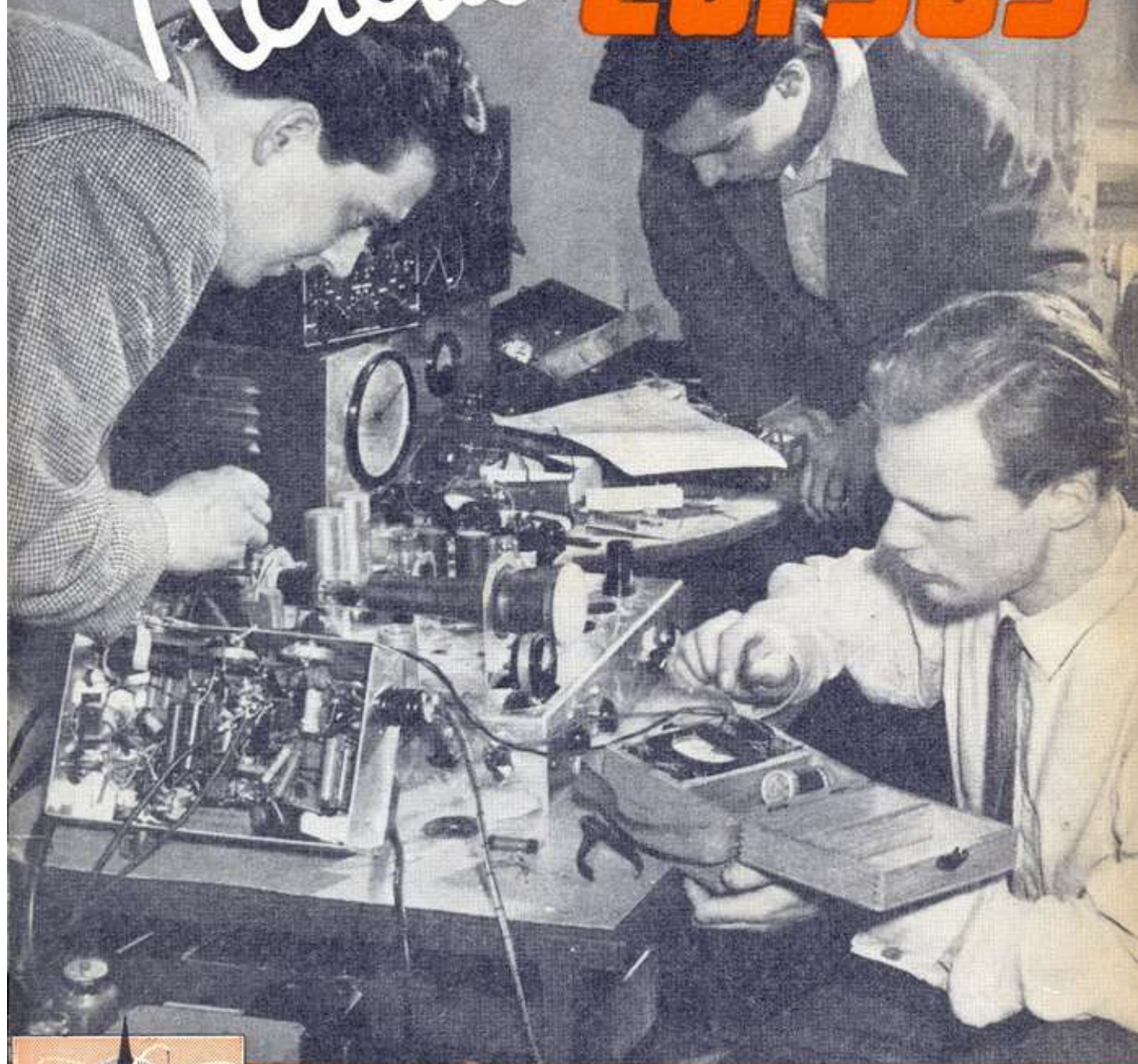


dr. Blan

5

Radio-CURSUS



vormingscentrum voor radio en electronica

INHOUDSOPGAVE

ELEKTRONENBUIZEN EN HALFGELEIDERS

De radiobuis	3
Elektronen-emissie	3
Diode	4
Triode	5
Karakteristiek	7
Automatische negatieve roosterspanning	11
Katodeverhitting	12
Direct verhitte buizen	12
Indirect verhitte buizen	13
Steilheid	14
Versterkingsfactor	14
Inwendige weerstand	15
Statische en dynamisch karakteristiek	16
Spanningsversterking	16
Belastingsweerstand	20
Buisafscherming	21
Meerroosterbuizen	21
Microfonisch effect	25
Constructie van radiobuizen	25
Buistypering	28
Halfgeleiders	30
Elektronentheorie	30
Halfgeleider dioden	34
De Transistor	36

COPYRIGHT DE MUIDERKRING — BUSSUM — NEDERLAND

NADruk, OOK GEDEELTELIJK, IS VERBODEN

ELEKTRONENBUIZEN EN TRANSISTOREN

5e LES

In deze les zullen wij met een merkwaardig werktuig kennis maken: de radiobuis, die ons in staat stelt een grote energie te ontketen met behulp van een weinig inspanning vorderende handeling. In feite is dit te vergelijken met het openen van de sluisdeur van een stuwmeer of het omdraaien van een schakelaar om het licht of de kachel in werking te stellen. We gaan dus uit van een grote energie, die ergens aanwezig en opgeslagen is; zonder deze energie is versterking onmogelijk.

In het eenvoudigste geval van radio-ontvangst ontvangen we, met behulp van een antenne, wisselstroompjes van uiterst gering vermogen die door een zender zijn uitgezonden; via een minuscule kristaldetectortje brengen wij deze geringe energie in onze hoofdtelefoon en zachtjes horen wij iets; een luidspreker zou, aangesloten op dit toestelletje, weinig te horen geven. De energie is blijkbaar wel toereikend om het lichte membraan van de hoofdtelefoon te doen trillen, maar ontoereikend voor zwaarder werk.

Wanneer we nu een radiobuis sturen met dit geringe, uit de antenne verkregen vermogen, dan zal die radiobuis de energie, die opgehoopt is in het lichtnet of desnoods in een batterij, zódanig ontketen en doseren, dat een luidspreker de vereiste z.g. laagfrequente (of audiofrequente) wisselstroom-energie ontvangt. We zeggen, dat er een energieversterking heeft plaats gevonden; meestal zijn hiervoor meerdere, achter elkaar geschakelde radiobuizen noodzakelijk.

Maar er zijn in 1948 ook andere apparaten uitgevonden, n.l. de transistoren, die dezelfde diensten vervullen. In deze les zullen we nu deze buizen en transistoren bespreken gaan.

DE RADIOBUIS

We zagen reeds dat binnen in geleiders de elektronen reeds een zekere vrijheid van beweging genieten, maar deze vrijheid neemt een einde aan de oppervlakte van de metalen. Worden metalen of geleiders in het algemeen echter verhit, dan worden de bewegingen der elektronen sneller en gelukt het enkele buiten de mazen van het net te komen, d.w.z. in de omgeving te belanden. Men noemt dit verschijnsel

ELEKTRONEN-EMISSION.

De bekende Amerikaanse uitvinder Edison experimenteerde met alles wat hem onder handen kwam; zo kwam hij er toe, in een luchtledige gloeilamp buiten de reeds aanwezige gloeidraad een metalen plaatje in te smelten (fig. 1).

Hij liet de lamp gewoon branden op een accu, terwijl hij het plaatje via een zeer gevoelige meter met één der beide gloeidraadeinden verbond. En wat gebeurde er? Er liep een stroom en wel van de gloeidraad via het luchtledige naar het plaatje, door de meter weer terug naar de gloeidraad. Doofde de gloeidraad, dan hield de stroom op! De verklaring van dit verschijnsel werd eerst vele jaren later door andere onderzoekers gevonden. De namen van Fleming en Lee de Forest zijn bekend in de radiowereld.

In fig. 2 zien we die gloeiende gloeidraad. Uit dit gloeiende



fig. 1

Het z.g. Volta-effect

materiaal zal zich een aantal elektronen vrijmaken; deze elektronen zullen als een „elektronenwolk” om die gloeidraad heen blijven hangen. Al deze elektronen zijn negatief geladen t.o.v. die gloeidraad, of, zo men wil: de gloeidraad is positief geladen t.o.v. die samengewolkte elektronen. Het is op zichzelf dus volstrekt niet vreemd, als de elektronen zich weer naar de gloeidraad toe bewegen tengevolge van de onderlinge aantrekkingskracht (ongelijknamige polen); de gloeidraad blijft echter weer elektronen uitzenden, zodat er toch steeds een elektronenwolk blijft bestaan. Welnu, de grootte van die wolk zal afhangen van de temperatuur van de gloeidraad en, zoals we verderop zullen zien, van het materiaal, waarvan de gloeidraad gemaakt is. We zagen reeds, dat Edison een metaalplaatje insmolt in de glasballon; het plaatje verbond hij (via een stroommeter) met één kant van de gloeidraad. Het is nu wel verklaarbaar, dat er enige elektronen de weg vonden via dat plaatje naar gloeidraad: dit plaatje is immers óók positief t.o.v. de elektronenwolk. Dat het aantal elektronen gering blijft, is aldus te verklaren: de afstand van elektronenwolk tot plaatje is véél groter dan rechtstreeks van wolk tot gloeidraad en ... elektronen zoeken nu eenmaal de kortste weg! We noemen dit verschijnsel het Volta-effect. Nu hebben we twee manieren om dit verschijnsel sterker te doen optreden:

- door toepassing van geleiders die na verhitting gemakkelijk elektronen afstaan; b.v. bariumoxyde, wolfram, thoriumoxyde enz.
- door de elektronen naar buiten te „lokken”, door een zekere aantrekkingskracht op ze uit te oefenen.

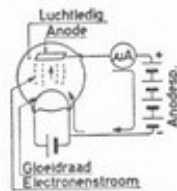


fig. 2

Het z.g. Edison-effect

We kunnen dit b.v. doen door aan het plaatje in de glasballon een spanning te leggen, die positief is t.o.v. de gloeidraad (fig. 2). We tekenen de zaak nu in schematische vorm en zullen nu verder de „vaktermen” maar gaan gebruiken: de naam lamp, verklaarbaar door het lichtschijnsel, is thans „elektronenbuis”; de gloeidraad of filament is de „katode”, terwijl het ingesmolten plaatje de „anode” wordt genoemd. Het luchtledig noemen we het vacuum.

Voor goed begrip moeten we hier uitdrukkelijk vaststellen, dat verhitting van de katode noodzakelijk is om emissie mogelijk te maken, evenals het vacuum. Hoe echter de katodeverhitting tot stand komt doet er in principe niets toe; het zou desnoods met een gasvlammetje kunnen als er maar geen praktische bezwaren in de weg kwamen. In beginsel doet het er ook niet toe of we de — van de anodespanning nu met de + of de — van de gloeispanning verbinden. De aldus verkregen buis met twee elektroden, nl. de katode en de anode, noemen we een diode (di = twee). We zullen later zien dat er meer elektroden in een buis gebruikt kunnen worden en komen dan tot triode, tetrode, pentode, hexode, octode en zelfs enneode (met resp. 3, 4, 5, 6, 8 en 9 elektroden).

DIODE

De aldus verkregen diode heeft uitnemende eigenschappen als gelijkrichtventiel, we zagen dat reeds in les 4; keren we nl. de anodespanning om en komt dus de — aan de anode, dan blijkt er volstrekt geen stroom te lopen (fig. 3). Schakelen we dus een dergelijke diode als ventiel in een wisselstroomkring dan wordt slechts stroom naar één zijde doorgelaten



fig. 3

en krijgen we na afvlakking uiteindelijk gelijkspanning. In het hoofdstuk over voedingsapparaten werd hierop reeds verder ingegaan.

Het blijkt nu, dat hoe hoger we de anodespanning maken, des te groter zal de stroom zijn die er loopt, maar er is een grens, waarbij de elektronenemissie niet groter kan worden, ook al gaan we voort met het verhogen van de anodespanning. We zeggen dan, dat de katode verzadigd is.

Natuurlijk is er gezocht naar een methode, om deze anodestroom te beïnvloeden. Dit gelukte door het aanbrengen van een elektrode tussen de katode en anode. We kwamen toen tot de

TRIODE

Deze elektrode, in principe een roostertje van metaaldraad of -gaas, kreeg de gedaante van een dunne draadspiraal, gewonden op steunen rondom de gloeidraad, terwijl de anode er als een cilindrische koker buiten omheen geplaatst werd (fig. 4). We noemen deze spiraal het rooster en duiden dit aan met een kleine letter *r*. (De katode duiden we aan met de letter *k* en de anode met *a*).

