijn ligt.

W. — Je hebt dus begrepen dat in B-schakeling een tweemaal zo grote uitsturing mogelijk is als in A-schakeling. Bij afwezigheid van sturing neemt de schakeling slechts weinig stroom op, terwijl de stroomsterkte evenredig toeneemt met de sterkte van het signaal. En — dat heb ik je nog niet verteld — in B-schakeling kun je zonder bezwaar de belastingshyperbool overschrijden.

Vr. — Bedoel je dat de belastingslijn dan ook rechts van de hyperbool voor maximaal vermogen mag komen?

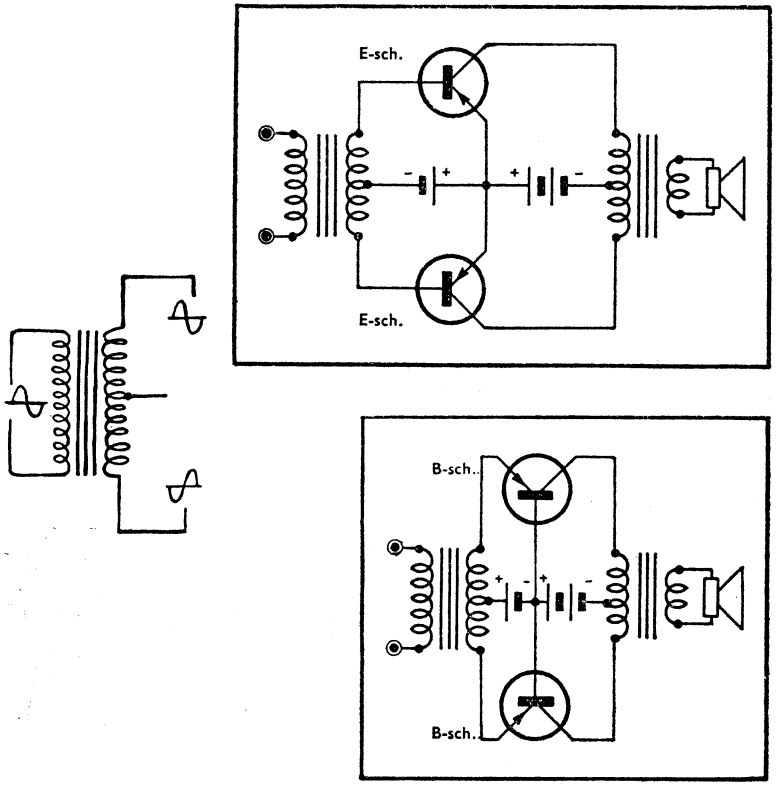
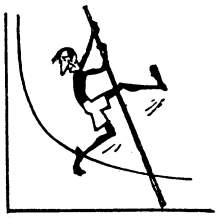


Fig. 101. Balanstrap met een balanstransformator. De transistoren staan in emitterschakeling.

Fig. 102. Nog een balanstrap met transformatoren. Hier staan de transistoren in basisschakeling.



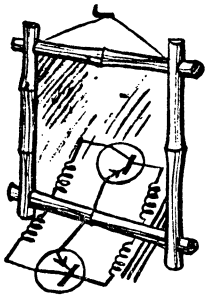
W. — Inderdaad. En dat kan geen kwaad voor de transistor. Want het vermogen overschrijdt die grens maar gedurende heel korte ogenblikken. In rustinstelling en bij niet al te grote signalen, blijft de uitsturing beneden de hyperbool. Tijdens de negatieve helft van de perioden is er praktisch geen vermogen. Maar als je deze schakeling toepast, moet je wel op een andere parameter van de transistor letten. De transistorfabrikanten geven meestal een bepaalde waarde van de collectorstroom op ($I_{C\ max}$), waar je niet bovenuit mag komen.

Vr. — Ik beloof je dat ik de stroom nooit boven die waarde zal uitsturen. Je kunt mij nu gerust inwijden in alle geheimen van de transistorbalanstrappen.

Alles gaat om de symmetrie

W. — Ik moet je eerst even vertellen, Vraagal, dat alle schema's die wij zullen bekijken even goed voor B-versterkers als voor A-versterkers kunnen worden gebruikt. Het enige verschil is de rustinstelling. In de meest voorkomende schakeling staan de transistoren in emitterschakeling, want die levert de grootste versterking. Als je daarentegen meer waarde hecht aan een zo laag mogelijke vervorming, kun je de transistoren beter in basisschakeling gebruiken. En als een hoge ingangsweerstand en een lage uitgangsweerstand nodig is . . .

Vr. — ... moet je de transistoren in collectorschakeling toepassen. Dat dacht ik al. En het sturen van de beide transistoren in tegenfaze, lijkt me geen groot probleem, als je daarvoor een transformator met secundaire middenaftakking gebruikt. Verder moet ook de uitgangstransformator een middenaftakking hebben, waarop de voedingsspanning wordt aangesloten.



W. — Dat is zo. Hier heb je de schema's voor twee verschillende balansschakelingen: de eerste werkt in emitterschakeling (fig. 101) en de tweede in basisschakeling (fig. 102). Je ziet dat de schakelingen mooi symmetrisch zijn.

Vr. — Die batterij voor het instellen van de basisstroom, is die wel nodig?

W. — Nee, die kun je missen als je de stroom instelt op de manier die we al eerder hebben besproken, dus met een serieweerstand of met een spanningsdeler over de voedingsbatterij. Ik heb die met opzet weggelaten (je kunt ze er zelf wel bijtekenen) om de schema's zo duidelijk mogelijk te houden.

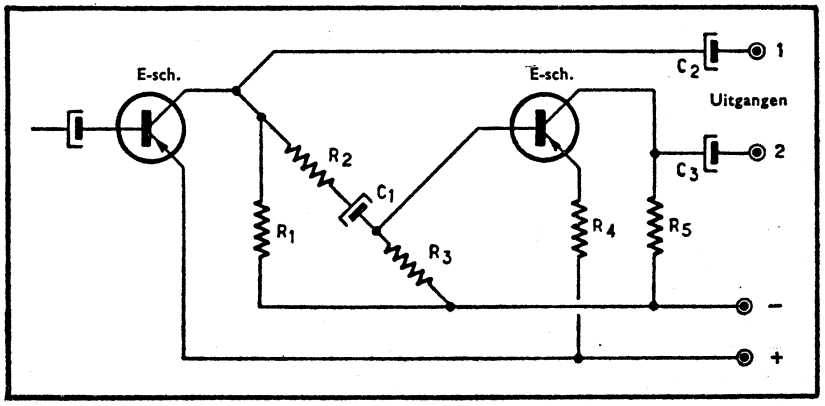
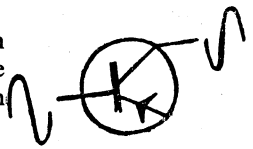


Fig. 103. Fazeomkeertrap met een transistor in emitterschakeling, waarbij de versterking tot 1 is teruggebracht.

Duizend en één faze-omkeerschakelingen

Vr. — Bij buisversterkers wordt tegenwoordig meestal geen dure en tamelijk grote balanstransformator meer gebruikt. Ik heb zo'n idee dat bij transistoren ook best zonder zo'n trafo kan worden gewerkt.

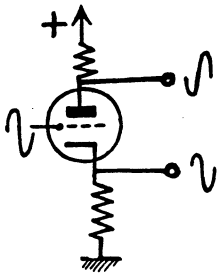
W. — Dat kan heel goed. Je weet dat het uitgangssignaal bij de emitterschakeling in tegenfaze is met het ingangssignaal. Het kan weer gebruikt worden om de andere helft van de eindtrap te sturen. De door beide helften geleverde uitgangssignalen zijn dan in tegenfaze.



Vr. — Ik vind het maar een raar schema! ... Zo'n vreemde manier om twee transistoren te koppelen, kom je niet dikwijls tegen.

W. — Weerstand R_2 en koppelcondensator C_1 vormen samen met de weerstand R_3 een spanningsdeler, die zo is gekozen, dat maar een klein gedeelte van het signaal over de belastingsweerstand R_1 van de eerste transistor, op de basis van de tweede transistor terecht komt. Verder zien we, dat ook nog een tegenkoppelweerstand R_4 is aangebracht in de emitterleiding van de tweede transistor.

Vr. — Die transistor zal wel niet veel versterken! Want je vermindert de versterking aan twee kanten tegelijk.
W. — De versterking mag ook niet erg groot worden. Want als je een echt balans-uitgangssignaal wilt hebben, mag de versterking van de tweede transistor maar éénmaal zijn. Het signaal wordt dus niet sterker, maar ook niet zwakker.
Vr. — Wordt dan alleen de faze maar omgedraaid?



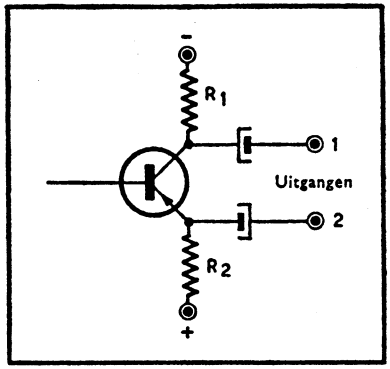
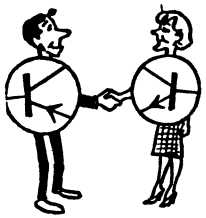


Fig. 104. Fazeomkeertrap met een belastingsweerstand in de emitter en één in de collector.

W. — Meer hoeft die trap inderdaad niet te doen. Je kunt de twee spanningen in tegenfaze ook nog met een andere schakeling maken, waarbij maar één transistor nodig is. Die werkt voor het ene signaal als emittervolger en voor het andere als normale versterker, want hij heeft zowel een belastingsweerstand in de collectorketen (R_1) als in de emitterketen (R_2). Op uitgang 1 krijg je een signaal dat in tegenfaze staat met het ingangssignaal, terwijl je op uitgang 2 een signaal in faze krijgt.
Vr. — Het schema lijkt als twee druppels water op de schakeling met faze-omkeerbuis met een weerstand in de anode- en één in de kathodeleiding.
W. — Al is de schakeling nu met transistoren uitgevoerd, je hebt hem toch wel herkend.
Vr. — Eigenlijk zijn alle schema's die je voor me hebt getekend, oude bekenden voor me. Want bij buizen worden precies dezelfde faze-omkeerschakelingen gebruikt.

Een wonderlijke balansschakeling



W. — Toch kun je met transistoren nog heel andere schakelingen maken dan met buizen, zoals bijvoorbeeld een balansschakeling zonder faze-omkeertransistor.
Vr. — Ik kan me niet voorstellen hoe je dat met transistoren zou kunnen doen. Als je tenminste niet kunt toveren.
W. — Toch is het waar, wat ik zeg. En het tovermiddel wordt weer gevormd door de complementaire symmetrie van een P-N-P- en een N-P-N-transistor. Ik heb hier een schema met twee transistoren in emitterschakeling. Je moet het maar eens goed bekijken.
Vr. — Laten we maar weer op de oude manier te werk gaan en aannemen dat het ingangssignaal de beide bases sterker negatief maakt. Dan zal de P-N-P-transistor open gaan en meer stroom trekken. Maar de N-P-N zal geen stroom trekken. Bij de volgende halve periode van de wisselspanning zullen de bases meer positief worden

en de P-N-P zal niets doen, terwijl de N-P-N-transistor collectorstroom gaat trekken. Dat is geweldig! Ik vind dat een knap stukje werk! Reuze slim!
W. — Wind je maar niet te veel op, mijn vriend. Want voor die schakelingen heb je twee batterijen nodig, of op zijn minst een batterij met middenaftakking, wat de zaak niet direct eenvoudiger maakt. Ook als je de complementaire transistoren in basisschakeling zet, verandert hier niets aan.

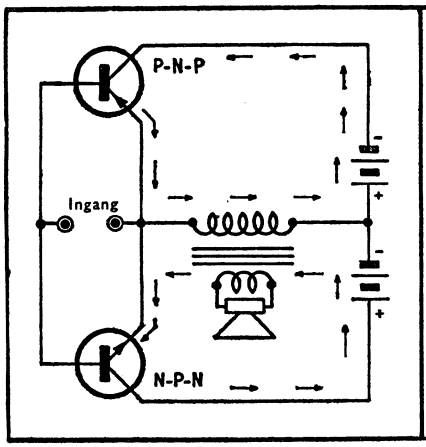


Fig. 105. Balanstrap zonder fazeomkering uitgevoerd met een P-N-P- en een N-P-N-transistor geschakeld in emitterschakeling.

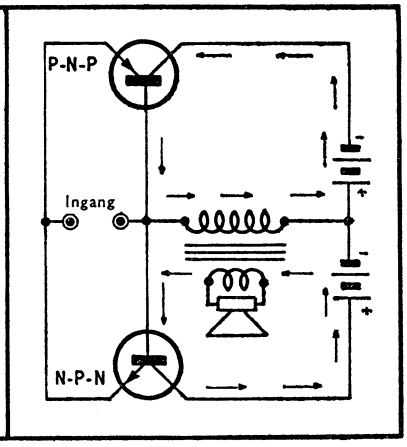
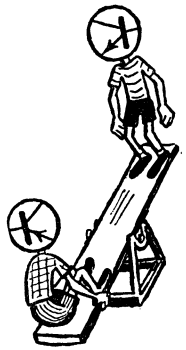
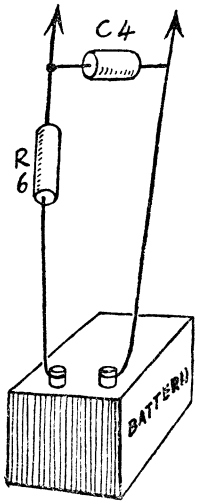


Fig. 106. Een balanstrap zonder fazeomkering, maar nu in basisschakeling.



Vr. — Dat is zo. Overigens doet die schakeling het even goed als de vorige. Als het ingangssignaal in de positieve richting gaat, werkt de P-N-P-transistor en als het negatief wordt de N-P-N-transistor. Maar het lijkt me niet gemakkelijk om die batterijen tegelijkertijd voor de voeding van de andere transistoren te gebruiken. Zou ik je nu iets mogen vragen? Ik zou zo graag een transistorversterker voor mijn koffergrammofoon willen bouwen. Kun jij me nu het schema voor de eindtrap daarvan geven? Het moet een flinke balanstrap zijn, die in B staat, en waar zoveel herrie uitkomt dat we er op kunnen dansen.
W. — Ik zal het schema even voor je tekenen, Vraagal. Begrijp je al hoe het werkt?
Vr. — Jonge, jonge, als ik het zo bekijk, is het een doodgewoon schema. Een transformator om de faze om te keren . . . paralleltegenkoppeling over iedere transistor met een serieschakeling van een weerstand en een condensator tussen collector en basis (R_1C_1 en R_2C_2). Instelling van de transistoren met behulp van de spanningsdeler R_3R_4 . . . Gelijkstroomstabilisatie met weerstand R_5 om te voorkomen dat de instelling bij hoge temperatuur verloopt; de weerstand is ontkoppeld met condensator C . . . Alles ziet er heel gewoon uit. Maar waarvoor dient die weerstand R_6, die ontkoppeld is met condensator C_4?
W. — Om rekening te houden met grote variaties van de belastingsstroom bij het uitsturen van de eindtransistoren in de B-versterker, is het beter de voedingsspanning



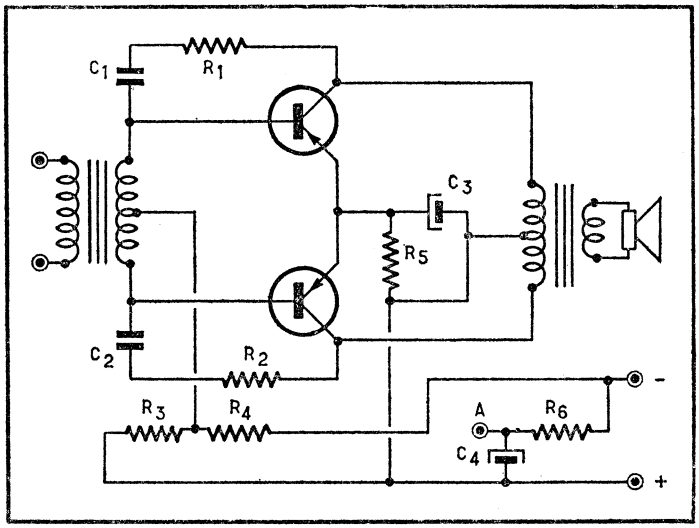


Fig. 107. Uitgevoerd schema van een balanstrap met tegenkoppeling, temperatuurcompensatie en ontkoppeling van de voedingsspanningen.

te ontkoppelen, zodat geen terugwerking op andere trappen plaats vindt. Daarom is de stroom voor de voortrappen, die van het punt A wordt betrokken, extra ontkoppeld met R_6 en C_4. Is het je nu duidelijk?

Vr. — Ja. En ik geloof dat ik die versterker maar meteen ga bouwen. We zullen dus maar afscheid nemen.

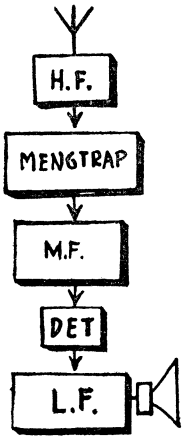
TWAALFDE PRAATJE

HET RADIOFREQUENTE GEBIED

Weetal kan nu flink opschieten, omdat de werking van transistoren bij audiofrequenties in de vorige twee praatjes volledig is behandeld. Nu gaat hij aan Vraagal uitleggen hoe versterkers bij hogere frequenties werken. Hij wijst hem op punten van overeenkomst en van verschil met buisversterkers. Tenslotte komen schakelingen voor automatische versterkingsregeling (fadingcompensatie) aan de beurt, zoals die gebruikt worden in middenfrequenttrappen met transistoren.

Samenvatting: Afsnijfrequentie. — Koppeling met afgestemde kringen. — Demping. — H.F.- en M.F.-trappen — Collector-basis-capaciteit — Neutrodynisatie — Automatische fadingcompensatie. — Variaties van de inwendige capaciteiten en weerstanden. — Versterkte regeling.

We komen op gang



Vraagal. — Weetal, ik voel me een beetje trots en erg gelukkig. Ik ben er trots op dat het me gelukt is voor het eerst zelf een transistorschema in elkaar te zetten en ik ben in de wolken dat er in mijn koffergrammofoon nu zo'n klein versterkertje zit, dat maar weinig stroom gebruikt maar waar een heel behoorlijk geluid uit komt.

Weetal. — Ik ben blij dat je alles wat ik je heb proberen uit te leggen, zo goed hebt kunnen toepassen.

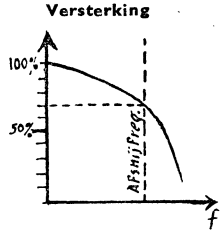
Vr. — Als ik eerlijk moet zijn, moet ik bekennen dat ik nog met een probleem zit. Want ik had die versterker niet alleen voor mijn pickup willen gebruiken, maar ook als audiodeel voor een ontvanger. En ik weet niet hoe ik de andere trappen maken moet.

W. — Nu zie je dat we al zover gekomen zijn dat je ook wat wilt weten over de H.F.- en de M.F.-trap en ik denk ook wel over de mengtrap en de detector. Want een transistorontvanger zit praktisch net zo in elkaar als een buizenapparaat. Laten we dus maar met de hoogfrequentversterker beginnen.

Hoogfrequentversterkers met transistoren

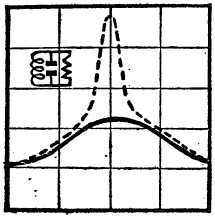
Vr. — Ik heb zo'n idee dat het vrij moeilijk is, met transistoren op zulke hoge frequenties nog voldoende versterking te krijgen.

W. — Dat is zo. De fabrikanten geven daarom bij de andere gegevens ook altijd de waarde van de *afsnijfrequentie* op. Bij die frequentie daalt de versterking tot 70% van de waarde bij lage frequenties. Maar dat betekent helemaal niet, dat je transistoren niet bij nog veel hogere frequenties kunt gebruiken, als je genoegen neemt met een lagere versterking. Dankzij het voortschrijden van de techniek wordt de maximale frequentie waarbij nog transistoren kunnen worden gebruikt, voortdurend hoger. En vandaag is het niet moeilijk meer om signalen te versterken op vele honderden MHz, zoals die bij frequentiemodulatie op metergolven worden gebruikt.



Vr. — Brengt het gebruik van transistoren dan nog andere moeilijkheden mee? Ik heb zo'n idee, dat het enige wat je doen moet, is het zonder meer overnemen van de voor buizen ontwikkelde schakelingen.

W. — Dan zul je toch rekening moeten houden met de veel lagere uitgangsweerstand en — vooral — met de veel lagere ingangsweerstand van een transistor.
Vr. — Waarom heb je daar bij deze schakelingen meer last van dan bij laagfrequentversterkers? Ik dacht dat het voldoende was om tussen de verschillende trappen naar beneden te transformeren om de impedanties aan te passen, op dezelfde manier als we dat bij audioversterkers hebben gedaan.



Twee dingen tegelijk

W. — Je vergeet, Vraagal, dat de hoogfrequentversterker voor twee dingen tegelijk moet dienen: in de eerste plaats om het zwakke, door de antenne opgevangen signaal te versterken en ten tweede, wat nog belangrijker is, om als zeef te werken, zodat het koren van het kaf kan worden gescheiden. Met andere woorden, zowel bij de

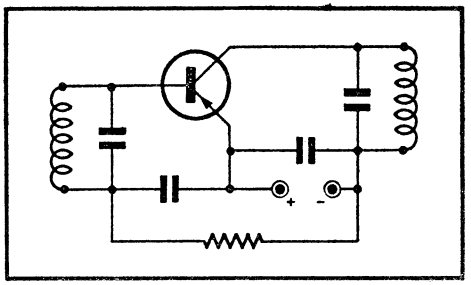


Fig. 108. Transistor H.F.-versterker met afgestemde kringen in in- en uitgang.