Denk er om, dat deze spiraal géén spoel is; slechts om constructieve redenen is deze vorm gekozen.

Hoe men een dergelijke buis nu samenstelt, zullen we verderop in deze les bespreken.

Vooraleer we nu verder gaan moeten we ons eerst even realiseren wat nu de uitwerking is van zo'n rooster op de elektronenwolk. Vóórlop moeten we stellen, dat wanneer het rooster wél aanwezig is doch nergens mee verbonden is, er feitelijk niets gebeurt: we hebben en houden een diode (fig. 6). En wanneer we ook de anode aan de katode verbinden, dan loopt er een geringe stroom, omdat we weer de toestand van fig. 2 bereikt hebben. We zien in fig. 5 hoe de ruimtelading verdeeld wordt.

Gaan we het rooster echter verbinden met een spanningsbron, hetzij negatief, hetzij positief t.o.v. de katode, dan zal het de elektronenstroom van de katode naar de anode kunnen beïnvloeden. Maken we het positief, dan zal er een aantrekkingskracht op de afzonderlijke elektronen worden uitgeoefend; deze krijgen een grotere snelheid dan zij reeds hadden. Nu bestaan er twee mogelijkheden: een deel van die elektronen beschouwt de rooster-draadjes als anode en voor hen is het spel dan uit, d.w.z. ze bereiken via het rooster en de rooster-spanningsbron weer de katode, het punt van uitgang. Wij noemen deze stroom de roosterstroom. Een veel grotere mogelijkheid is, dat de overige elektronen eenmaal tussen de roosterdraadjes aangeland, de nóg veel grotere aantrekkingskracht van de anode ondervinden. Voor deze wordt die anode dan het doel van de reis. Bij een bepaalde positieve rooster-spanning zal de toestand van maximale elektronenstroom van de katode naar de anode bereikt worden; verdere verhoging van de positieve spanning op het rooster heeft dan geen uitwerking meer. Men zegt dan: de katode is verzadigd.

Zijn de roosterdraadjes negatief geladen t.o. van de katode dan zullen slechts de elektronen die rechtstandig omhoogschieten uit de katode, de kans hebben om de anode te bereiken; het merendeel van de elektronen, dat minder grote snelheid bezit of niet rechtstandig uit de katode trad,

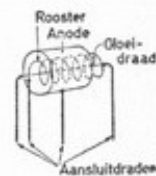


fig. 4

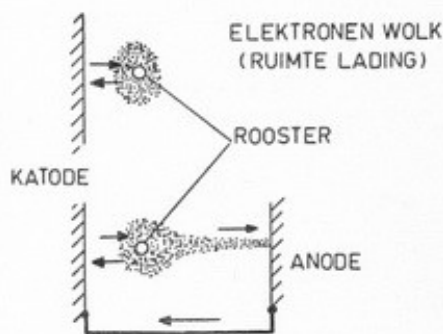


fig. 5

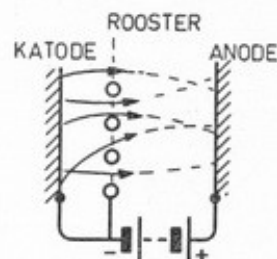


fig. 6

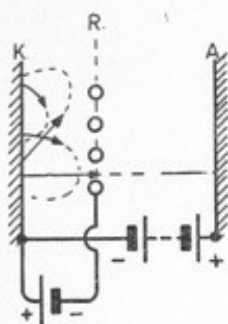


fig. 7

Het rooster is negatief gemaakt: slechts enkele elektronen bereiken de anode; de overige (neg.) elektronen worden door het neg. geladen rooster weer naar de katode teruggestoten.

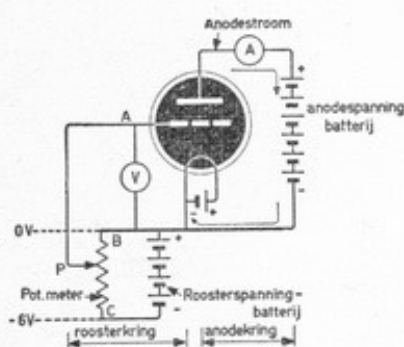


fig. 8

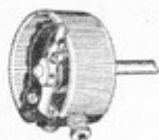


fig. 9

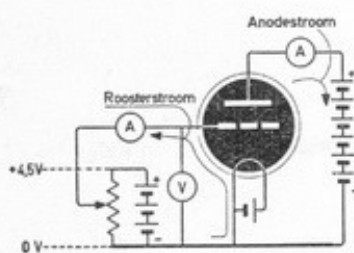


fig. 10

zal weer terugkeren naar de katode; hoe meer het rooster negatief geladen is, des te minder elektronen zullen tengevolge van deze „terugduwende kracht” de anode bereiken (fig. 7).

In de praktijk zullen we ons vrijwel uitsluitend met een negatief rooster bezighouden, zodat elke vorm van roosterstroom vermeden wordt. Hiertoe zal het rooster minstens op -1 volt gebracht moeten worden; dit leert ons de praktijk. Deze waarde geldt voor vrijwel alle buistypen, hoezeer deze overigens ook mogen verschillen in hun eigenschappen. Nu gaan we deze schakelingen eens beproeven.

We hebben dus nu een rooster in de buis en zien dit voorgesteld in fig. 8. We zien nu niet alleen een anodespanningsbatterij, doch tevens een roosterspanningsbatterij, terwijl daarover is geschakeld een z.g. potentiometer P (men spreekt ook wel van potentiaalverschil in plaats van spanningsverschil, vandaar de naam potentiometer voor een ding dat eigenlijk een weerstand is met een glijcontact (fig. 9). Als we nu de arm van die potentiometer bewegen door aan de knop te draaien, kunnen we het rooster op elke gewenste spanning tussen 0 en -6 volt brengen; op de voltmeter V lezen we die spanning af. Over potentiometerschakelingen hebben we reeds geschreven in les 1 pag. 15.

Als we nu punt A regelrecht met punt B verbinden, loopt er door de buis een bepaalde anodestroom, af te lezen op ampèremeter A. Wanneer we nu de potentiometer naar C bewegen, dus de spanning op het rooster meer negatief te maken, dan neemt de anodestroom af, om ten slotte nul te worden.

Daarna gaan we het rooster nog even positief maken ten opzichte van de gloeidraad (fig. 10). Het lopen van roosterstroom gaat gepaard met vervorming van de te versterken wisselspanningen; we komen hierop terug en houden het er voorlopig maar op, dat de roosterspanning steeds negatief moet zijn.

Wanneer we nu eens beginnen met de roosterspanning op -10 V te brengen en de daarbij behorende anodestroom meten, daarna de roosterspanning op -9 V brengen en wéér de anodestroom meten en zo maar voort, dan krijgen we op die manier een heel lijstje met gegevens; we noemen zo'n lijstje een meettabel.

Roosterspanning V_g in volt	Anodestroom I_a in mA
-10	0
-9	0
-8	0
-7	0
-6	0,1
$-5\frac{1}{2}$	0,15
-5	0,35
-4	1,15
-3	2,7
-2	4,2
-1	5,6
0	7,1
+1	8,6
+2	10

Wij geven hier een dergelijke tabel van een buis; we moeten er wel aan denken, dat we voor elk type buis geheel andere waarden meten. Zelfs buizen van hetzelfde type zullen vaak nog onderlinge verschillen geven.

Ook kunnen we een grafische voorstelling van deze gegevens maken; de lijnen waarlangs we die aantekenen noemen we de assen. Meestal nemen we ruitjespapier voor dit werk, dat tekent gemakkelijk (fig. 11). Op de horizontale lijn zetten we dan op regelmatige afstanden van b.v. 1 cm -1 , -2 , -3 , enz. Op het kruispunt der beide lijnen, dat we de oorsprong noemen, komt 0; naar rechts gaat het verder $+1$, $+2$, enz. Op de verticale lijn zetten we naar boven uit $+1$, $+2$, $+3$, enz.; naar beneden hoeft niets uitgezet te worden, want een negatieve stroom is niet te verwachten.

De waarden uit de tabel vullen we nu in op de grafiek: bij een roosterspanning van -7 volt hebben we een anodestroom gemeten van 0 mA, dus daar zetten we een stipje. Bij -6 vonden we 0,1; ook daar komt 'n stipje, 0,1 cm (1 mm) van de horizontale lijn af. Zo doen we met alle waarden uit de tabel; we krijgen dan een hele serie stipjes.

Hierdoor trekken we een vloeiende lijn (fig. 12) en zo hebben we dan de grafiek verkregen; we noemen deze lijn de

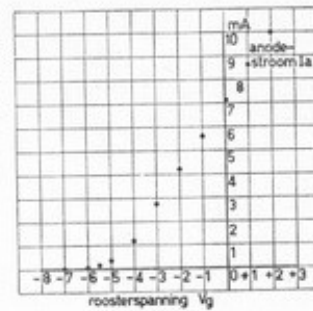


fig. 11

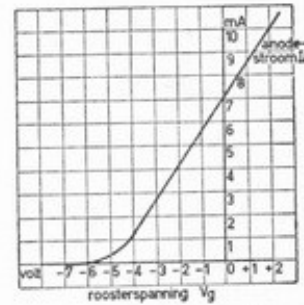


fig. 12

KARAKTERISTIEK

van de buis en wel de $V_g - I_a$ karakteristiek, omdat hier de waarden van V_g (spanning op het rooster) uitgezet zijn tegen de waarden van I_a , de anodestroom.

We zien dat slechts een deel van deze lijn recht is en we weten ook, dat we het gedeelte van de lijn, waarin een positieve roosterspanning voorkomt, niet gebruikt mag worden. Dit betekent dus, dat we bij deze buis de roosterspanning kunnen variëren van -4 volt tot 0 volt om een evenredige variatie van de anodestroom te mogen verwachten.

We hebben nu gezien, dat de anodestroom van een buis wijziging ondergaat, wanneer we de spanning op het rooster variëren.

Niet alle buistypen hebben dezelfde eigenschappen; voor elke buissoort zal de karakteristiek er dus anders uitzien!

Wat hebben we nu aan de mogelijkheden die de triode ons biedt? We moeten hiervoor de eigenschappen eens opsommen: de stroom I_a door de buis neemt toe of af door het aanleggen van een stuurspanning V_g (fig. 13). Het kan dus niet anders of de weerstand in die buis neemt toe of af.

Een buis is dus eigenlijk een veranderende weerstand en we zouden die buis ook zó kunnen voorstellen (fig. 14) (dat pijltje, dwars door de weerstand getekend is in het algemeen het overeengekomen teken voor veranderbaarheid). Nu hebben we aan een veranderlijke weerstand op zichzelf niet zoveel, maar dat wordt anders als we er een vaste weerstand mee in serie plaatsen (fig. 15). We hebben nu een potentiometerschakeling, en we weten dat de spanning tussen de punten C en D afhangt van de waarde van R_u of R_i . We tekenen nu dit geval nog eens, maar nu staat de buis in serie met een weerstand (fig. 15). De weerstand die de buis op zich-

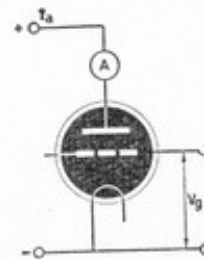


fig. 13



fig. 14

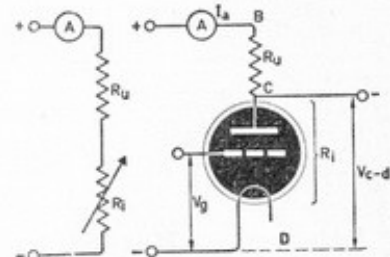


fig. 15

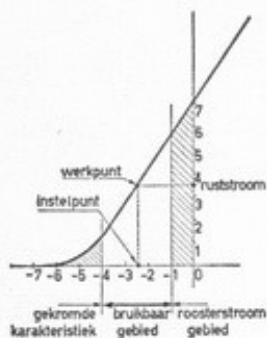


fig. 16

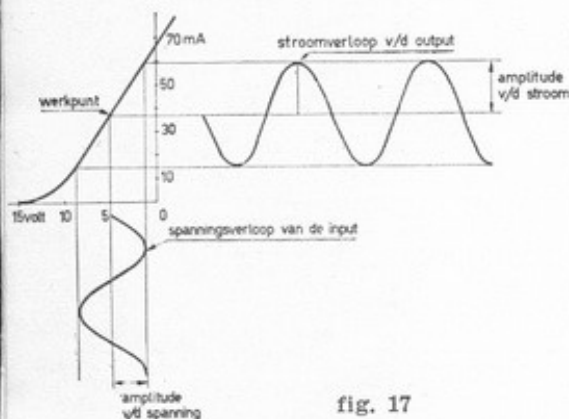


fig. 17

De kromme van een ander buistype, maar nu aangevuld met de grafische voorstelling van de wisselspanning op het rooster, alsmede de grafiek van de wisselstroom door de anode van de buis

Het werkpunt is ingesteld in het midden van de roosterruimte; de inkomende wisselspanning zou niet groter mogen zijn, daar we anders buiten het gebied van de rooster-ruimte zouden komen

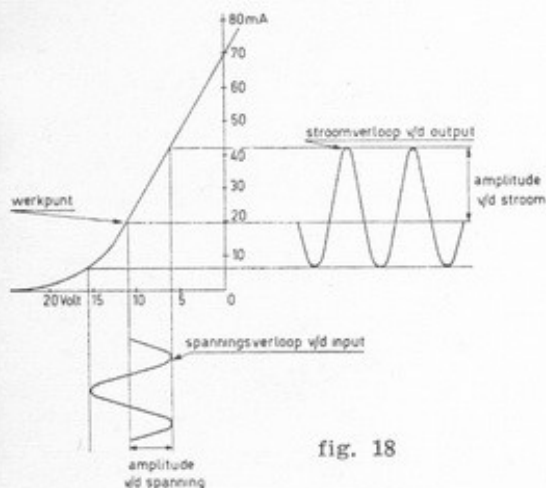


fig. 18

zelf vormt noemen we de INWENDIGE BUISWEERSTAND R_i , terwijl de andere weerstand de UITWENDIGE WEERSTAND of BELASTINGWEERSTAND genoemd wordt, aangeduid met R_u .