H.F.- als bij de M.F.-versterker moet je steeds twee dingen in het oog houden: de versterking en de selectiviteit. Voor de versterking zorgen de transistoren al . . . .
Vr. — . . . en voor de selectiviteit de afgestemde kringen die tussen de transistoren zijn aangebracht.
W. — Je neemt me de woorden uit de mond. Laten we dan ook maar eens een versterkertrap bekijken met een afgestemde ingangs- en uitgangskring. De ingangskring staat tussen basis en emitter, dus parallel aan de ingangsweerstand van de transistor met een waarde tussen 200 en 2000 ohm. Daardoor zal die kring zeer zwaar worden gedempt, zodat er nog maar een heel vlakke resonatiekromme overblijft. Aan de uitgang staan de zaken er iets beter voor, want parallel aan de kring staat hier de collector-emitterweerstand met een waarde van vele tientallen kilo-ohms. Maar toch valt de demping ook hier nog goed te merken.
Vr. — Maar hoe lukt het je nu om de impedanties aan te passen zonder daardoor de kringen al te erg te dempen? Ik denk dat je zult moeten proberen zowel de kool als de geit te sparen . . .
W. — Om daar uit te komen, moet je er op letten, dat je de verhouding van zelfinductie en capaciteit van iedere afgestemde kring goed kiest, en dat je niet de hele wikkeling, maar slechts een gedeelte daarvan, parallel aan de ingang en de uitgang van de transistor zet. Daardoor wordt de demping gereduceerd. En dan moet je er natuurlijk ook nog letten dat de transformatieverhouding zo wordt gekozen, dat de demping gelijk over beide kringen wordt verdeeld.
Vr. — Moet je dan altijd een transformator gebruiken?
W. — Dat hoeft niet. Meestal wordt alleen maar een afgestemde kring met weerstandskoppeling toegepast. Dat is dus een toepassing van impedantiekoppeling. Verder

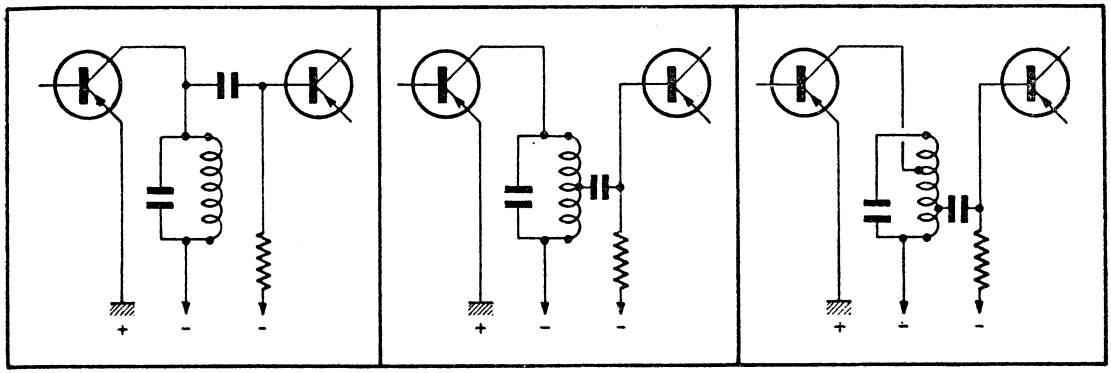


Fig. 109. Links: Koppeling met afgestemde kring (in dit en de volgen de schema's is de positieve batterijklem met het chassis verbonden, hetgeen door een aardteken is aangegeven wat de gewoonte is bij transistorontvangers met P-N-P-transistoren).

Fig. 110. Midden: De koppeling is uitgevoerd met een naar beneden transformerende afgestemde autotransformator. Hierdoor wordt een betere impedantie-aanpassing verkregen dan in het voorafgaande schema.

Fig. 111. Rechts: Om de demping door de uitgangsweerstand van de transistor te verminderen, is de collector op een aftakking van de spoel aangesloten.

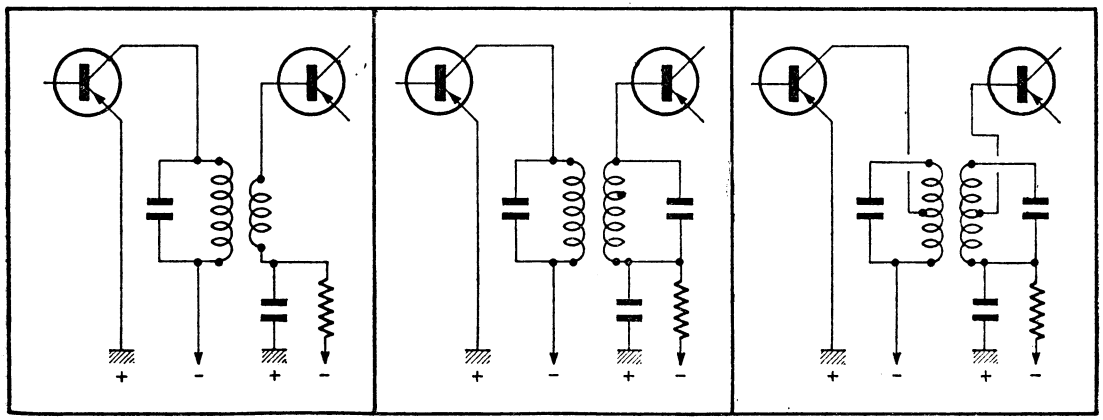
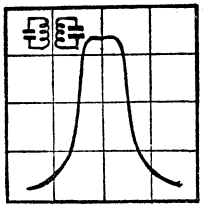


Fig. 112. Links: Transformatorkoppeling met afgestemde primaire.

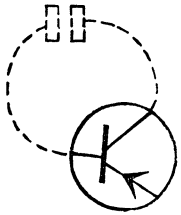
Fig. 113. Midden: Transformator met afgestemde primaire en secundaire.

Fig. 114. Rechts: Hetzelfde schema van de vorige figuur, maar met een hogere selectiviteit: door de aftakkingen op de transformator worden de kringen minder gedempt door de erop aangesloten transistoren.

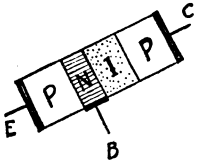


kun je ook gebruik maken van een afgestemde autotransformator. De collector kan dan eventueel nog aan een aftakking liggen.
De beste schakeling met het oog op de selectiviteit en de geluidskwaliteit, is een transformator met afgestemde primaire of met afgestemde primaire en secundaire. De laatstgenoemde oplossing wordt veel bij M.F.-versterkers toegepast, waarbij de koppeling tussen de windingen zo wordt gekozen (kritische koppeling), dat een goede bandfilterwerking wordt verkregen.
Vr. — Je bedoelt, dat de band van de modulatiefrequenties in zijn geheel wordt doorgelaten, en dat alle erbuiten vallende frequenties sterk verzwakt worden.
W. — Ja, Vraagal. Je weet natuurlijk nog best dat een bandfilter het beste middel is om tegelijkertijd hoge selectiviteit en goede geluidskwaliteit te bereiken.

Er schuilt een gevaar . . .



Vr. — Ik merk dat, als ik goede spoelen koop, ik helemaal geen moeilijkheden behoef te verwachten bij het bouwen van mijn ontvanger.
W. — Het spijt me, dat ik je optimistische stemming al weer de kop in moet drukken. Want er schuilt in de transistor nog een gevaar, waar je heel wat moeilijkheden mee kunt krijgen.
Vr. — Vertel dat dan maar! Ik wil de moeilijkheden liever niet uit de weg gaan. Wat voor valstrik kan ik dan nog verwachten?
W. — Het gaat om de inwendige capaciteit tussen collector en basis. Wanneer zowel in de ingangskring als in de uitgangskring afgestemde kringen worden gebruikt op dezelfde frequentie, dan kan die capaciteit (die in de orde van enige tientallen pF kan liggen) voldoende koppeling tussen de kringen geven om de transistor aardig aan het oscilleren te brengen.
Vr. — Ik kan me herinneren dat bij trioden een schermrooster werd toegevoegd om dat soort narigheden ten gevolge van de capaciteit tussen anode en rooster te vermijden. Zo'n schermrooster is tussen anode en stuurrooster aangebracht en staat op een vaste potentiaal. Ik stel voor om bij transistoren hetzelfde te doen.



W. — Inderdaad zijn er P.N.I.P.-transistoren, die op dezelfde manier werken. Ik heb het daar al met je over gehad. De I-laag, die uit intrinsiek halfgeleidermateriaal bestaat, speelt daarbij min of meer de rol van een afscherming en de basis-collector-capaciteit wordt veel lager. Ook bij de drifttransistoren is tussen collector en basis een scheidingslaag aangebracht. Maar bij gewone transistoren neemt men om oscilleren tegen te gaan zijn toevlucht tot een methode die omstreeks 1920 werd voorgesteld door de Amerikaan Hazeltine voor H.F.-versterkers met trioden, dus nog voor de uitvinding van de tetrode, die later de definitieve oplossing werd. Deze methode gaat ervan uit, dat de koppeling via de ongewenste capaciteit uitgebalanceerd kan worden door op het stuurrooster een spanning met dezelfde amplitude in tegenfaze aan te brengen. Voor deze zgn. *geneutrodyniseerde* triodeschakeling was een condensatortje nodig, dat een deel van de versterkte spanning naar het stuurrooster terugbracht. Dit condensatortje werd met een punt van de anodekring verbonden, dat in tegenfaze stond met de spanning op de anode.
Vr. — Ik denk, dat het een soort tegenkoppelschakeling is voor hoge frequenties. Bij transistoren moet het tegenkoppelsignaal naar de basis worden teruggevoerd. Maar hoe moet je nu zorgen dat het tegenkoppelsignaal precies in faze gedraaid is? Moet je daarvoor een faze-omkeertrap inbouwen?
W. — Maak het niet zo moeilijk! Het lukt altijd wel een punt in de schakeling te

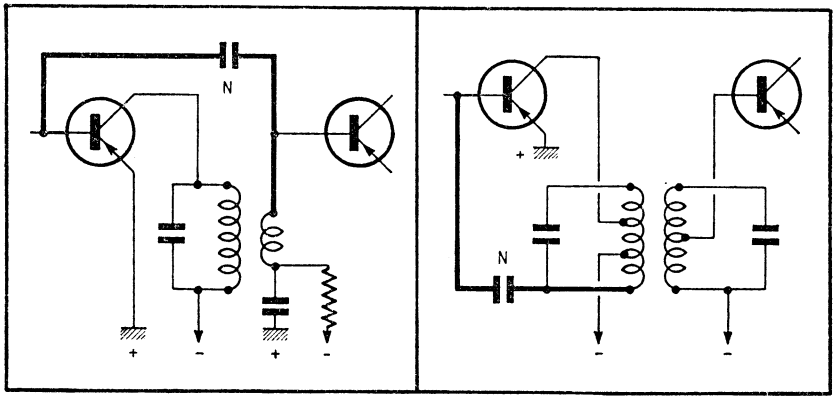


Fig. 115. De condensator N zorgt er voor, dat de invloed van de inwendige basis-collectorcapaciteit wordt geneutrodyniseerd. Soms wordt in serie met deze condensator nog een weerstand opgenomen. Meestal is dit echter niet nodig.

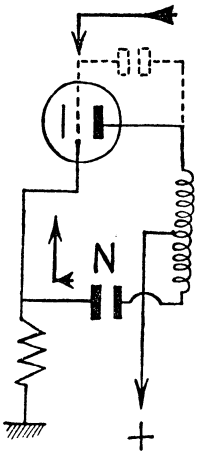
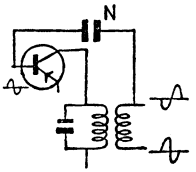
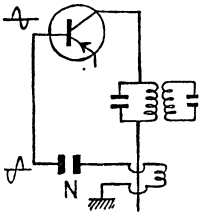


Fig. 116. Neutrodyneschakeling bij gebruik van transformatorkoppeling met afgestemde primaire en secundaire.





vinden, waar het signaal precies in tegenfaze is met het signaal op de collector. Wanneer de schakeling met afgestemde primaire wordt gebruikt, kan de faze van de secundaire zodanig worden gekozen, dat de zijde die met de basis is verbonden, het juiste signaal voert.