Nu gaan we spijkers met koppen slaan: we zetten deze schakeling eens in werkelijkheid op: de anodespanning E tussen de punten B en D, = 200 V. $R_u = 20.000 \Omega$. Eerst stellen we de roosterspanning, die we als regel V_g noemen, in op -1 V: de anodestroom is circa 5,6 mA of 0,0056 A. Hoe groot is de spanning nu tussen de anode van de buis en de aarde? De spanningsval over $R_u = V_{B-C} = I \times R_u = 0.0056 \times 20.000 = 112$ V. De voedingsspanning E was 200 V, dus $V_{C-D} = 200 - 112 = 88$ V.

Nu maken we de roosterspanning -4 V. De plaatstroom neemt af tot 1.15 mA = 0.00115 A. Spanningsval over $R_u = V_{B-C} = I \times R_u = 0.00115 \times 20.000 = 23$ volt. En de spanning tussen anode en aarde, V_{C-D} is nu $200 - 23 = 177$ volt.

Wat zien we dus: door de roosterspanning V_g te variëren van -1 tot -4 volt varieert de spanning tussen de anode van de buis en de katode (dus - voedingsspanning), van 88 volt tot 177 volt. Een gelijkspanningsverandering van 3 volt heeft dus een gelijkspanningsverandering van 89 volt tengevolge. We zouden deze inrichting een spanningsverhoger kunnen noemen; volgens het spraakgebruik noemen we het een spanningsversterker.

Hebben we nu zo'n behoefte aan een apparaat dat een dergelijke gelijkspanningsverandering produceert? Nu, in principe vindt een dergelijke toepassing maar zelden plaats; in de radiotechniek hebben wij daarentegen vrijwel uitsluitend te maken met wisselspanningen; de frequentie hiervan kan laag zijn, b.v. lager dan van ons net, 30 Hz of hoog, tot 100.000.000 Hz, honderd miljoen trillingen per seconde (100 MHz). We komen later op de aard van de wisselspanningen terug, maar kunnen er nu reeds van zeggen, dat de wisselspanningen, vooral als ze door onze antenne uit de lucht „gegrepen” worden, maar zeer laag zijn; soms maar enige microvolts (μV = miljoenste deel van 1 volt).

En nu is de radiobuis zo bij uitstek geschikt om deze uiterst lage spanningen „om te zetten”, dus te „versterken” in hogere, waarbij we ons nog even moeten herinneren, wat bij de aanvang van deze les over versterken gezegd is. Het is nu de verdienste van de radiobuis, dat we deze energiebron zonder daarvoor veel energie te gebruiken kunnen in- en uitschakelen zodat we héél zwakke wisselspanningen kunnen versterken zonder dat de bron van deze zwakke wisselspanningen onze antenne of pickup, wordt belast. Want door elke belasting, hoe zwak dan ook, zal de spanning over de bron dalen.

Eén ding staat echter vast: de versterkte wisselspanning, de zogenaamde output, zal precies dezelfde „kromme-vorm” of gedaante moeten hebben als de ónversterkte; was dit een zuivere sinus-vorm, wel, dan moet dat een sinus-vorm blijven, maar, dank zij de versterking, van véél groter amplitude.

Bij de versterking van z.g. laagfrequente trillingen, die we in les 6 leren kennen, zullen vaak andere kromme-vormen voorkomen, doch hóe grillig ze ook zijn, ze mogen door de versterking niet worden vervormd. Met andere woorden: de versterking dient zuiver evenredig te zijn. De buiskarakteristiek zal dan een rechte lijn moeten vertonen en we spreken dan

van lineaire versterking. Helaas vertoont zelfs de karakteristiek van de ideale buis nog wel een krom gedeelte; we moeten ons dus steeds tot het rechte stuk beperken.

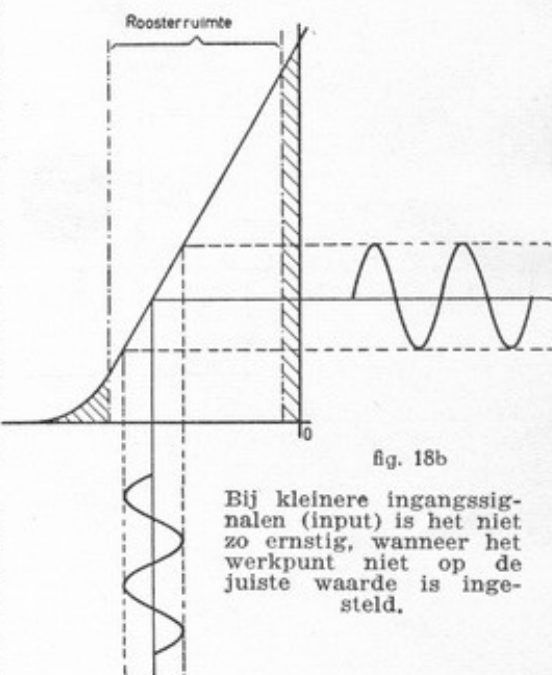
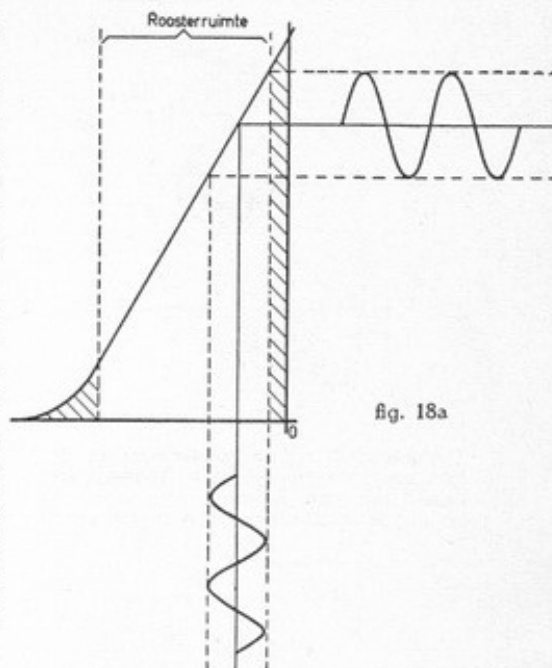
We zagen hiervóór, dat de roosterstroom reeds bij -1 volt begint te lopen; dat is dus weer een andere beperking. Wanneer we nu de vraag stellen: hoe mogen we nu de buis, waarvan we in fig. 16 de karakteristiek geven, gebruiken, dan is het antwoord: door te zorgen dat a) de spanning op 't rooster nóóit hoger wordt dan -1 volt en b) die spanning nóóit lager wordt dan -4 volt.

We zeggen dan: voor deze buis bedraagt de rooster-ruimte 3 volt (van -1 tot -4). (Denk er om, dit geldt slechts voor dit buistype; voor andere typen vinden we andere waarden). In fig. 16 hebben we het „verboden gebied” gearceerd aangegeven.

Nu heeft een wisselspanning steeds een negatief en een positief spanningsverloop; om het nu eens populair voor te stellen, duwen we „van onderen” de te versterken ingangsspanning in de karakteristiek van de buis; „rechts opzij” komt dan de uitgangsspanning er uit (fig. 17); we mogen dus onder geen voorwaarde buiten het ingangstraatje, de roosterruimte, komen.

Voor wisselspanningen van geringe grootte, of van geringe amplitude, zoals we dat noemen, hindert het helemaal niet of ze links of rechts in 't straatje lopen; wordt de ingangswisselspanning echter hóger, ja, dan zal de wisselspanning precies midden in 't straatje moeten lopen, anders loopt hij tegen één der beide denkbeeldige muren aan! (fig. 18a en b) En wanneer een te versterken wisselspanning, gemeten van minimum tot maximum van zijn kromme, van top tot top zeggen we dan, door het verkeerd instellen van het werkpunt buiten het gebied van de roosterruimte komt, ja, dan gebeuren er ongelukken; in fig. 18 zien we dat de buis tot in het gekromde gedeelte van zijn karakteristiek „gestuurd” wordt, zoals we zeggen, en rechts zien we dan, dat de negatieve toppen van de versterkte wisselspanning lager zijn dan de positieve. Dat is nu vervorming. En niet alleen in beeld, maar tevens in geluid, een toestand die we dus vermijden moeten.

Nu spreken we maar dapper over wisselspanningen, die we op roosters brengen. Met de schakeling die we tot nu toegepast hebben (fig. 8), zullen we het echter niet ver brengen. Wanneer we hier een wisselspanningsbron aansluiten tussen de z.g. aarde (0 volt) en het rooster, dan zal die bron een zware pijp roken; want in feite staat de wisselstroombron parallel geschakeld met de batterij voor de neg. roosterspanning, en die cel heeft een lage inwendige weerstand. Op het rooster komt weinig of liever gezegd niets terecht (fig. 19). Wat we dus moeten doen is dit: a) zorgen dat het rooster van de buis op de juiste neg. spanning gebracht wordt en b) het mogelijk maken dat een wisselspanning er aan wordt toegevoerd doch de neg. roosterspanning niet verstoord wordt. Welnu, door een weerstand R_g aan te brengen tussen het min-punt van de batterij en het rooster kunnen we het rooster op een negatieve waarde instellen (fig. 20). Hoe groot moet die weerstand nu zijn? Ja, als 't alleen was om het rooster negatief te maken zou hij desnoods nog lager dan 1Ω mogen zijn; willen we echter de bron, die de te versterken wisselspanning levert, niet te zeer belasten, dan dient die weerstand minstens 500.000Ω te zijn. Treedt er dan geen



Bij kleinere ingangssignalen (input) is het niet zo ernstig, wanneer het werkpunt niet op de juiste waarde is ingesteld.

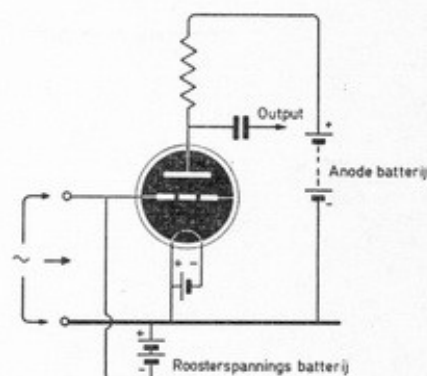


fig. 19

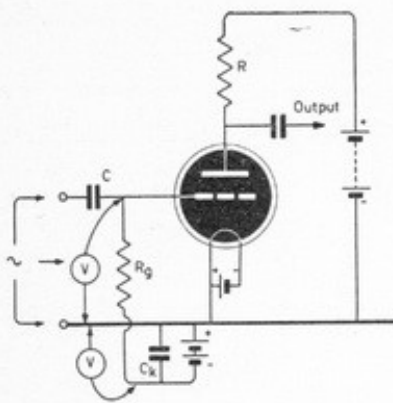


fig. 20

De spanning tussen rooster en aarde bedraagt evenveel als tussen de min-klem van de neg. resp. batterij en aarde, want door R_g loopt géén stroom

spanningsval op? zal er stellig gevraagd worden. Neen, wees gerust: het rooster wordt immers in het geheel niet door een stroom doorlopen; dit is slechts het geval, wanneer het positief gemaakt wordt. En dat zouden we niet doen, dus geen gevaar voor spanningsval. In de rusttoestand is de spanning op het ondereind van die R_g even hoog als 't boveinde, dus het rooster. Mag die R_g hoger zijn dan $1\text{ M}\Omega$? Nu, in de meeste gevallen wél, doch bij z.g. steile buizen, mag dat niet in verband met het gevaar van z.g. omgekeerde roosterstroom; we komen hierop terug. Nu moeten we nog de te versterken wisselstroom aanvoeren. Nu, dat doen we via de z.g. roostercondensator, de C_g . We leerden n.l. reeds, dat een condensator een geleider is voor wisselstromen of liever een weerstand. Maar in ieder geval geen blokkering. We kunnen dus nu een wisselspanning op 't rooster brengen door het tussen aarde en de condensator aan te sluiten. Waardoor wordt nu de belasting voor die wisselspanningsbron gevormd? Wel, de serieschakeling van C_g en R_g , dus het dik getekende gedeelte van fig. 23; in feite vormen ze een spanningsdeler; het rooster, dat op het knooppunt is aangesloten, vormt dus geen enkele belasting. De z.g. ingangsimpedantie van deze buis is in dit geval gelijk aan R_g ; zoals we later zien zullen geldt dit niet voor de hoge (radio) frequenties. De condensator C_k kunnen we hier buiten beschouwing laten i.v.m. de zeer lage wisselstroomweerstand (fig. 21). Het te versterken z.g.

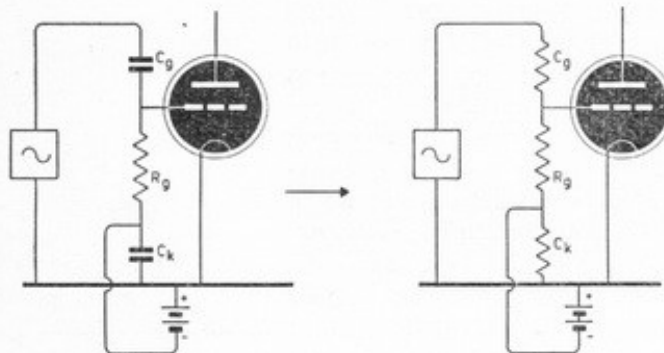


fig. 21

input-sigitaal ontwikkelt dus een wisselspanning over R_g en deze wisselspanning zal dus beurtelings bij de negatieve rooster spanning opgeteld worden of ervan worden afgetrokken. Is b.v. de amplitude van het input-sigitaal 1 volt en is de neg. rooster spanning 2 volt, dan zal het rooster afwisselend -3 volt en -1 volt worden (fig. 22). Na hetgeen we hierboven ge-

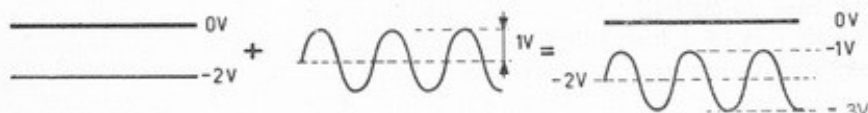


fig. 22

leerd hebben over de rooster-ruimte zal het wel duidelijk zijn, dat we als rust-toestand altijd een negatieve rooster spanning kiezen, die midden ligt tussen: de plaats waar de roosterstroom begint te lopen (het roosterstroomgebied) en dat voor alle buizen -1 volt is en: de plaats waar de kromming begint. Is dit voor een bepaalde buis -13 volt, dan ligt het midden van dat gebied tussen -1 en -13 , dus bij -7 volt. We noemen dit het werkpunt van de buis. In dit geval kan een input-sigitaal met een amplitude van maximaal 6 volt zonder kleerscheuren versterkt worden. Wat we nu bezien

hebben noemen we de roosterkring van de buis; deze bestaat dus, gerekend van aarde af, uit: gloeidraad (katode)-rooster-roosterweerstand-batterij-aarde (fig. 23).

We zien nu tevens de anodekring: aarde gloeidraad, anode-anodebelastingsweerstand anode-voedingsapparaat (fig. 24).

Ik wil er hier nog op wijzen, dat wij niet zelf de karakteristiek van een buis behoeven op te nemen. De fabrikant doet dat voor ons en geeft in zijn buizengidsen o.a. de voorgeschreven negatieve roosterspanning voor elke buis.

We hebben het input-sigitaal in de buis gebracht; aan de anode ontstaan de versterkte spanningen, kortweg de output genoemd. In feite zal er in de rusttoestand, dus zónder input-sigitaal, op de anode een gelijkspanning meetbaar zijn. Wanneer dit nu b.v. 150 volt is en wanneer door de versterkende werking van de buis de wisselspanning aan de anode 40 volt zou worden, dan komt het er op neer, dat de spanning op de anode varieert van 150-40 volt tot 150+40 volt, dus van 110 tot 190 volt. Om nu de z.g. gelijkstroomcomponent er uit te houden, brengen we een condensator aan; de condensator vormt een blokkering voor gelijkspanning, zodat we rechts van die condensator uitsluitend de output-wisselspanning, waarom het ons te doen is, overhouden (zie fig. 20).

AUTOMATISCHE NEGATIEVE ROOSTERSPANNING

De vraag is natuurlijk: We halen de anodespanning uit een voedingsapparaat; moeten we voor die (neg.) roosterspanning afhankelijk blijven van de droge batterijtjes, die toch lang niet het eeuwige leven hebben? Nu, hier heeft men ook wat op gevonden. Wanneer we nl. de toevoerdraad van min anodespanning naar de gloeidraad (of katode) een weerstand R_k aanbrengen, wordt ook deze door de anodestroom doorlopen (fig. 26). Hoe groter de weerstand, des te groter de spanningsval, weten we door de wet van Ohm. In ons voorbeeld is de ruststroom bekend, nl. $I = 3.3 \text{ mA} = 0.0033 \text{ A}$. De spanningsval moet gelijk zijn aan de gewenste negatieve roosterspanning = $2\frac{1}{2} \text{ V}$. R_k vinden we nu gemakkelijk:

$$R_k = \frac{E}{I} = \frac{2,5}{0.0033} = 757,5 \, \Omega.$$

Het nare is nu, dat deze ruststroom, dus de stroom in rusttoestand, die niet alleen de buis, doch ook de weerstand R_k doorloopt, telkenmale groter wordt of kleiner wordt in het ritme van de wisselspanning, wanneer deze buis aan 't versterken gaat; we zeggen dan dat er buiten die ruststroom nog een wisselstroom door buis en weerstand loopt, d.w.z. de ruststroom wordt regelmatig groter en kleiner en die verandering geschiedt in een l.f. tempo. Dit is een hoog- of laagfrequente wisselstroom, al naar de functie van de buis is. We verkrijgen hier onze negatieve roosterspanning door voor een positieve katodespanning te zorgen, want $V_g = I_k \times R_k$. Wanneer nu die I , de stroom door de katode een wisselstroom blijkt te zijn, zal de negatieve roosterspanning V_g een wisselspanning zijn. Dit mag niet: de negatieve roosterspanning moet constant zijn. Maar bij de voedingsapparaten hebben we het nodige over afvlakken, of zoals we het hier noemen, ontkoppelen geleerd. Wat we dus moeten doen is de rimpel verwijderen en dat doen we bij laagfrequente wisselspanningen meestal

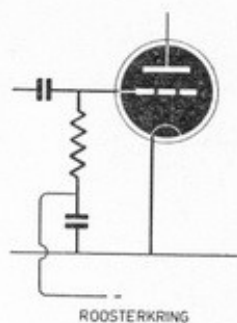


fig. 23

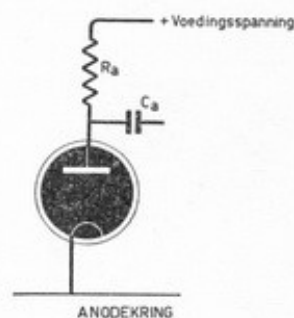


fig. 24

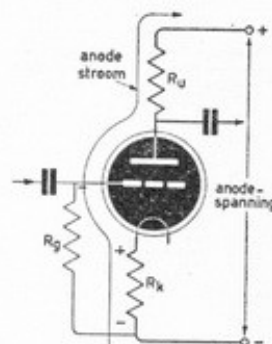


fig. 26

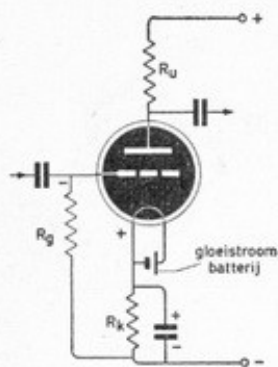


fig. 27

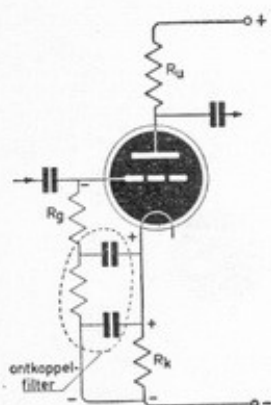


fig. 28

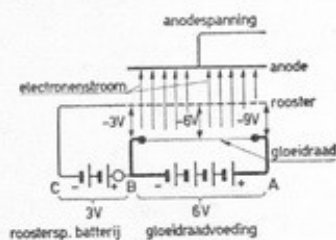


fig. 29

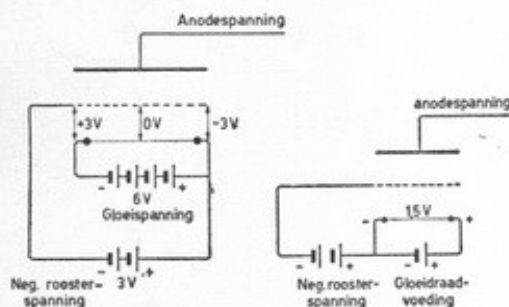


fig. 30

fig. 31

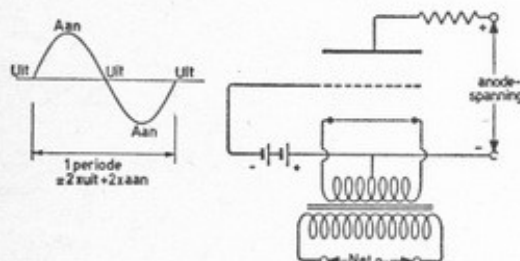


fig. 32

met een grote condensator, b.v. $50 \mu\text{F}$. Daar de te verwachten spanning op dit punt gering is, behoeft de werkspanning van een dergelijke condensator slechts laag, b.v. 12 volt te zijn. We kiezen hiervoor dan een z.g. elektrolytische condensator, die door een chemische werking zeer klein van afmeting kan zijn (fig. 27).

Bij de versterking van hoogfrequente wisselspanningen is een condensator van $0,1 \mu\text{F}$ ruim voldoende.

Voor het overzicht hebben we de voeding van de gloeidraad er nog eens bijgetekend; voor 't begrip van de buiswerking konden we deze in de vorige prentjes wel weglaten.

In les 4 leerden we de voordelen van de meertrapsafvlakking kennen; soms past men bij de versterking van laagfrequente trillingen ook wel een dergelijke meertrapsontkoppeling toe, omdat men dan met véél kleiner condensatorwaarden toe kan (fig. 28). Vooral als men, b.v. in instrumenten, per sé geen elektrolytische condensatoren wil gebruiken, is deze schakeling de enig mogelijke.

KATODEVERHITTING

We zagen, dat één der voorwaarden voor emissie, het uit-treden van elektronen uit de katode, de verhitting hiervan is.

DIRECT VERHITTE BUIZEN

Als katode gebruikte men dus een gloeiende draad, vandaar de naam (in België zegt men: rechtstreeks verhitte buizen). Bij onze vorige beschouwingen zijn we er van uitgegaan, dat de spanning over de gehele lengte van de gloeidraad één en dezelfde is, maar het is gemakkelijk in te zien, dat dit lang niet het geval is (fig. 29); wanneer we b.v. een buis met een gloeispanning van 6 V toepassen. Het rooster is -3 V , ja ten opzichte van wat?

Alleen maar t.o.v. punt B; ten opzichte van punt A is het rooster zelfs -9 volt en halfweg de gloeidraad meten we -6 V ! Dat is dus een nare zaak, want over de gehele lengte van de gloeidraad treden elektronen uit. Even vreemd wordt de situatie, als we de roosterspanningsbatterij met de pluskant van de gloeidraadvoeding verbinden (fig. 30). We proberen nu deze onaangename gevolgen te ontgaan door een lage gloeispanning toe te passen; de moderne direct verhitte buizen werken nu op 1,4 volt en de negatieve roosterspanning berekenen we van de min-kant vanaf de gloeidraad (fig. 31). Deze buizen zijn bestemd voor draagbare ontvangers.