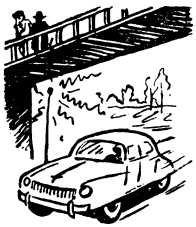
Vr. — Dan wordt de schakeling heel eenvoudig. Want dan behoef je alleen maar een condensator N tussen de beide basisaansluitingen aan te brengen. Die condensator moet zo groot worden gekozen, dat het teruggevoerde signaal dezelfde amplitude heeft als het signaal dat door de collector-basis-capaciteit direct van de collector naar de basis wordt teruggevoerd. En waarom zou je dezelfde methode niet kunnen toepassen bij gekoppelde kringen? Ook daar zul je wel een signaal in tegenfaze kunnen vinden op een van de beide uiteinden van de secundaire kring.

W. — Het is wel jammer, maar dat gaat niet! Want de spanning op de secundaire kring is maar een kwartperiode in faze verschoven in plaats van een halve periode. Zo eenvoudig gaat het dus niet. Wel zou je een hulpwikkelingetje kunnen aanbrengen voor de neutrodynisatie. Maar nog gemakkelijker is het een aftakking op de primaire aan te brengen, die met de minklem van de voedingsspanning wordt verbonden. De zijde van de spoel die niet met de collector is verbonden, zal dan een tegenfazesignaal voeren. Die hoef je dan alleen nog maar via een condensator N met de basis te verbinden.

Vr. — Is er bij H.F.- en bij M.F.-versterkers altijd neutrodynisatie nodig?

W. — Neen. Dikwijls worden de kringen door de lage transistorweerstanden al zo sterk gedempt, dat iedere neiging tot genereren voldoende wordt onderdrukt. Verder behoef je bij gebruik van P-N-I-P- en drifttransistoren geen neutrodynisatie meer toe te passen . . . Ook moet je er om denken, Vraagal, dat alle onderdelen voor temperatuurscompensatie (tegenkoppeling met een ontkoppelde emitterweerstand) en voor stabilisatie van het werkpunt bij dit soort versterkers even goed gebruikt moeten worden, ook al heb ik ze voor de duidelijkheid niet in de schema's opgenomen.

Automatische regeling



Vr. — Kun je met transistoren ook automatische versterkingsregelingsschakelingen maken, die werken op de sterkte van het ontvangen signaal? Ik bedoel een fading-compensatieschakeling, die voorkomt dat het uitgangssignaal op en neer gaat bij sterktevariaties van het ontvangen signaal. Dat signaal kan in sterkte wisselen door fading of door andere oorzaken, zoals bijvoorbeeld bij een autoradio als je onder een brug doorrijdt.

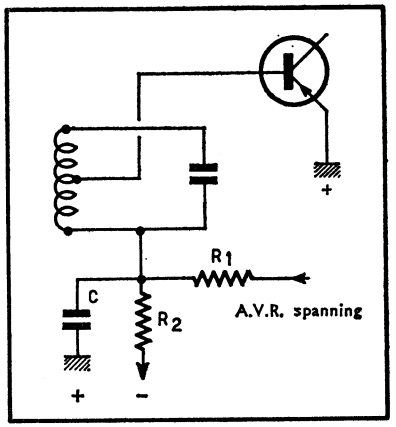
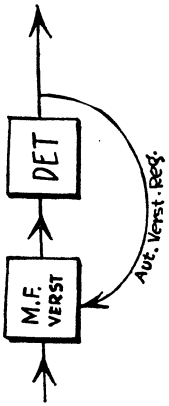


Fig. 117. Versterkertrap voor H.F.- of M.F.-signalen met automatische versterkingsregeling.



W. — Bij transistorschakelingen wordt de automatische versterkingsregeling (AVR) net zo uitgevoerd als bij buizenapparaten. Je weet dat de versterking van de transistor van zijn steilheid afhangt, die weer een functie is van de emitterstroom. Je kunt dus de versterking regelen door verandering van de basisinstelling. Als je, wat meestal het geval is, een P-N-P-transistor gebruikt, neemt de emitterstroom en daarmee de versterking af, als de basis minder negatief wordt.

Vr. — Ik denk dat daarvoor een spanning uit de detector wordt gehaald, die afgevlakt wordt met een weerstand en een ontkoppelcondensator.

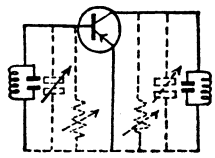
W. — Zo is het precies. Toch moet je er in dit geval weer om denken, dat voor het regelen van een transistor niet alleen spanning, maar ook vermogen nodig is. Daarom is het dikwijls nodig de regelspanning te versterken. Zoals je straks wel zult zien, vormt dat niet zo'n groot probleem.

Vr. — Voorlopig zal ik maar net doen alsof de H.F.- of M.F.-trap zonder meer aangesloten kan worden op de AVR-leiding. De spanning daarvan moet evenredig toenemen met de sterkte van het ontvangen signaal, terwijl deze spanning via een weerstand R_1 en de ingangskring aan de basis wordt toegevoerd. Verder is nog een weerstand R_2 aangebracht, die met de negatieve voedingsspanning is verbonden. Samen met R_1 vormt deze weerstand een spanningsdeler. Wanneer slechts een klein signaal wordt ontvangen, zal de basis vrij sterk negatief worden, zodat de transistor zo veel mogelijk versterkt; bij sterkere signalen wordt de basis minder sterk negatief en zal de versterking afnemen. En zo zie je, dat er geen wolkje aan de lucht is.

Een onverwachte moeilijkheid

W. — Ik geloof dat ik je vreugde weer eens moet temperen, want je optimistische stemming is niet helemaal verantwoord. Je moet niet vergeten, dat bij een transistor

alles aan elkaar hangt; iedere verandering van een van de grootheden sleept alle andere mee. In ons geval zullen door de verandering van de emitterstroom tegelijkertijd de in- en uitgangscapaciteit in dezelfde richting mee veranderen.



Vr. — Zodat door de regeling de afgestemde kringen in de ingang en in de uitgang van de transistor buiten afstemming komen, is het niet?

W. — Inderdaad, Vraagal. Overigens is dat nog niet het enige bezwaar. Want ook de ingangs- en uitgangsweerstand veranderen met de emitterstroom. Bij toenemende stroom worden deze weerstanden groter.

Vr. — Is dat erg? Hierdoor zou de demping op de afgestemde kring bij regeling een beetje afnemen. De ontvanger zou dan selectiever worden . . .

W. — . . . en de geluidskwaliteit zou een stuk minder worden vanwege de smallere band, waardoor de hoge frequenties het loodje leggen.

Vr. — Ik ken je nu al lang genoeg, Weetal, om te weten dat jij de moeilijkheden altijd eerst heel hoog opstapelt, om ze daarna als bij toverslag te doen verdwijnen. Kom dus maar op met je toverstaf.

W. — Om je de waarheid te zeggen, is het helemaal niet gemakkelijk om in dit geval een oplossing te vinden, die aan alle gestelde eisen tegelijk voldoet. We zullen dan ook tevreden moeten zijn met een compromis. Om dat te bereiken kan de werking van de regelaar sterker worden gemaakt door ook nog de demping van een afgestemde kring te regelen. De kring moet bij toenemende signaalsterkte sterker worden gedempt. Daarvoor heb ik een heel mooie schakeling meegebracht. Hier is het schema. Je vindt er weer de bekende versterkingsregeling in, met de van de detector afkomstige regelspanning op de basis van de transistor. Maar bovendien zie je, dat er zo maar een diode gezet is tussen de top van de eerste kring van de ingangstransformator en de onderzijde van de eerste kring van de uitgangstransfor-

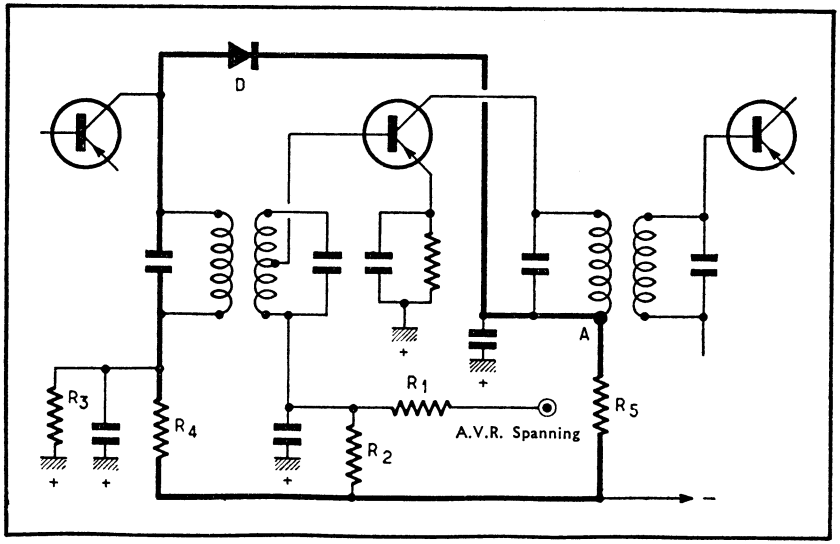


Fig. 118. Schema voor versterkte automatische versterkingsregeling, waarin de diode D een van de signaalamplitude afhankelijke demping geeft op de eerste afgestemde kring.

mator. Ook is nog een extra weerstand R_5 in de collectorvoedingsleiding aangebracht. Je moet maar eens uitzoeken waar die onderdelen voor dienen.

Vr. — Nu, laten we dan maar aannemen dat het ontvangen signaal sterker wordt. De regelspanning, die via R_1 op de basis van de tweede transistor komt, wordt dan minder negatief en de emitterstroom van die transistor neemt af. Daarmee neemt ook zijn collectorstroom af. De spanningsval over R_5 wordt eveneens minder, waardoor punt A minder sterk negatief wordt. De diode D zal nu meer stroom doorlaten, omdat er een hogere spanning over staat. Ik geloof dat ik er zo wel ben . . .

W. — Nee, je bent er nog niet. Want de stroomkring waarvan de diode deel uitmaakt (ik heb die dik getrokken) staat, zoals je ziet, parallel aan de eerste afgestemde kring. Wanneer er een grotere diodestroom gaat lopen, betekent dit dat de primaire kring meer wordt gedempt. Op die manier wordt een gedeelte van de kringenergie in de diode gestopt.

Vr. — Nu snap ik het! Om geen last te hebben van de bij grotere signaalsterkte toenemende inwendige weerstanden van de transistor, heb je met opzet een kleiner wordende weerstand aangebracht. De ene verandering wordt dus door de andere gecompenseerd. Verder daalt de versterking door de extra demping op de kring, zodat de AVR beter werkt.

W. — Vraagal, ik geloof dat het niet lang meer zal duren of jij kunt mij les geven in de theorie en de praktijk van de transistoren . . .

DERTIENDE PRAATJE

VAN H.F. NAAR M.F. EN TENSLOTTE NAAR L.F.

Vraagal weet nu hoe met transistoren signalen versterkt kunnen worden, die in het gebied van de radiofrequenties, de middenfrequenties of de geluidsfrequenties liggen. Maar hij is er nog niet achter hoe de ene frequentie in de andere omgezet moet worden. Daarom zal Weetal zijn vriend in dit praatje wegwijs maken op het gebied van de detectie en de frequentietransformatie. Daarbij komen meteen een aantal oscillatorschakelingen met transistoren aan de beurt.

Samenvatting: Diodedetectie. — Detectiedrempel. — Uitgevoerde schema's. — Detectie met een transistor. — Detector met terugkoppeling. — Oscillatorschema's. — Frequentietransformatie met en zonder afzonderlijke oscillator.

De laatste onbekende gebieden

Vraagal. — Terwijl we in een tijd leven waarin we zelfs precies weten hoe de maan er uit ziet, moet ik toch af en toe denken hoe prettig onze grootvaders het hadden, toen er op de wereldkaarten nog witte gebieden voorkwamen. Dat waren onbekende landstreken waarover schrijvers als Jules Verne heerlijk konden dromen.

Weetal. — Ik begrijp heel goed waar je naar toe wilt. Van alle trappen van een ontvanger hebben we er nog twee niet bekeken: de detector en de mengtrap. Maar die witte gebieden kunnen we nu heel gemakkelijk opvullen, omdat wij hier geen enkele moeilijkheid meer behoeven te verwachten en je natuurlijk al wel weet hoe diodedetectie in zijn werk gaat.

Vr. — Natuurlijk hebben we vroeger al eens bekeken hoe het H.F.-signaal met een diode kan worden gelijkgericht; na de detectie blijft maar één helft van de wisselspanning over, die met een condensator wordt afgevlakt, waarbij het laagfrequentsignaal over een weerstand beschikbaar komt.

Detectie = gelijkrichting

W. — Het schema dat ik je nu laat zien, zul je wel helemaal snappen. De wisselspanning van de laatste M.F.-transformator wordt met een puntcontactdiode D gelijk-

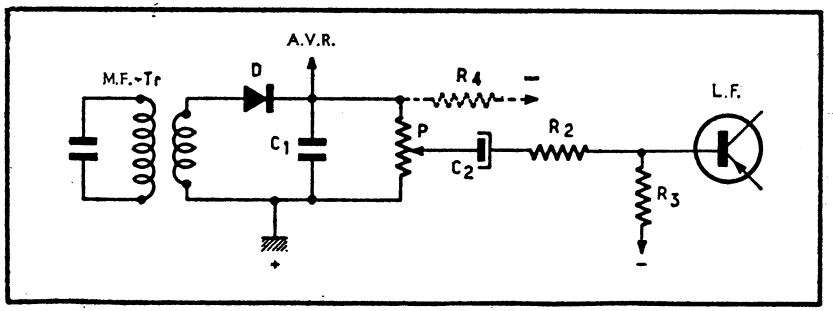
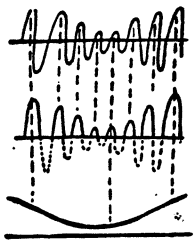


Fig. 119. Detectieschakeling met een diode geschakeld tussen de laatste M.F.-transformator en de eerste L.F.-transistortrap.



gericht, waardoor over de weerstand P een door de condensator C_1 afgevlakt audiosignaal ontstaat. De geluidssterkte wordt geregeld met behulp van het loopcontact op P (potentiometer) en het audiosignaal wordt via een elektrolytische condensator C_2 (het gaat hier om lage frequenties) op de basis van de eerste L.F.-transistor gezet.
Vr. — Waarvoor dient de weerstand R_2?
W. — Daardoor wordt voorkomen, dat de lage ingangsweerstand van de transistor een te grote demping op de M.F.-kring uitoefent. Verder moet je onthouden, Vraagal,

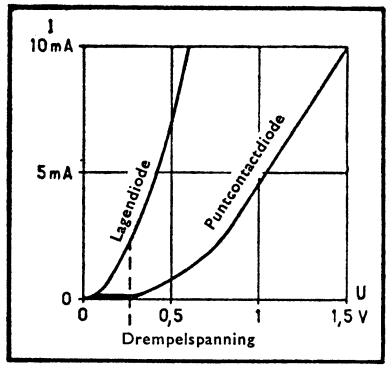
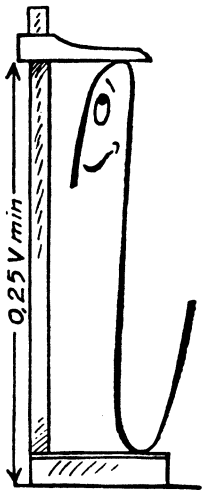


Fig. 120. Grafieken voor de diodestroom als functie van de aangelegde spanning. Men lette erop, dat de puntcontactdiode pas stroom begint door te laten bij spanningen in de buurt van 0,25 V.



dat een puntcontactdiode pas stroom doorlaat, wanneer het te detecteren signaal een bepaalde waarde overschrijdt. Men noemt dat de detectiedrempel. Om nog signalen beneden deze drempel te kunnen detecteren en de vervorming voldoende laag te houden voor signalen die maar iets boven de drempel (die in de buurt ligt van 0,25 V) uitkomen, is het aan te bevelen de diode een voorspanning te geven ter waarde van de drempelspanning. Daarom is nog een extra weerstand R_4 aangebracht, die veel groter is dan P en die met P een spanningsdeler vormt over de voedingsspanning, zodat de diode ook bij kleine signalen blijft geleiden.
Vr. — Ik zie dat je het volledig gedetecteerde signaal gebruikt voor de AVR.
W. — En volgens mij is dat nog te weinig om er onder alle omstandigheden voldoende regeling mee te bereiken. Maar voordat we het over een schakeling voor versterkte regelspanning hebben, wilde ik eerst eens zien of je uit een wat ingewikkelder detectorschema kunt komen (zie fig. 121).
Vr. — Ik denk dat het wel zal lukken. Als ik het vergelijk met het vorige schema, is het enige verschil de toevoeging van het laagdoorlatend filter C_3-R_7-C_4, dat je hebt aangebracht om ook het laatste restje M.F.-signaal uit te filteren in het over P verkregen audiosignaal. Daarnaast wek je de regelspanning op over een aparte weerstand R_5, ontkoppeld met R_6 en C_5. Weerstand R_4 zorgt voor een juiste instelling van de diode. Zoals je ziet, zijn in dit schema de stroomkringen voor de automatische versterkingsregeling en voor het signaal beter gescheiden. Maar ik zou toch ook graag willen horen hoe je het regelsignaal kunt versterken.
W. — Dat gaat heel eenvoudig, door daarvoor een transistor te gebruiken, of om het wat nauwkeuriger uit te drukken, door de emitter-basis-overgang van een transistor als detectiediode te laten fungeren. De drempelspanning hiervan is aanmerkelijk lager dan bij puntcontactdioden, zodat over de weerstand R_2 (fig. 122) maar een heel geringe negatieve spanning behoeft te staan. Deze spanning mag beslist niet hoger dan

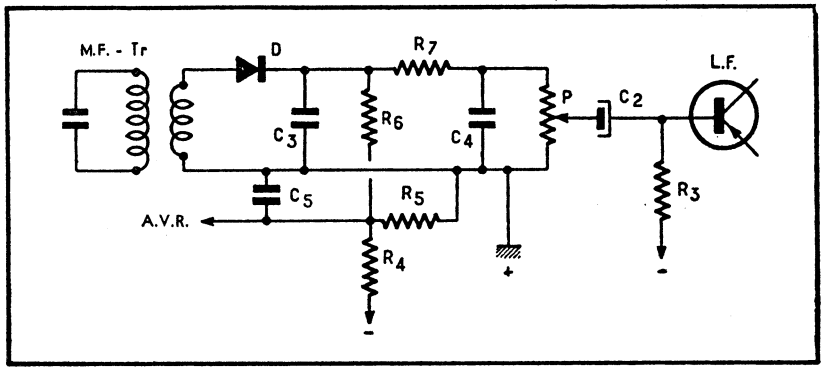
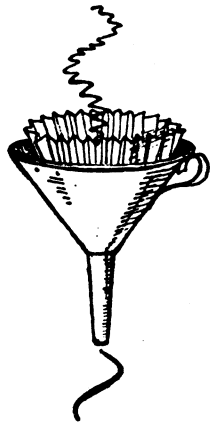


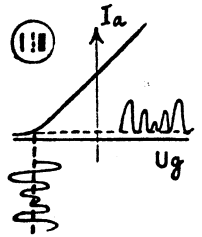
Fig. 121. Detectieschakeling waarbij de regelspanning opgewekt wordt over een aparte belastingsweerstand en waarin het gedetecteerde audiosignaal een laagdoorlatend filter (C_3–R_7–C_4) doorloopt.



0,1 V zijn; anders gaat de transistor in plaats van als detector als M.F.-versterker werken, wat nu juist niet de bedoeling is ... De transistor moet het signaal uitsluitend doorlaten tijdens het negatiefgaande deel van de wisselstroomperioden.

Vr. — Maar dat is precies als bij een anodedetector. Daar wordt het werkpunt ook ingesteld in het afsnijpunt van de I_a-U_g-karakteristiek. De gelijkgerichte collectorstroomimpulsen leveren over de belastingsweerstand R_3 een audiosignaal op, dat door de transistorwerking al versterkt is. Dit signaal wordt door het filter C_1-R_4-C_2 ontdaan van M.F.-signaalresten en dan aan de potentiometer P toegevoerd, om tenslotte verder in de L.F.-versterker te worden versterkt.

W. — Dat klopt. Verder kun je zien dat tussen de collector van de detectietransistor en aarde nog een potentiometer R_5-R_6 aanwezig is, waarover eveneens het gelijkgerichte versterkte signaal staat. Het over R_6 afgetakte deel wordt door het filter R_7-



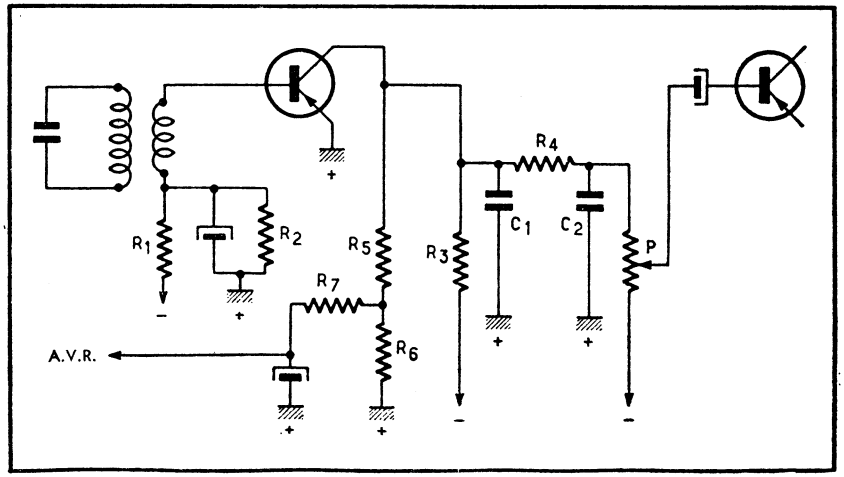
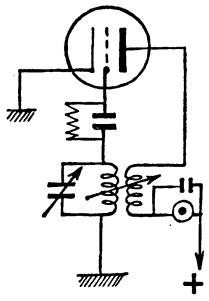


Fig. 122. Detectie met een transistor, waardoor een versterkt AVR-signaal verkregen wordt.



elco ontdaan van M.F.-signaalresten en van het audiosignaal, en als versterkte AVR-spanning naar de bases van de te regelen transistoren gevoerd.

Het tegengestelde van tegenkoppeling

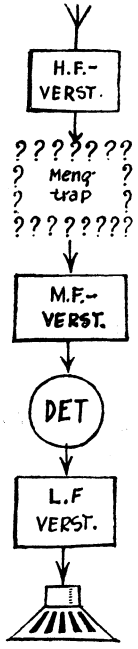
Vr. — Ik begrijp best dat de regelspanning op deze manier flink wordt versterkt. En nu we het toch over detectie hebben, zou ik je willen vragen of je met transistoren ook een teruggekoppelde detector kunt maken. Ik heb altijd versteld gestaan over de gevoeligheid van die schakeling.

W. — Natuurlijk. Daarvoor moet je een deel van het versterkte signaal van de uitgang naar de ingangsketen terugvoeren. Daarbij moet je er vanzelfsprekend wel op letten dat...