Omdat er voor de verwarming nu eenmaal een bepaald vermogen nodig is, moet de gloei-STROOM vrij hoog worden op deze manier, waarbij de spanning laag is, want $W = I \times E$. Natuurlijk probeerde men ook deze gloeidraad op wisselspanning rood te stoken, maar na het bovenstaande zal ieder wel begrijpen, dat de gloeidraad dan per periode $2 \times$ aan- en uitgaat, wat er op neerkomt, dat de roosterspanning $100 \times$ per seconde verandert, wanneer we de normale netspanning van 50 Hz gebruiken (fig. 32). Natuurlijk ontardt dit in een flinke brom, die door elke opvolgende trap mee versterkt wordt.

Slechts voor eindbuizen wordt thans soms nog wisselstroom toegepast, waarbij dan een flinke dosis warmte (veel watts) gebruikende gloeidraad wordt toegepast, die méér warmte ontvangt in de vorm van elektrische energie, dan hij door

uitstraling aan de omgeving kan afstaan, net als een pook die we 50 $\times$ per sec. in de kachel zouden steken. Ook deze ontvangt in de kachel meer warmte dan hij daarbuiten kan kwijtraken. Om de spanningsverschillen en daarmee de brom te beperken past men dan een middenaftakking op de gloei-stroomtransformator toe, waarop zowel — anodespanning als + neg. roosterspanning wordt aangesloten (fig. 33).

INDIRECT VERHITTE BUIZEN

Zoals in de aanvang gezegd is, doet het er niet toe, hoe we de katode verhitten. Het meest voor de hand ligt met elektriciteit, door middel van een gloeidraad, maar er is natuurlijk niets tegen om katode en verwarming te scheiden. Dit doet men in de moderne buizen. De gloeidraad heeft dan géén ander doel dan het verwarmen van het buisje. Het buisje is dan de feitelijke katode en is ter verhoging van 't effect bedekt met stoffen die bij verhitting gemakkelijk elektronen afstaan, b.v. bariumboxyde. Tussen gloeidraad en buisje bevindt zich een keramische isolatie (= scheidingsstof), die echter de warmte-overdracht niet in de weg staat.

We zullen zien, dat men, om van de voedingstransformator af te komen, vaak alle buizen in serie op het net aansluit; in zo'n kleine katode moeten dan hele einden dun draad ondergebracht worden: men wringt zich hiervoor letterlijk in allerlei bochten en past de gespiraliseerde gloeidraad toe; buizen van 50 volt gloeispanning zijn niet zeldzaam! Daar de gloei-stroom op zichzelf ook nog een magnetisch veld veroorzaakt, draait men de heen- en teruggaande gloeidraad binnen in het katode-buisje ook nog in elkaar; men spreekt dan van een bifilaire gewikkelde gloeidraad (bi = 2, filaire = draadig) (fig. 34), zodat er geen magnetisch veld meer opgewekt wordt.

Bij deze indirect verhitte buizen gloeit de katode op een gemiddelde temperatuur en volgt niet de fluctuaties van de wisselspanning; over de gehele lengte hebben we maar met één, constante, spanning te maken (fig. 35).

We zien in fig. 36, dat de kring met de gloeidraadvoeding feitelijk niets meer met de andere kringen uitstaande heeft; in principe kan men deze zonder bezwaar uit een andere stroombron, b.v. uit een accu, voeden.

We hebben nu het wezen van de radiobuis wat nader bezien en gaan nu nog even door met de theoretische beschouwing. Door de roosterwindingen dichter om de katode te wikkelen heeft men met KLEINER wisselspanningen GROTER invloed op de anodestroom-variëaties. Deze ruimtelijke afstand tussen rooster en katode mogen we niet verwarren met het begrip roosterruimte. Het resultaat is te zien op de karakteristiek (grafische voorstelling) van een aldus uitgevoerde buis. We zien het rechte gedeelte van de karakteristiek „steiler” overeind staan en inderdaad spreekt men bij buizen van de steilheid.

Bij de verschillende figuren wordt met anode-spanning bedoeld de anode-voedingsspanning. Hebben we het over de spanning, gemeten tussen de anode en de aarde, dan spreken we van: de spanning op de anode, V_a .

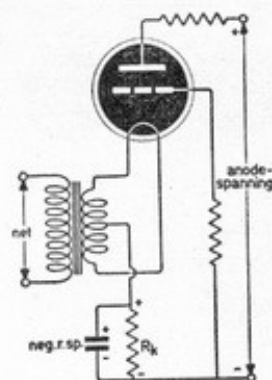


fig. 33

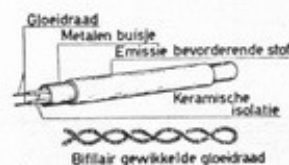


fig. 34

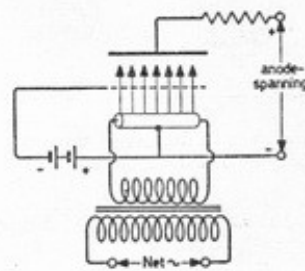


fig. 35

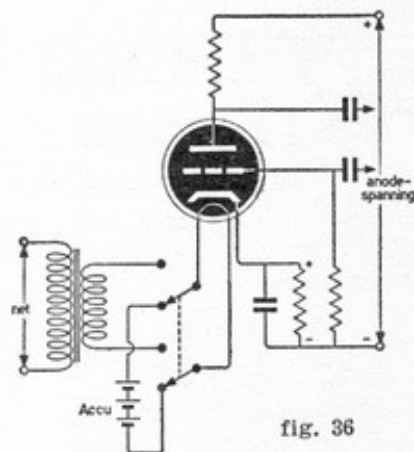
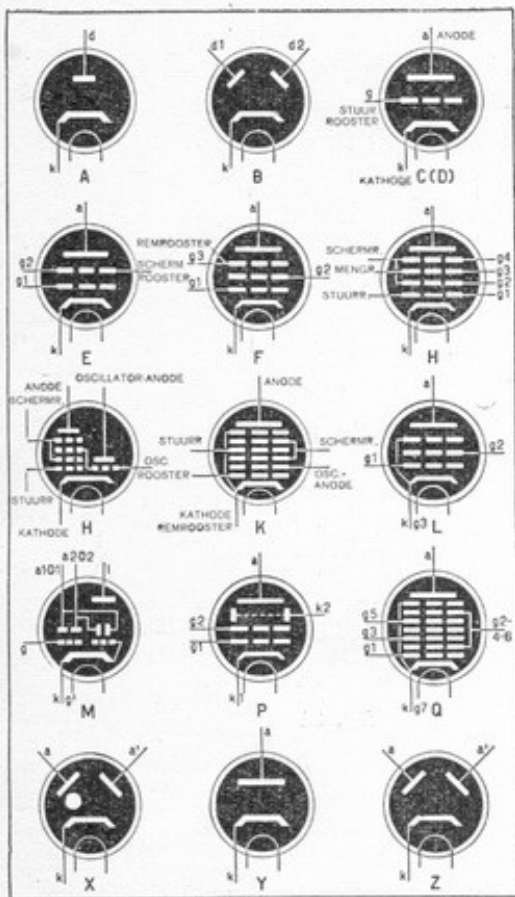


fig. 36



Schematische aanduiding van verschillende buistypen.

- A = Enkele diode (gelijkrichter)
- B = duo-diode (detector en AVR diode)
- C = triode (eindbuizen uitgezonderd)
- D = eindtriode
- E = tetrode
- F = r.f. pentode
- H = hexode of heptode
- K = octode
- L = eindpentode
- M = afstemindicator
- P = secundaire emissiebuizen
- Q = enneode (= buis met negen elektroden)
- W = enkelfazige kwikdampgelijkrichter (als Y, doch met witte stip)
- X = dubbelfazige kwikdampgelijkrichter
- Y = enkelfazige gelijkrichter (hoogvacuum)
- Z = dubbelfazige gelijkrichter (hoogvacuum)

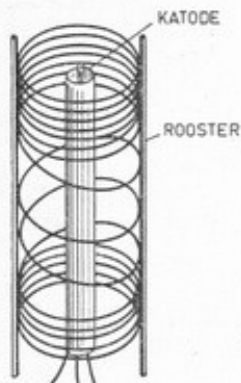


fig. 37

STEILHEID

De steilheid van een buis is de verhouding van het aantal MILLIAMPÈRES dat de wijziging van de anodestroom BEDRAAGT tot het aantal VOLTS, dat deze wijziging VER-

anodestroomverandering
OORZAAKT of: $S = \frac{\Delta I_a}{\Delta V_g}$. Uit de roosterspanningsverandering

aard der zaak geldt dit slechts voor zeer kleine veranderingen. Evenals in de wiskunde duiden we het begrip „zeer kleine verandering” aan met de Griekse letter Δ (= delta).

Wij kunnen dus ook schrijven: $S = \frac{\Delta I_a}{\Delta V_g}$ en we drukken

deze steilheid uit in milli-ampères per volt, mA/V, omdat de anodestroom in mA en de roosterspanning in V gemeten wordt.

In onze eerste grafiek (fig. 12) zagen we dat in het rechte gedeelte een verandering van 1 volt een anodestroomverandering van circa 1,6 mA teweeg brengt. S is dus = 1,6 mA/V. In de andere grafiek (fig. 17) is dat: $S = 5,6$ mA/V. Overigens gebruiken we het begrip steilheid voornamelijk bij buizen voor hoogfrequent versterking en voor eindbuizen.

Intussen kan het soms wenselijk zijn de versterking van een apparaat te regelen. Eén der methoden is, dat men de steilheid van één of meer buizen laat veranderen, door de negatieve roosterspanningen te vergroten, dus meer negatief te laten worden. Wanneer we dit met een normale buis zouden doen, bereikten we spoedig de bocht of zoals we dat noemen de knik in de karakteristiek; er loopt dan geen anodestroom meer en we zeggen dat de buis DICHTGEDRUKT is. Een dergelijke plotselinge overgang is ongewenst en daarom maakt men buizen waarvan de karakteristiek een lange staart heeft, waardoor de bocht zó flauw wordt, dat we er wel in mogen werken. Men noemt ze regelbuizen, varipentoden, selectoden, variabele μ buizen enz. Men verkrijgt deze buiseigenschappen door het rooster te winden als in fig. 37 te zien is; als regel past men dit toe bij meer-roosterbuizen (pentoden, tetroden) (fig. 38). Deze methode van regelen is echter uitsluitend bij hoogfrequent versterking van toepassing; geheel zonder bezwaren is deze echter niet, want door het gekromde karakteristiek zal voor relatief grote signalen op 't stuurrooster spoedig vervorming, gelijkrichting, kruis- of brommodulatie ontstaan. We komen hier later op terug in les 9.

VERSTERKINGSFACTOR

Om deze te bepalen moeten we de buis instellen in zijn werkpunt; in ons voorbeeld bij fig. 16 dus met een roosterspanning van $-2\frac{1}{2}$ volt. We meten dan een bepaalde anodestroom, die natuurlijk afhangt van de toegepaste anodespanning. Wanneer we die anodespanning gaan verlagen (de roosterspanning veranderen we niet), dan loopt de anodestroom terug. We verlagen nu de ANODESPANNING E_a (b.v. met 40 volt) van 200 V tot 160 V en zien dat daardoor

de anode-STROOM terugloopt van 3,3 mA tot 2,1 mA, dus met 1,2 mA (fig. 39).

De anodespanning laten we eens even op 160 V staan en gaan nu de ROOSTER-spanning zóveel verhogen, dat de anode-STROOM weer zijn oorspronkelijke waarde 3,3 mA krijgt. Het blijkt, dat we de roosterspanning hiervoor moeten brengen van $-2,5$ V op $-1,8$ V. De roosterspanningsverandering is dus $2,5 - 1,8$ V = 0,7 V.

Welnu, de versterkingsfactor, die we μ (spreek uit: mu) noemen, is: de ANODESPANNINGS-verandering gedeeld door de ROOSTERSPANNINGS-verandering, bij gelijkblijvende ANODESTROOM.

Ook hier gaat het om zeer kleine veranderingen en passen we dus weer het teken Δ (delta) toe en zeggen:

$$\mu = \frac{\Delta \text{ anodespanning}}{\Delta \text{ roosterspanning}} = \frac{\Delta V_a}{\Delta V_g} \quad (I_a = \text{const.})$$

Bij deze buis krijgen we dus $\mu = \frac{\Delta V_a}{\Delta V_g} = \frac{40}{0,7} = 57,1$.

Dit begrip μ komen we bij de versterking van laagfrequent trillingen tegen en stelt de maximaal bereikbare versterking voor, in werkelijkheid is de versterking steeds lager.

INWENDIGE WEERSTAND

We vertelden al, dat een buis zich voordoet als een soort weerstand; we spreken daarom van de inwendige weerstand of de R_i van de buis.