Vr. — ...het teruggekoppelde signaal in faze is met het ingangssignaal. Anders krijg je tegenkoppeling, waardoor de versterking in plaats van toe- juist afneemt.

W. — Verder moet je nog ergens anders om denken: de terugkoppeling tussen de ingangskring en de uitgangskring mag nooit al te sterk worden: anders...

Vr. — ...wordt de teruggekoppelde detector een oscillator en zendt een ongewenst signaal uit, waardoor de ontvangers van de buren last van fluitjes krijgen.



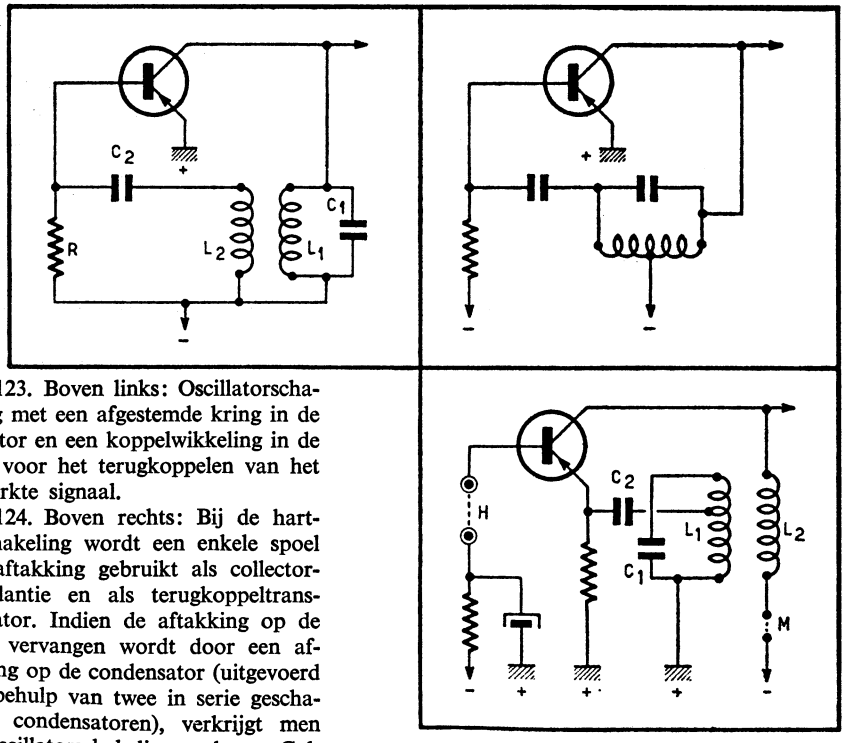


Fig. 123. Boven links: Oscillatorschakeling met een afgestemde kring in de collector en een koppelwikkeling in de basis voor het terugkoppelen van het versterkte signaal.

Fig. 124. Boven rechts: Bij de hartleyschakeling wordt een enkele spoel met aftakking gebruikt als collectorimpedantie en als terugkoppeltransformator. Indien de aftakking op de spoel vervangen wordt door een aftakking op de condensator (uitgevoerd met behulp van twee in serie geschakelde condensatoren), verkrijgt men de oscillatorschakeling volgens Colpitt.

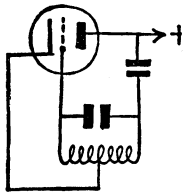
Fig. 125. Hiernaast rechts: Oscillatorschakeling van het meest gebruikte type, met een afgestemde kring in de emitter, die inductief gekoppeld is met een in de collector opgenomen terugkoppelwikkeling. Voor de betekenis van de letters H en M wordt naar de tekst verwezen.

W. — De schakeling gaat oscilleren wanneer de teruggekoppelde wisselstroomenergie groter is dan de verliezen in de ingangskring. Natuurlijk, Vraagal, hoeft niet iedere oscillator moeilijkheden met de buren op te leveren. Je kunt er ook op een goede manier gebruik van maken, bijvoorbeeld als mengoscillator.

Vr. — Ik ben blij, dat je nu ook het laatste „terra incognita" op mijn landkaart hebt bereikt. Ik denk dat je met transistoren, die overal zo goed voor te gebruiken zijn, ook wel een groot aantal oscillatorschakelingen zult kunnen maken.

W. — Daarin vergis je je niet. Je moet wel op een aantal dingen letten: het ingangssignaal kan óf de basis, óf de emitter sturen. Verder kan de afgestemde kring óf in de basis, óf in de collector worden opgenomen. Tenslotte valt er een oscillatorschakeling te maken met slechts één spoel, die tegelijkertijd voor afstemming en terugkoppeling dient.

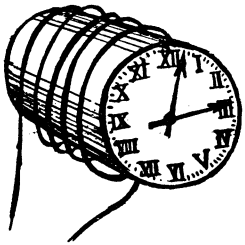
Vr. — Als je het goed vindt, zal ik een eenvoudige schakeling tekenen (fig. 123). Ik zet de afgestemde kring in de collectorleiding en ik koppel de spoel L_1 met een tweede spoel L_2, die via C_2 de basis van de transistor stuurt. Voor de gelijkstroominstelling van de basis zorgt de weerstand R. Denk je dat die schakeling kan oscilleren?



W. — Dat zal best gaan, als je er maar voor zorgt dat de terugkoppelspoel in de goede richting aangesloten is.

Vr. — Zie je kans van te voren uit te kienen hoe dat moet?

W. — Daarvoor moet je altijd van de hartleyschakeling uitgaan. Die heb ik hier in transistoruitvoering getekend (fig. 124). Uit het schema zie je, dat de spanningen tussen collector en voeding en tussen voeding en basis in faze zijn. Deze spoelen zijn dan ook in dezelfde richting gewikkeld. Als je dezelfde regel op het schema van fig. 123 loslaat, waarbij de wikkeling van L_1 bijvoorbeeld in de richting van de wijzers van de klok loopt als je van de collector naar de minklem gaat, moet je er voor zorgen, dat de wikkeling van L_2 in dezelfde richting loopt als je van de negatieve klem naar de basis gaat.

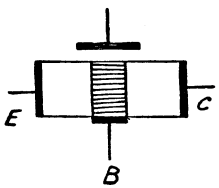


Vr. — Maar als je nu in plaats van op de basis, op de emitter wilt sturen, denk ik vast dat je de aansluitingen van de terugkoppelspoel moet omdraaien.

W. — Daarin heb je gelijk. Kijk maar eens naar dit schema, waar de afgestemde kring L_1-C_1 via C_2 met de emitter is verbonden. Als je in dit schema met de wijzers van de klok meedraait als je bij L_1 van de emitter naar aarde gaat, moet je tegen de wijzers van de klok inlopen als je bij de terugkoppelspoel L_2 van de voedingsklem naar de collector gaat. Bij sturing op de emitter moet de wisselspanning namelijk in tegengestelde richting werken als bij sturing op de basis.

Trioden zijn overal goed voor

Vr. — Ik heb zo'n idee, dat ik best een stuk of tien oscillatorschema's zou kunnen tekenen. Maar ik ben er zeker van, dat je het alleen maar over die schema's gehad hebt, omdat je ze voor de mengtrap nodig hebt. En hoe je dat wilt aanleggen, begrijp ik helemaal niet. Hoe kun je nu een mengoscillator maken met transistoren die maar drie elektroden hebben? Ziet men geen kans om halfgeleider-hexoden, -heptoden of -octoden te maken?



W. — Dat is tot nog toe niet het geval. Misschien zal het nog wel eens gelukken halfgeleiderelementen te maken met twee stuurelektroden, zodat de stroom zowel gestuurd kan worden door de basis als door een hulpelektrode, die er voor zorgt dat een gedeelte van de landingdragers zijdelings wordt afgebogen ... Maar in afwachting

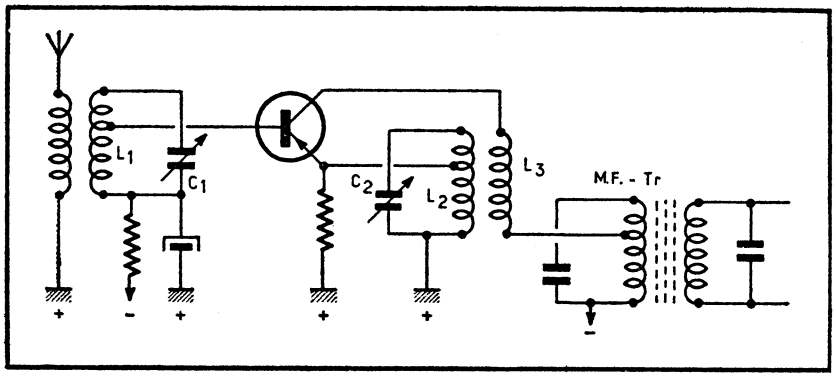


Fig. 126. Mengschakeling, waarbij gebruik wordt gemaakt van de oscillatorschakeling uit de vorige figuur.

daarvan geloof ik, dat het beter is het voorlopig maar met transistortrioden te blijven doen. De eerste superheterodyne ontvangers werden toch ook al gebouwd in een tijd dat er alleen nog maar drie-elektrodenbuizen bestonden.

Vr. — Hoe denkt je met dezelfde transistor het hulposcillatorsignaal op te wekken,

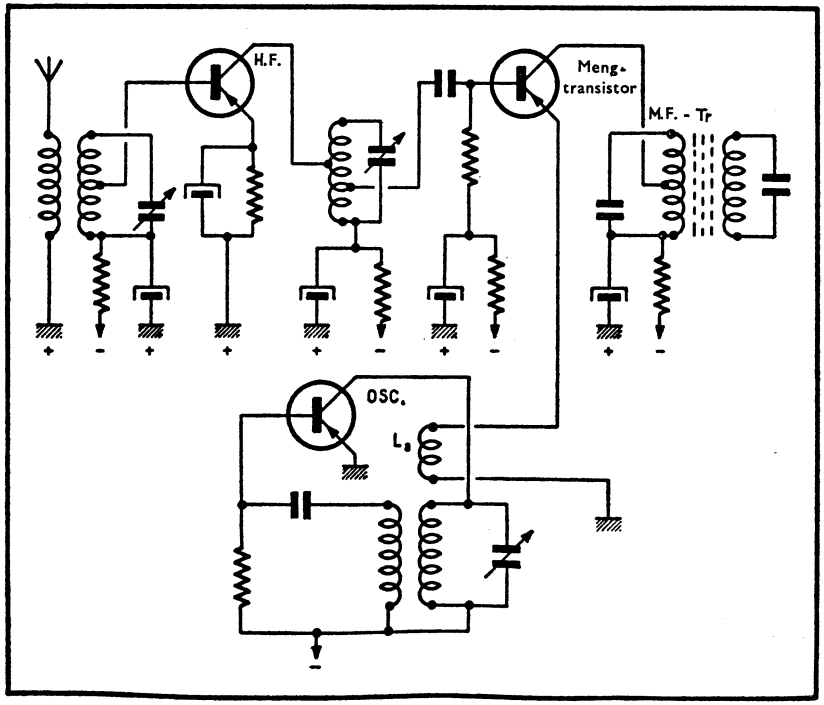
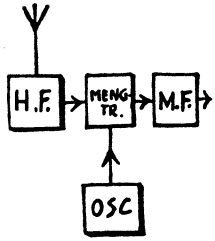


Fig. 127. Mengtrap voorafgegaan door een H.F.-voorversterker, waarbij het oscillatorsignaal met een afzonderlijke transistor wordt opgewekt.

dat samen te voegen met het H.F.-antennesignaal en beide te detecteren om daaruit het M.F.-zwevingskanaal te halen?