Men zou geneigd zijn te zeggen:

$$R_i = \frac{\text{anodespanning (in V)}}{\text{anodestroom (in A)}}, \text{ dus } \frac{V_a}{I_a}$$

Dit zou dus volgens de wet van Ohm gaan: $R = \frac{E}{I}$ en inder-

daad kan men dit de gelijkstroom-weerstand van de buis noemen.

Nu hebben we hieraan niet zoveel, omdat we de buis niet in rusttoestand gebruiken, maar met wisselende spanningen op het rooster; de inwendige buisweerstand voor wisselstromen

blijkt nl. vooral bij pentoden belangrijk groter te zijn dan $\frac{V_a}{I_a}$.

We moeten hierbij onthouden, dat we met V_a de spanning tussen C en D bedoelen, dus tussen anode en katode (fig. 40). Met de inwendige weerstand bedoelen we dus in het vervolg uitsluitend de inwendige weerstand voor WISSELSTROMEN en die is de ANODESPANNINGS-verandering gedeeld door de ANODESTROOM-verandering, die daarvan het gevolg is (de roosterspanning laten we onveranderd). (Zie fig. 15).

In formule krijgen we:

$$R_i = \frac{\Delta \text{ anodespanning}}{\Delta \text{ anodestroom}} = \frac{\Delta V_a}{\Delta I_a} \quad (V_g = \text{const.})$$

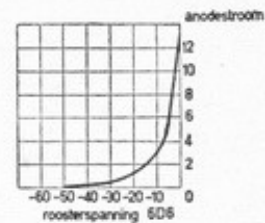


fig. 38

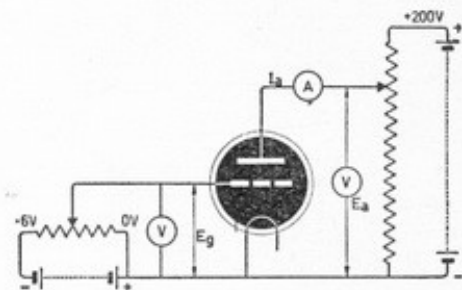


fig. 39

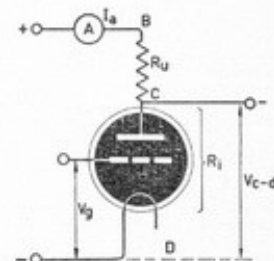


fig. 40

Deze R_i wordt uitgedrukt in ohms. De waarde van R_i wordt door de buisfabrikanten in de buizengidsen vermeld. De hier genoemde 3 formules voor de steilheid, versterkingsfactor en inwendige weerstand noemen we de formules van BARKHAUSEN; er bestaat een onderling verband, want

$$\frac{\Delta V_a}{\Delta V_g} = \frac{\Delta I_a}{\Delta V_g} \times \frac{\Delta V_a}{\Delta I_a} \text{ of: } \mu = S \times R_i,$$

terwijl we ook mogen schrijven: $S = \frac{\mu}{R_i}$ en ook: $R_i = \frac{\mu}{S}$.

In al deze formules betekent S de steilheid in ampères per volt. Daar het handiger en gebruikelijk is S in milli-ampères per volt uit te drukken, gaan bovenstaande formules er aldus uitzien:

$$\mu = \frac{S \text{ (mA/V)} \times R_i}{1000} \quad \text{of} \quad S \text{ (mA/V)} = \frac{\mu = 1000}{R_i} \quad \text{of}$$

$$R_i = \frac{\mu \times 1000}{S \text{ (mA/V)}}.$$

R_i wordt in ohms uitgedrukt.

STATISCHE EN DYNAMISCHE KARAKTERISTIEK

De hier genoemde formules en de daarbij getoonde buiskarakteristieken zijn verkregen met behulp van gelijkspanningen, die we door middel van potentiometers aan batterijen ontleend hebben. Anodebelastingsweerstand en inwendige weerstand werden bij deze metingen niet toegepast. De aldus verkregen gegevens slaan dus alle op rusttoestanden; we noemen het daarom *statische metingen*.

Gaan we een buis echter in een werkend toestel plaatsen, dan zien we (met behulp van véél ingewikkelder metingen) dat de steilheid veel kleiner wordt en de totale versterking véél lager waarden bereikt, terwijl daarentegen de inwendige weerstand veel hóger waarden vertoont; vooral bij tetroden is dit het geval: Men spreekt hier van *dynamische buis-karakteristieken* en -metingen.

Op dit punt willen we eens even resumeren wat een radio-buis is: een apparaat, waar we een bepaalde wisselspanning IN brengen, zonder dat deze energie behoeft te leveren, terwijl we UIT de buis óf een verhoogde spanning óf een vergrote energie kunnen verkrijgen.

De uitgangswisselspanning kan in sommige buistypen zeer hoog zijn, dank zij bepaalde buiseigenschappen; energie leveren, zoals die bijvoorbeeld nodig is voor een luidspreker, waar we werkelijk de lucht heen en weer moeten duwen, kan zo'n buis als regel ook niet. Daarvoor bestaan de z.g. *energieversterkers* (eindbuizen).

We zullen verderop zien, dat er wel degelijk een verschil bestaat tussen SPANNINGS-versterking en ENERGIE-versterking.

SPANNINGSVERSTERKING

Bij de tot dusver toegepaste spanningsversterking hebben we ons weinig bezig gehouden met de vraag: hoe groot moet

R_u (of R_a zoals men tegenwoordig zegt), dus de belastingsweerstand zijn om de maximale output-spanningen te verkrijgen. We moeten om een juist inzicht in deze materie te krijgen de schakeling van de buis eens van een geheel andere kant bezien, dus niet langer zoals in b.v. fig. 20. Deze figuur geeft nl. een goed beeld van de gedragingen van de buis voor zover het zijn rusttoestand betreft, maar voor het beschouwen van zijn bezigheden als wisselspanningsversterker schiet deze figuur tekort. Wanneer we even in 't midden laten hóe en wáár we de signaal-input in de buis brengen, kunnen we de buis gerust beschouwen als een generator, dus opwekker die ons de gewenste (versterkte) wisselspanning levert (fig. 41).

Zoals elke generator of accu heeft die generator een inwendige weerstand R_i (zie les 1) en om de zaak even aanschouwelijk voor te stellen tekenen we maar weer die accu, met daarnaast afzonderlijk, maar in 't zelfde hokje, zijn R_i . Wanneer verkrijgen we nu de hoogste spanning aan de klemmen, dus over R_a ? Wel, als R_a een zeer hoge waarde heeft; wanneer we de R_i en de R_a even onder elkaar tekenen is dat nog duidelijker te zien (fig. 42). Om dus uit onze buis een zo hoog mogelijke versterking te verkrijgen zou R_a een heel hoge waarde moeten bezitten. Helaas biedt deze oplossing wel enige bezwaren. We beschouwen het interieur van onze buis nl. even als een generator. Helaas moet deze generator voorzien worden van een voedingsspanning en door een speling van het noodlot is die R_a nu juist tévens de toevoering voor deze voeding. Voor de generator-functie behoeft dit geen enkel bezwaar te zijn; in de figuur zien we aan het ondereind van R_a de toevoering, terwijl een grote condensator C die generatorkring weer sluit. De C biedt nl. aan wisselstromen slechts een geringe weerstand, zodat het ondereind voor R_a voor wisselstroom praktisch gesproken aan aarde ligt. Voor de gelijkspanning biedt C een volledige blokkering. In feite zit deze C als afvlakcondensator in ons anodevoedingsapparaat; voor goed begrip tekenen wij hem hier (fig. 43).

Wanneer die R_a nu heel groot is, zal in feite maar een lage spanning op de anode van de buis aanwezig zijn als gevolg van de spanningsdaling. Hierdoor zal ten eerste de buis onder ongunstige omstandigheden werken, want hoe láger de uiteindelijke voedingsspanning op de anode is, des te lager is de waarde van μ , zelfs lager dan de door de fabrikant opgegeven waarde, en ten tweede zal er een vrij sterke vervorming optreden. Want zoals we weten gaat de spanning aan de anode telkenmale een zeker aantal volts op en neer. Welnu, bij een te lage bedrijfsspanning aan de anode kan die spanning wél omhóóg gaan maar niet in gelijke mate omláág; de buis loopt telkenmale „vast”, zoals we zeggen. In feite krijgen we dan dezelfde toestand als in fig. 18: de positieve helft van de sinusbocht is hoger dan de negatieve. En door middel van een z.g. analyse zouden we kunnen zien, dat elke grillige lijn weer uiteindelijk samengesteld is uit verschillende sinusvormige lijnen, die echter verschillende frequenties hebben. De bij de triode veelvuldige optredende vervormingen worden door de z.g. tweede harmonische trilling veroorzaakt, een trilling met een frequentie die $2 \times$ zo hoog is als die van het input-sigitaal, dat we hier de grondgolf noemen. In fig. 44 zien we náást elkaar: de grondgolf (input-sigitaal) met het versterkte en helaas vervormde sigitaal.

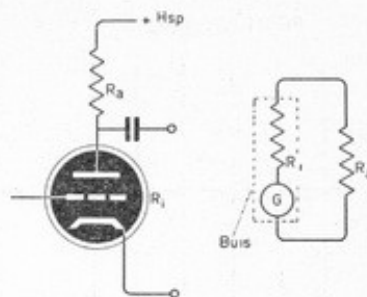


fig. 41

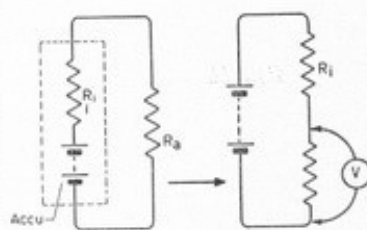


fig. 42

Om de hoogste spanning over R_a te verkrijgen moet R_a groot zijn ten opzichte van R_i

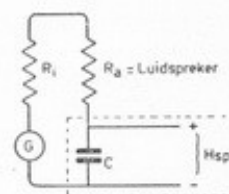


fig. 43

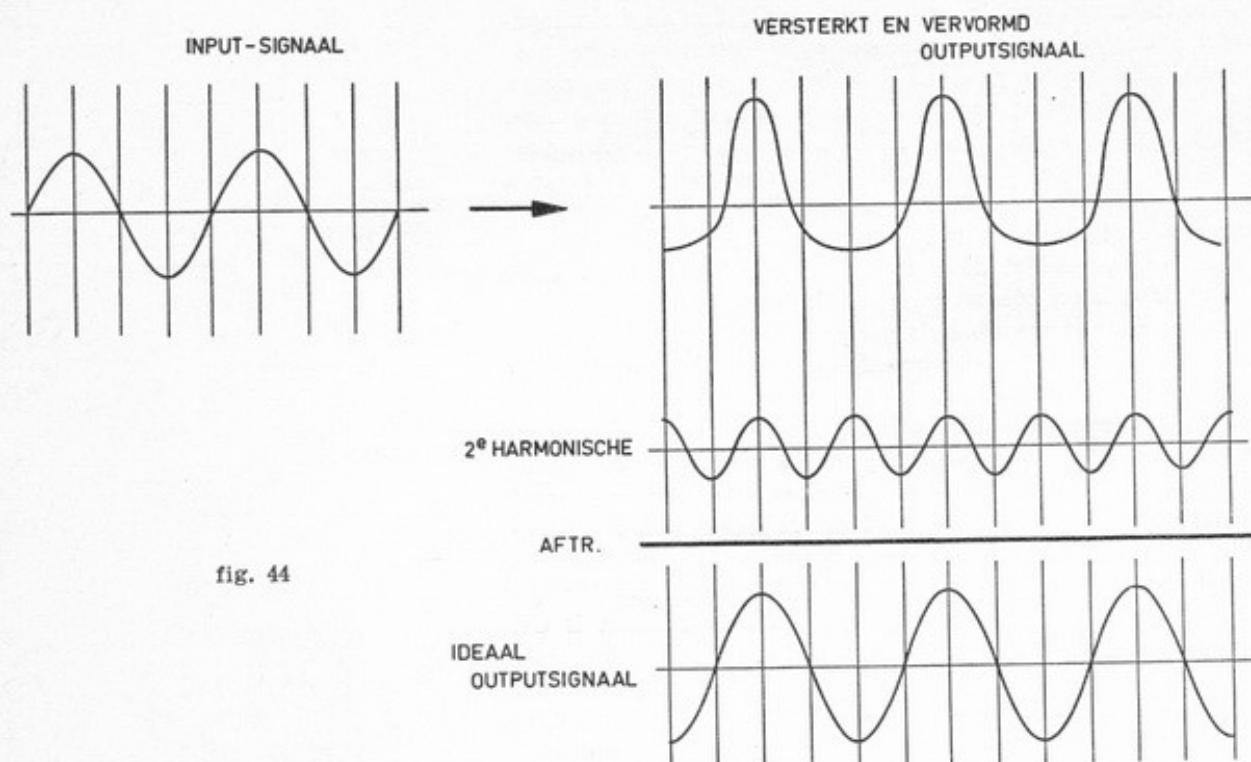


fig. 44

Deze vervorming is ontstaan door de z.g. tweede harmonische, een ongewenst bijverschijnsel; we zien die afzonderlijk afgebeeld onder de output.

De vervormde output is dus een samenstelling van de (ideale) grondgolf en die 2e harmonische. Wanneer wij die dus van elkaar aftrekken konden, houden we de onvervormde (versterkte) grondgolf over. Helaas kunnen we dit kunstje alleen maar op papier uithalen.

Overigens valt het wel op, dat de amplitude van die ongewenste 2e harmonische trilling veel kleiner is dan die van het gewenste output-signaal; wanneer die 2e harmonische beperkt blijft tot 5 % van de amplitude van 't output-signaal zullen we er niet veel van horen.

We zoeken dus voor R_a een kleiner waarde, een middenweg dus, waardoor de versterking dus kleiner blijft dan de maximale; de vervorming daalt dan echter ook. De juiste waarde vinden we voor elk type in de buizengids. Welke versterking kunnen we nu bereiken per buis, of per trap, zoals we zeg-

gen? We gebruiken dan de formule: $A = \mu \times \frac{R_a}{R_a + R_i}$.

Met A duiden we in 't algemeen 't begrip „versterking” aan; μ is de ons nu reeds bekende versterkingsfactor en R_a en R_i behoeven geen nadere toelichting. We vervangen nu in bovenstaande formule die μ door de andere uitdrukking, die we daarvoor leerden kennen op pagina 16, nl.

$$\mu = \frac{S \text{ (mA/V)} \times R_i}{1000} \text{ en dan krijgen we als formule voor de}$$

$$\text{versterking: } A = \frac{S \times R_i \times R_a}{1000 \times (R_a + R_i)}, \text{ waarvoor we ook}$$

$$\text{mogen schrijven: } A = \frac{S}{1000} \times \frac{R_a \times R_i}{R_a + R_i}.$$

Stel nu eens, dat we een triode hebben waarvan het volgende bekend is: $\mu = 15$; $S = 1,5 \text{ mA/V}$; $R_i = 10000$. R_a is 10000. De versterking A is dan

$$\frac{1,5}{1000} \times \frac{10000 \times 10000}{10000 + 10000} = \frac{1,5}{1000} \times \frac{100000000}{20000} = \frac{150000000}{200000000} = 7,5.$$

Voor een pentodebuis vinden we de volgende gegevens: $\mu = 300$; $S = 1,5 \text{ mA/V}$; $R_i = 200000$; $R_a = \text{weer } 1000$. Voor A vinden we dan:

$$A = \frac{1,5}{1000} \times \frac{10000 \times 200000}{10000 + 200000} = \frac{1,5 \times 2000000000}{1000 \times 210000} = \frac{3000000000}{210000000} = 14,2.$$

Dit geeft dus al een heel verschil; in werkelijkheid zal het verschil nog groter zijn, want bij pentoden is gemakkelijker een hogere waarde voor A te behalen.

Dit was de spanningsversterking; voor de **ENERGIEVERSTERKING** dienen we te beseffen, dat we hierbij zoveel mogelijk wisselstroomenergie uit de buis moeten zien te halen. Om luidsprekers „aan te drijven”, zoals men het haast zou willen noemen, is namelijk een bepaalde energie nodig; men rekent als minimum op 50 milli-watt, maar dit is heus niet veel. Voor kamergebruik is zeker 2 à 2½ watt nodig; vooral de weergave van lage tonen eist veel vermogen, meer dan voor de hoge. De buis die deze energie leveren moet, dient een energieversterkerbuis te zijn; men noemt hem meestal de eindbuis. Wanneer we nu even teruggrijpen naar een accu (met zijn onafscheidelijke onzichtbare R_i), dan zien we daarnaast de belastingsweerstand R_a . Het kan berekend worden, dat om een maximale energie, dus het aantal watts, $V \times A$, uit de accu in die R_a te verkrijgen, wij de waarde van R_a gelijk moeten maken aan R_i (fig. 47).

Dit geldt in principe eveneens voor de triode-buis, die we in fig. 48 maar weer als een generator tekenen, met zijn afzonderlijk getekende R_i en daarnaast zijn R_a .

De belastingsweerstand, in de regel een luidspreker, zou dus een R_a moeten hebben die gelijk is aan de waarde R_i , die in de buizengids te vinden is. Om echter vervorming door de 2e harmonische te vermijden, zal men R_a minstens $2 \times$ de waarde van R_i moeten geven; dus $R_a = 2 \times R_i$; in de praktijk is $3 \text{ à } 4 \times R_i$ gewenst gebleken; om het ons niet moeilijk te maken geeft de buizenfabrikant de juiste waarde van R_a voor elk buistype. Voor pentodebuizen met hun grote inwendige weerstand R_i stellen we de waarde van R_a op $1/10$ van de R_i , dus $10 \times R_a = R_i$. Ook voor deze buizen vinden we de juiste waarde van R_a in de buizengids; als houvast, als regel dus zou men kunnen zeggen dat R_a voor pen-

toden gelijk is aan $\frac{V_a}{I_a}$, de gelijkstroomweerstand

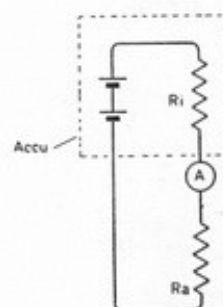


fig. 47

Om het **grootste vermogen** uit de accu te halen moet R_i gelijk zijn aan R_a .

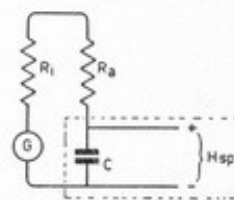


fig. 48

van een buis, dus $R_a = \frac{V_a}{I_a}$.

Bij de pentode treedt ook vervorming op, doch bij dit buis-type is het niet de 2e harmonische doch zijn het de 3e en hogere oneven harmonischen, die de vervorming veroorzaken. Bij beide buistypen heeft men de gewoonte de amplituden van de aanwezige ongewenste harmonischen op te tellen en de aldus verkregen som uit te drukken in % van de amplitude van de gewenste grondgolf. Vooral bij muziek zal vervorming tot elke prijs vermeden dienen te worden; bij spraak steekt het niet zo nauw en is 10 % nog toelaatbaar. Kwaliteitsversterkers van moderne constructie blijven beneden 1 % vervorming.

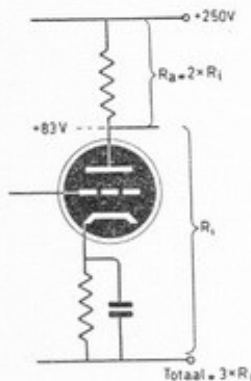


fig. 49

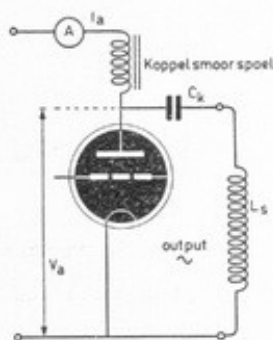


fig. 50

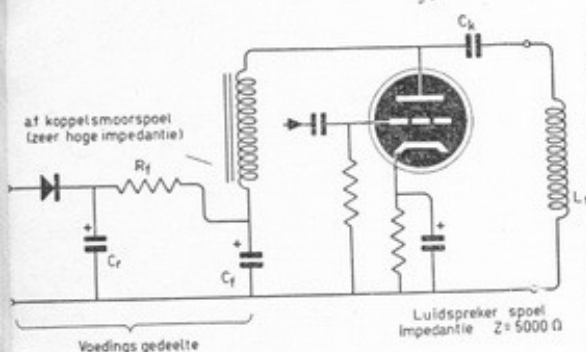


fig. 51

BELASTINGSWEERSTAND

Bij de spanningsversterking werd de R_a zodanig gekozen dat de hoogste versterking optrad; via een condensator werd de versterkte spanning, de output aan het rooster van een volgende buis gebracht. Op een eindbuis volgt echter de luidspreker, die aldus zelf de belasting R_a voor de buis vormt en dus de door de fabrikant voorgeschreven waarde dient te bevatten. R_a heeft dus ook hier weer een dubbele functie: stroom-toevoerleiding naar de anode van de buis en tegelijkertijd belastingsweerstand, nl.: luidspreker. Nu is de combinatie van deze functies bij eindbuizen niet zo gelukkig, want R_a wordt door een vrij grote stroom doorlopen; over R_a zal dit een vrij grote spanningsval veroorzaken, zodat tenslotte op de anode van de buis maar een lage spanning beschikbaar is (fig. 49).

Denk maar na: de gunstigste R_a voor een triode is $2 \times$ zijn R_i . R_a is dus $2R_i$. In totaal krijgen we dus in serie: $R_i + R_a = R_i + 2R_i = 3R_i$. Op de anode van de buis, dus tussen punt C en de aarde meten we $1/3$ van de voedingspanning. Wanneer deze 250 volt is, bedraagt de spanning op de anode slechts 83 volt! Zouden we op de anode 250 volt willen meten, dan moeten we een voedingsapparaat van liefst 750 volt bezitten. Gelukkig kennen we een nuttig voorwerp, dat een hoge wisselstroomweerstand, doch een lage gelijkstroomweerstand bezit: de laagfrequent smoorspoel.

De koppelcondensator C_k zal weinig wisselstroomweerstand in de kring mogen brengen en moet dus een grote waarde bezitten, b.v. 4 à 8 μF (niet elektrolytisch). De toestand ziet er nu gunstiger uit: voor wisselstroom wordt de buis belast met de luidspreker, die een impedantie (wisselstroomweerstand) van 5000 Ω bezit, terwijl de gelijkstroomvoeding door de smoorspoel, die we hier de koppel-smoorspoel noemen, plaats vindt, vrijwel zonder spanningsval (fig. 50).

Nu moeten we ons nog even realiseren, dat voor de wisselstroom-output de luidspreker parallel staat op de smoorspoel; we zien dit in fig. 51. De „onderkant” van de smoorspoel is door de C_r van ons anodevoedingsapparaat „geaard”, d.w.z. op dat punt staat wél een gelijkspanning maar géén wisselspanning. Veroorzaakt die parallelschakeling van de smoorspoel aan de luidspreker nu schade aan de output? Neen; de zelfinductie heeft namelijk een impedantie die zéér veel hoger is dan die van de luidspreker; er loopt dus maar een zeer gering deel van de output door. Overigens is dit geen elegante oplossing; in de

praktijk past men een z.g. uitgangstransformator toe (fig. 52). We komen op dit instrument in de volgende les terug. Nu zitten we nog met de vraag: in hoeverre verschilt een buis voor spanningsversterking met een buis voor energieversterking? Nu, in principe zit er geen enkel verschil; we zagen reeds dat een eindbuis al heel gauw 20 à 30 mA gebruikt, terwijl een spanningsversterkerbuisje in de regel niet meer dan 0,5 mA gebruikt! In de praktische toepassing is er dus wel degelijk verschil.

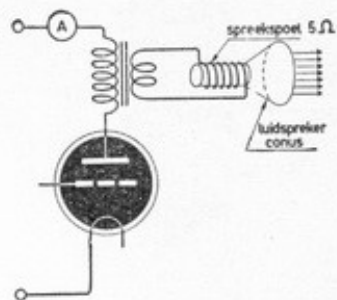


fig. 52

BUISAFSCHERMING

Om te maken, dat invloeden van buitenaf de werking van de radiobuis niet verstoren en dat, omgekeerd, de versterkte spanningen op de anode niet op de roosterkringen kunnen terugstralen, heeft men om de buis een metalen afscherming moeten aanbrengen, die met de aarde of het chassis verbonden werd. In Amerika deed en doet men dit door middel van losse aluminium busjes, terwijl in Europa jarenlang een op de glasballon gespoten metallisering in zwang geweest is, die dan met een fantasiekleurtje, goud of rood overspoten werd. Thans is deze methode verlaten; ten dele past men in Europa een afscherming van metaalgaas in de glasballon toe (bij de sleutelbuizen) of busjes, zoals in Amerika. De geheel stalen buizen vormden een uitstekende oplossing, doch lijken een tijdelijke verschijning. (Duitsland en Amerika).

MEERROOSTERBUIZEN

De interne buiscapaciteiten zijn schadelijk voor de goede werking; vooral de anode-roostercapaciteit staat hoge versterking in de weg, omdat een terugwerking optreedt. Een remedie hiertegen is het z.g. schermrooster, dat in de TETRODE tussen rooster en anode geplaatst is. De capaciteit tussen anode en rooster en de terugwerking van anode op rooster wordt daardoor tot een zeer kleine waarde teruggebracht; hoge versterking kan met deze buis worden verkregen.