W. — Dat valt best mee, Vraagal. Begin maar met de oscillator uit fig. 125, knip de basisleiding bij H open en plaats tussen de uiteinden een op het antennesignaal afgestemde kring; daarna moet je de collectorleiding bij M openknippen en op die plaats de primaire van de eerste M.F.-transformator tussenvoegen. Wanneer je dat gedaan hebt, heb je het schema van fig. 126 gekregen. Als de oscillatorkring C_2-L_2 wordt afgestemd op een frequentie die een bedrag gelijk aan de middenfrequentie, van de frequentie van het door de antenne opgevangen signaal verschilt, werkt de schakeling zonder bezwaar als frequentietransformator.

Vr.— Dat is zo. Het ingangssignaal staat op de basis, tussen emitter en collector heb je een oscillatie opgewekt en je hebt er vast wel voor gezorgd de transistor in een voldoende niet-lineair punt van de karakteristiek in te stellen, zodat die goed als zwevingsdetector werkt. Toch vind ik het maar slavenwerk voor zo'n transistor om tegelijkertijd al die verschillende karweitjes te moeten opknappen.



W. — En toch heeft de transistor daar niet zo veel moeite mee. Maar als je het leuker vindt voor de oscillator en voor de mengtrap afzonderlijke transistoren te gebruiken — en dat kan bij KG-ontvangst wel eens beter zijn — dan kun je dat gerust doen. Als voorbeeld heb ik een schema voor je getekend met een H.F.-voorversterker, gevolgd door een mengtransistor met een aparte oscillator. Zoals je ziet, wordt het oscillatorsignaal op de emitter van de mengtransistor gezet via een koppelspoel L_a.

Vr. — Dat vind ik een veel leuker schema en het doet me genoegen dat ik nu geen enkel wit gebied meer op mijn kaart van het wonderschone transistorland heb.

VEERTIENDE PRAATJE

TREINTJE SPELEN

Gaat dit praatje over treinen, omdat hiermee de reis die onze jonge vrienden gemaakt hebben in het mooie land van de transistoren wordt besloten? ... Deze laatste ontmoeting zal aan Weetal en Vraagal de kans geven het geleerde toe te passen bij het leren lezen van volledige schema's. Nadat onze vrienden hun hierbij opgedane kennis hebben gebruikt, slaan zij nog een blik op de wonderen die de toekomst op het gebied van de kristaltrioden zal brengen.

Samenvatting: Volledig ontvangerschema. — Ferrietantenne. — Verschillende toepassingsmogelijkheden voor transistoren. — Gelijkstroomomzetter. — De toekomst van de transistor.

Speelgoed voor de groten, zoet houden van de kleinen

Vraagal. — Je moet niet verrast kijken, Weetal, dat je me met een elektrische trein ziet spelen. Hij is voor mijn neefje, en ik moet de goede werking van de afstandbediening en de wissels nakijken.

Weetal. — Ja, dat zeggen alle vaders wanneer ze een elektrische trein aan hun zoon geven, omdat ze er niet voor uit durven te komen hoeveel plezier ze er zelf mee hebben ... Maar je verwent je neef. Wat een verschillende wagens! Personenrijtuigen met verschillende klassen, slaapwagens, restauratiewagens, koelwagens, tankwagens, platte goederenwagens en wat al meer? ...

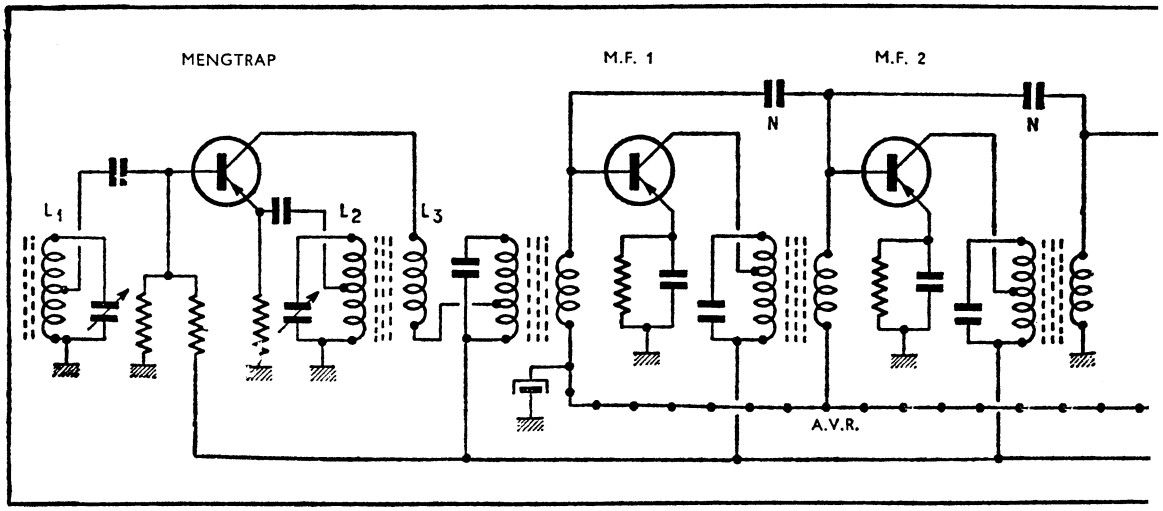
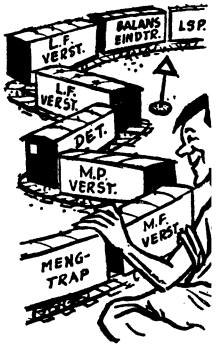


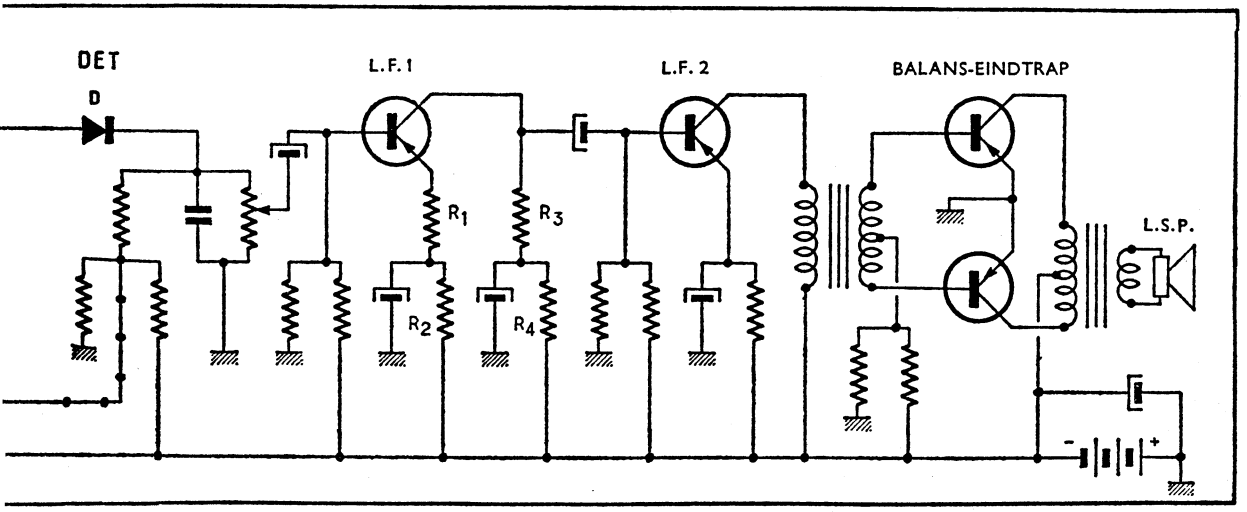
Fig. 128. Principeschema van een draagbare transistorontvanger, geheel samengesteld uit reeds behandelde schakelingen. De waarden van de onderdelen zijn niet aangegeven, aangezien deze afhangen van de te gebruiken transistoren.

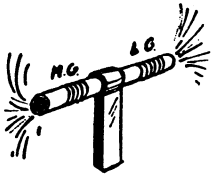


Vr. — Daarmee kun je eindeloos veel verschillende treinen samenstellen.
W. — Op dezelfde manier kan met de transistorschakelingen die we bestudeerd hebben, een enorm aantal verschillende ontvangers worden samengesteld. Het zou geen nut hebben ze allemaal stuk voor stuk te bekijken, maar als je wilt, kunnen we bij wijze van voorbeeld de wagens ... ik bedoel de volgende schakelingen, wel eens achter elkaar plaatsen:
— mengtrap, uit fig. 126;
— twee trappen M.F.-versterking volgens fig. 115 (maar met aftakkingen op de primaire wikkelingen om de demping te beperken);
— detector uit fig. 119;
— twee trappen L.F.-versterking, RC-gekoppeld volgens fig. 90;
— de balanseindtrap van fig. 101.
Ik zou je willen vragen dit schema eens nauwlettend te bestuderen, want dit komt, afgezien van enige ondergeschikte punten, overeen met dat wat toegepast is in het grootste deel van de draagbare ontvangers die je zomervakantie op het strand zo hebben verknoeid. Zie je er nog punten in, waarover je nog wat wilt weten?

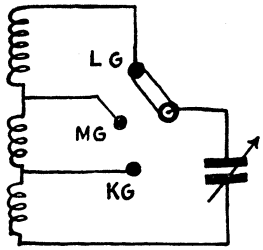
De miniatuur-raamantenne

Vr. — Ik begrijp niet waarom je geen antenne hebt getekend.
W. — Voor deze ontvanger is geen antenne nodig. De ingangsspoel L_1 is op een lange ferrietstaaf gewikkeld en werkt zo als raamantenne.
Vr. — Moet zo'n spoel geen grote diameter hebben om voldoende signaal op te vangen?
W. — Nee, want het ferriet is een keramisch magnetisch materiaal met hoge permeabiliteit. Dat wil zeggen, dat hierdoor een groot deel van de in de buurt aanwezige krachtlijnen lopen. En op deze manier kan zo'n kleine spoel met een diameter van





nauwelijks 2 cm hetzelfde opvangend vermogen hebben als een grote raamantenne. Hij beschikt verder ook over de richtwerking van de raamantenne, zodat het nodig is draagbare ontvangers in de goede richting te plaatsen. Hiermede wordt nog selectiviteitswinst verkregen, omdat ongewenste signalen uit andere richtingen verzwakt worden. Je moet er wel aan denken, Vraagal, dat in plaats van de antennespoel L_1 (hetzelfde geldt ook voor de oscillatorspoelen L_2 en L_3), in werkelijkheid een aantal spoelen met een golfbereikschakelaar zijn aangebracht. Voor ontvangers met lange- en middengolfspoelen zijn dus twee spoelen aanwezig, en indien ook kortegolven ontvangen kunnen worden, is een derde spoel aangebracht, die met een kleine antenne verbonden is, want een raamantenne werkt niet zo goed bij korte golven. Zie je nog andere punten, waarvan je denkt dat je ze niet begrijpt?



Alles is duidelijk

Vr. — Nee, die zie ik niet. Ik merk dat de basisvoorspanningen van alle transistoren met behulp van spanningsdelers vast zijn ingesteld.

W. — Het is wel belangrijk die spanningen instelbaar te houden, door van ieder paar weerstanden er een als regelbare weerstand uit te voeren. De keuze van het juiste werkpunt is buitengewoon belangrijk.

Vr. — Ik denk, dat daarom ook de beide vermogenstransistoren uit de balanseindtrap in klasse B zijn ingesteld om een zuinig gebruik van de batterij te verkrijgen.

W. — Ik zou nog wel eens willen kijken of je weet waarom de weerstanden R_1, R_2, R_3 en R_4 zijn aangebracht?

Vr. — R_1, die niet ontkoppeld is, is een serie-tegenkoppelweerstand. Hierdoor wordt de vervorming verminderd. Verder werkt hij samen met R_2 als gelijkstroomtegenkoppeling, waardoor deze trap ongevoelig voor de temperatuur wordt. Wat betreft R_3, dat is de normale koppelweerstand, terwijl R_4 met de bijbehorende condensator de ontkoppeling van de collectorstroom verzorgt ter voorkoming van ongewenste terugwerking.

Lang leve de transistor

W. — Bravo, Vraagal! Ik heb het prettige gevoel mijn tijd nuttig te hebben besteed met jou de werking en de toepassing van transistoren in versterkers en radio-ontvangers uit te leggen.

Vr. — Maar als ik het goed heb begrepen, zijn die dingetjes ook nog wel ergens anders voor te gebruiken.

W. — Denk eens in, mijn vriend, met hoeveel enthousiasme de elektronici zich meester hebben gemaakt van die wonderbaarlijke kristaltrioden met hun zeer kleine afmetingen en gewicht, hun meer dan bescheiden energieverbruik (vergeleken met dat van de buizen die gloeistroom nodig hebben), en met hun merkwaardig lange levensduur. Tien jaar na de geboorte van de eerste transistor werd reeds door volkomen ernstige lieden beweerd, dat deze kristaltrioden op zijn minst 100 000 uur zouden kunnen meegaan. Het meest dwaze van deze geschiedenis is, dat de tien jaar in feite slechts 87 648 uren tellen en daarbij houd ik dan nog rekening met de schrikkeljaren... Toch ziet het er naar uit, dat de extrapolatie die men toen gemaakt heeft, hoe gewaagd deze ook scheen, precies uitkomt en dat de waarheid misschien nog fraaier is.

Vr. — Ik heb gehoord, dat in rekenmachines heel wat transistoren worden gebruikt. In sommige zitten er wel 10 000.

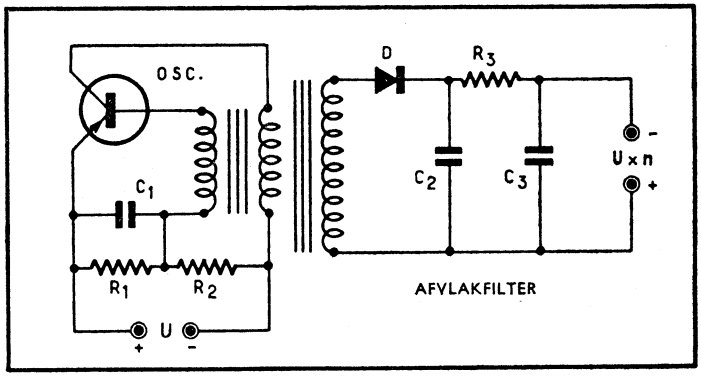
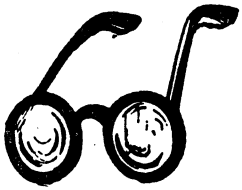
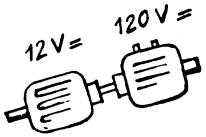


Fig. 129. Gelijkstroomomzetter voor een n maal zo hoge uitgangsspanning. De spanningsdeler R_1–R_2 is aangebracht om de basis de juiste voorstroom te geven.

W. — Je begrijpt, wat een voordeel in dat geval hun kleine afmetingen en hun uiterst geringe warmte-ontwikkeling betekenen.
Vr. — Ik heb gelezen, dat het door het kleine volume van de transistor ook mogelijk geworden is gehoorbrillen te vervaardigen, dat wil zeggen, gehoorapparaten die in het montuur van een bril zijn ingebouwd, zodat ze geheel onzichtbaar blijven.
W. — Dat klopt. Verder kun je wel raden, hoe de eigenschappen van de transistor op prijs worden gesteld in ruimtevaartuigen, waar iedere gram, iedere cm^3 en iedere mW aan voedingsvermogen enorm tellen.
Vr. — Alles bij elkaar genomen, kan de transistor op al die gebieden de vacuümbuis met voordeel vervangen.
W. — Dat is wel iets te veel gezegd. Er zijn voorlopig nog toepassingen, waar de buizen nog niet door transistoren kunnen worden vervangen, zoals bijvoorbeeld zenders van groot vermogen. Maar daartegenover staat, dat er problemen zijn, die uitsluitend met transistoren kunnen worden opgelost. Daaruit volgt, dat vacuümbuizen en halfgeleidertoepassingen vreedzaam naast elkaar kunnen bestaan, waarbij steeds een welbewuste keuze dient te worden gemaakt. We zullen zonder twijfel nog wel eens gelegenheid hebben over de toepassing van de transistor te praten als omvormer, als multivibrator, in meetbruggen, allemaal wagons, waar je nog geen kennis mee hebt gemaakt, maar waarmee verschillende elektronische treinen kunnen worden samengesteld, waar we prettig mee zouden kunnen spelen. In afwachting daarvan zal ik je slechts een klein voorbeeld geven: de gelijkstroomomzetter, welke met transistoren veel eenvoudiger te maken is dan met buizen.

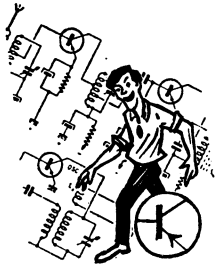


Een geruisloze omzetter



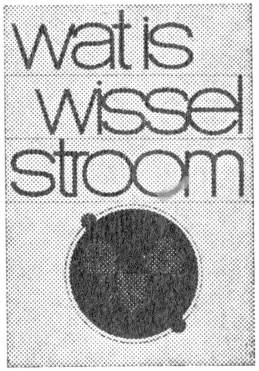
Vr. — Wat noem je een gelijkstroomomzetter?
W. — Dat is een apparaat, waarmee je de spanning van een gelijkstroombron kunt opvoeren. Vroeger had je daarvoor een gelijkstroommotor nodig, die bijvoorbeeld op een 12 V accu liep en die een gelijkstroomgenerator aandreef van laten we zeggen 120 V.
Vr. — Wat een apparatuur en wat zal het rendement van zo'n omzetter slecht zijn!

W. — Verder kan men deze omzetting met behulp van een transistor bewerkstelligen, zonder dat het apparaat lawaai maakt of draait en met veel beter rendement. Daarvoor wordt de door de bron geleverde gelijkstroom met spanning U omgezet in wisselstroom. Deze wordt opgewekt met behulp van de transistor in een L.F.-blokkeeroscillatorschakeling. Mag ik je er aan herinneren, dat men deze naam gegeven heeft aan oscillatoren met zwaar gekoppelde wikkelingen, waarmee een verre van sinusvormige trilling wordt verkregen, hetgeen in dit geval weinig bezwaar oplevert.
Vr. — De rest meen ik al te begrijpen. Een derde wikkeling op dezelfde kern, met een groter aantal windingen, geeft een optransformatie van de wisselspanning. Dan behoeft deze alleen nog maar gelijkgericht te worden met een diode en ontdaan van de rimpelspanning met behulp van weerstand R_3 in samenwerking met de condensatoren C_2 en C_3 om een n-voudige gelijkspanning te verkrijgen.



W. — Vraagal, je toont weer eens een staaltje van merkwaardig vlug begrip, waarmee ik je geluk wens. Ik geloof, dat je van mijn lessen veel hebt geleerd en dat je niet veel moeite zult hebben om verder de weg te vinden in de warwinkel van transistorschema's. Maar toch moet je er aan denken, dat de halfgeleidertechniek nog in volle ontwikkeling verkeert, dat de transistoren binnenkort in nieuwe gebieden zullen weten door te dringen (en reeds zijn doorgedrongen) en dat de vooruitgang van de fabricagemethoden nog menige verrassing zal brengen. Verder moet ik je nog een goede raad geven: probeer de ontwikkeling van de techniek bij te houden. Volg deze op de voet, en lees de desbetreffende artikelen in de technische bladen. Denk altijd aan Francis Bacon, die zei: „Wie zich niet weet te vernieuwen, breekt zich zelf af, want de onbarmhartige voortgang van de tijd verandert alle dingen." Durf je opgedane kennis in de praktijk te brengen en bouw daarom eens wat schakelingen met transistoren. Je kunt dan uit eigen ervaring zeggen . . .
Vr. — . . . Zó . . . werkt de transistor!

Nog meer boeken van Kluwer die uw belangstelling waard zijn!



D. J. WASSENAAR

Wat is wisselstroom (88 blz.)

Wat is gelijkstroom (104 blz.)

Een tweetal boeken voor de jonge knutselaar die hem de noodzakelijke theorie van gelijk- en wisselstroom bijbrengen. Deze boeken zijn geen leerboeken, maar vormen tezamen wel een cursus om vergeten kennis op te frissen.

ING. HEINZ RICHTER

Servicegids radiotechniek

Dit uitzonderlijk praktische boek voor radiomonteurs (en voor ongetelde amateurs en doe-het-zelvers!) bespaart onnoemelijk veel tijd en dus geld. Het bevat alles wat men van radioservice moet weten. Geheel nieuw is de *supersnelle storingzoeker*, die in een minimum van tijd elke fout doet vinden.

132 blz., 83 afb., waarvan vele in 2 kleuren en 1 uitsl. plaat, geb.

ING. HEINZ RICHTER

Servicegids televisietechniek

Dit gloednieuwe, handige en helder geschreven boek is geheel op spoed ingesteld. Vakman en amateur zullen het met vreugde begroeten als *de* nieuwe servicegids, die aan alle eisen voldoet. De *supersnelle storingzoeker* is geheel nieuw in de vakliteratuur; hij bespaart de gebruiker zeeën van tijd.

160 blz., 89 afb., waarvan vele in 2 kleuren en 1 uitsl. plaat, geb.

Æ. E. KLUWER - TECHNISCHE BOEKEN - DEVENTER, ANTWERPEN

Deventer: Postbus 23 - Telefoon (05700) 1 07 22 - Postgiro 86 39 24

Ook verkrijgbaar via de boekhandel

ZO . . . WERKT DE RADIO

15e druk
216 blz.
162 fig.
en talloze kantlijn-tekeningen
ing. f 7,50

door E. Aisberg

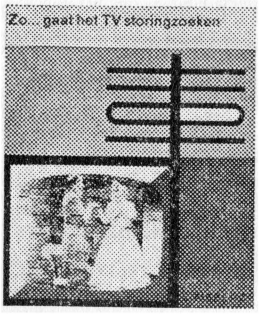
Het hoe en waarom van de radio in woord en beeld.

ZO . . . WERKT DE TELEVISIE

4e druk
223 blz.
146 fig.
ing. f 7,50

door E. Aisberg

Twintig vlotte causerieën die de werking van de moderne televisiezenders en -ontvangers uiteenzetten.



ZO . . . GAAT HET STORINGZOEKEN

2e druk
152 blz.
94 fig.
en vele kantlijntek.
ing. f 7,50

door E. Aisberg A. Six

Aisberg verstaat de kunst om vrij ingewikkelde storingsproblemen op een eenvoudige, haast speelse manier te verklaren.

Æ. E. KLUWER — TECHNISCHE BOEKEN

Deventer — Antwerpen

Deventer: Postbus 23 – Telefoon (0 5700) 10 722 – Postgiro 86 39 24

Ook verkrijgbaar in de boekhandel.

N.V. Uitgeversmaatschappij
Æ. E. KLUWER
Deventer - Antwerpen