Hoe verklaren we nu deze invloed van het schermrooster? Om te beginnen is in de regel bij deze buizen de anode verder dan het rooster verwijderd dan normaal. Daardoor wordt de R_i van de buis uit de aard der zaak groter. We zullen later zien dat dit een groot voordeel is. Maar om hiervan de voordelen te plukken zou de belastingsweerstand R_a dan óók groter gemaakt moeten worden, hetgeen weer de noodzaak van hoge anodevoedingsspanning met zich meebrengt. Om dit nu te ontgaan plaatst men in de buis tussen rooster en anode het scherm, dat wat de uitvoering aangaat heel veel op een rooster lijkt. Het scherm wordt aangesloten op een spanning die steeds lager moet zijn dan die op de anode. Het scherm werkt dus als een lokaas voor de elektronen, die echter merendeels tussen de mazen van het schermrooster dooryliegen en op de anode, waar ze behoren, belanden.

Uit de aard der zaak loopt er ook een stroom door het schermrooster; deze bedraagt circa 20 % à 25 % van de anodestroom.

Momenteel worden tetroden weinig meer gebruikt na de uitvinding van de PENTODE, waarin een extra-rooster tussen

schermrooster en anode is geplaatst; het is met aarde verbonden en wordt als regel remrooster of vangrooster genoemd. Ook hier weer: grotere steilheid en versterking, minder terugwerking, terwijl de R_i heel hoog wordt, b.v. $2\text{ M}\Omega$, hetgeen een grotere uitwendige weerstand R_a toelaat en dus: grotere versterking. Het is goed hier er nog eens extra op te wijzen, dat deze R_i bij pentoden een véél

groter waarde is dan $\frac{V_a}{I_a}$.

Wat de functie van het remrooster is kan met weinig woorden worden gezegd. Bij de tetrode is het mogelijk, dat de elektronen met zulk een kracht op de anode terecht komen, dat door dit „bombardement” enige elektronen uit het metaal, waaruit de anode is opgebouwd, vrij komen. Op zichzelf zou dit geen ramp betekenen; doordat elektronen negatief zijn zullen ze zich na de eerste schrik weer naar de anode moeten wenden in verband met zijn positieve lading. Wanneer nu de spanning op het schermrooster b.v. 180 volt is en de anode als gevolg van de werking van de buis tijdens de halve faze op een lagere spanning komt, zullen de door het bombardement vrij gekomen elektronen zich tot het schermrooster wenden; de eigenlijke anodestroom zal afnemen. We noemen dit emissieverschijnsel „secundaire” emissie. Het probleem van deze secundaire emissie is te ingewikkeld om hier verder behandeld te worden; het resultaat is echter dat, gezien uit het oogpunt van versterking, de buis een „negatieve” inwendige weerstand R_i krijgt. Nu, een negatieve weerstand is niets anders dan een generator. Om dit ongewenste verschijnsel te ontgaan en zou men het schermrooster van een tetrode tot op de helft van de spanning op de anode terug moeten brengen, waardoor het aantrekkelijke van deze buis grotendeels verloren gaat.

Door echter een geaard rooster tussen scherm en anode aan te brengen, zullen de elektronen ten gevolge van secundaire emissies nimmer het scherm kunnen bereiken: het „vangrooster” of remrooster) dat negatief is stoot ze af, terug in de richting van de anode, ongeacht hoe hoog de schermroosterspanning is. Zowel bij tetroden als bij pentoden echter is het schermrooster niet alleen met de anodevoedingsspanning, doch bovendien via een condensator rechtstreeks met aarde verbonden (fig. 53).

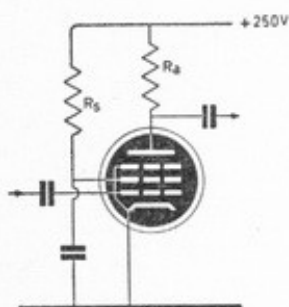


fig. 53

Wat nu de andere vormen van meerroosterbuizen aangaat, zo zijn deze alle voor een speciaal doel ontworpen.

De HEXODE bevat buiten katode en anode vier roosters; deze buis wordt niet meer gebruikt, maar diende in superheterodyne ontvangers als gecombineerde buis voor hoogfrequent-versterking, hoogfrequent-oscillator en het mengen van beide signalen (RENS 1224, AH 1).

De HEPTODE bevat vijf roosters en dient uitsluitend voor hoogfrequent-versterking; de benodigde regelspanning (= negatieve spanning op het rooster) om de steilheid tot nul te reduceren behoeft maar max. 36 V te zijn.

De in Amerika ontwikkelde heptoden, PENTAGRID CONVERTORS genoemd, dienen als mengbuis-oscillator in superheterodyne-schakelingen (6A7, 6B8 e.a.).

De OCTODE is een buis voor hetzelfde doel als de pentagrids, maar in Europa ontwikkeld (AK1, AK2, CK 1, CK3, EK2, EK3). Thans algemeen vervangen door ECH42, ECH81,

behalve voor batterij-ontvangers (DK40, DK91, DK92, DK96). Bij meerroosterbuizen heeft men de gewoonte het gewone rooster aan te duiden met de naam *stuurrooster*; bij de schematische voorstelling van meerroosterbuizen duidt men de roosters met *g* aan en nummert ze van de katode af, g_1 is het stuurrooster, g_2 het schermrooster bij een tetrode en een pentode; in 't laatste geval is g_3 het z.g. vangrooster, enz. De anode wordt steeds met *a* aangeduid, behalve bij een diode, waarvan de anode met een *d* wordt aangeduid. Zijn er méér anoden in een diode, dan nummert men die weer met d_1, d_2 , enz.

Verder brengt men vaak meerdere buissystemen in één glasbol tezamen: één of twee dioden met een triode of pentode; een triode met een pentode ofwel twee trioden. Het enige goede wat hiervan gezegd kan worden is dat het een plaatsbesparing betekent; technisch levert het slechts in bepaalde gevallen voordeel en de prijsvoordelen vallen tegen.

Een buistype wat we nog niet behandeld hebben is de **AFSTEMINDICATOR**, meer populair het **toveroog** genoemd (fig. 54). Met buizen heeft het de voet, glasballon, gloeidraadvoeding en anodevoeding gemeen; wanneer we een regelspanning op het rooster brengen, worden de „blaadjes” van het klaverblad-achtige figuurtje breder; dit figuurtje straalt met een groen lichtschijnsel door de glasballon heen. De buis wordt zó in de kast geplaatst, dat we door een opening van buiten af deze lichtschijn kunnen zien. Wordt vaak bij duurdere toestellen gebruikt om te controleren, of een ontvanger precies op een station afgestemd staat en niet er naast (hetgeen overigens voor geoefende oren gemakkelijk ook zonder toveroog vast te stellen is).

Een moderne uitvoering van de afstemindicator zien we in fig. 55, terwijl we in fig. 55a een röntgenfoto van zo'n buisje zien.

Nu hebben we de spanningsversterking in elektronenbuizen vrij simpel voorgesteld; in werkelijkheid vormen de metalen elektroden in de buis alle met elkaar kleine condensatortjes. Het ligt voor de hand, dat deze interne buiscapaciteiten de gelijkmatige versterking aardig in de weg staan, omdat de impedantie van deze condensatortjes niet gelijk is voor alle frequenties.

Als gevolg hiervan zal de inwendige weerstand R_i van een buis, dus voor verschillende frequenties, andere waarden bezitten. Bij laagfrequentversterking zal daardoor de kans op ongelijkmatige versterking van lage en hoge tonen bestaan. Bovendien zal er door de onderlinge capaciteit tussen rooster en anode een terugwerking optreden, waardoor de versterking ook weer afneemt.

Voor een triode geven we in fig. 56 een schematische voorstelling van de inwendige buiscapaciteiten en in fig. 57 iets dergelijks voor een pentode, een buistype, dat we zo dadelijk gaan bespreken.

Een kwestie die we tot dusver slechts terloops hebben aangeroerd is de **ingangsimpedantie** van een buis. Op het eerste gezicht zou men zeggen, dat die bepaald wordt door de roosterlekweerstand, die het rooster met zijn negatieve roosterspanningsbron verbindt; in feite staat de capaciteit tussen rooster en katode parallel op deze ingangskring. Hoe hoger de frequentie is van de te versterken wisselspanning, des te meer zal zich deze z.g. **ingangscapaciteit** doen gelden: hoger frequentie = lager schijnweerstand of



fig. 54

Inwendig systeem van een afstemindicator. Bovenaan ziet men het oplichtende scherm.

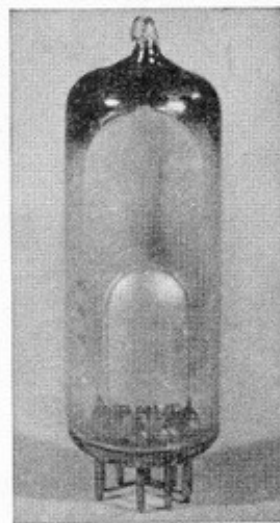


fig. 55

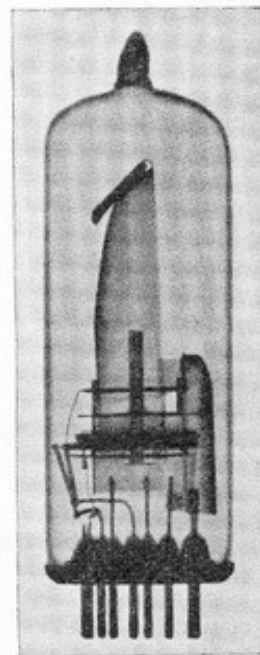


fig. 55a

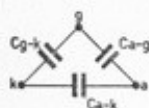


fig. 56

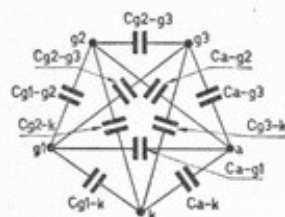


fig. 57

capacitieve R_c . Bij het versterken van radiotrillingen zoals die door FM-zenders uitgezonden worden (circa 3 m golflengte) daalt de ingangsimpedantie van een buis tot circa 2000Ω ! Dit is het gevolg van het z.g. Miller-effect, waarop we hier niet verder zullen ingaan.

Wij zagen reeds dat een buis een bepaalde ruststroom heeft en dat deze onder invloed van de roosterwisselspanningen verandering ondergaat. Wanneer nu b.v. door een buis (en dus óók door de belastingsweerstand) 5 mA vloeit en de anodespanning 200 V is, dan is 't gelijkstroomvermogen dat in die eindbuis + weerstand verloren gaat 1000 milli-watt. Die 1000 milli-watt kwam natuurlijk „ergens” vandaan; dit „ergens” is ons lichtnet of een batterij.

Gaat de buis nu werken, d.w.z. komt er een wisselspanning op het rooster, dan neemt dat vermogen regelmatig toe en af, d.w.z. komt nu weer onder en dan weer boven de 1000 milli-watt, maar de gemiddelde waarde zal nooit hoger kunnen zijn dan die 1000 mW. Denk maar na: de anodestroom zal nooit onder de 0 mA kunnen dalen, hetgeen vanzelf meebrengt, dat hij nooit boven 10 mA mag stijgen. Anders zou de negatieve sinus-top minder hoger zijn dan de positieve en dan ruiken we reeds de vervorming.

Wanneer de ruststroom van een bepaalde eindbuis nu eens 40 mA bedraagt en de hoogspanningsbron is 250 volt, dan is het opgenomen gelijkstroomvermogen 10000 milli-watt. Hoeveel wisselstroom-vermogen aan laagfrequente energie kunnen we dan maximaal in onze luidspreker verwachten?

Want dáárom gaat het. Nu, dat bedraagt steeds maar een gedeelte daarvan, max. 40 %. We zeggen dan, dat in dit geval het rendement van de buis 40 % bedraagt. Want we zeiden zoëven nu wel, dat die anodestroom nooit onder de 0 mA zou kunnen dalen, maar bij 0 mA is hij al véél te laag, want dan werken we reeds vóórbij de bocht in de buiskarakteristiek. De output is dus in dit geval max. 4000 mW, maar de energieversterking gaat steeds met vervorming gepaard en hoe hoger nu de output van een bepaalde buis is, des te onaangener het luisteren wordt.

Als we het dus over de output van een buis hebben, dienen we daarbij te vermelden hoe groot de vervorming daarbij is. Wanneer nu de buisengids vermeldt dat een bepaalde buis een gelijkstroomvermogen van 5 watt opneemt en een wisselstroomoutput oplevert van 2 watt bij 5 % vervorming, dan kunnen we dit vervormingspercentage verkleinen, door met b.v. 1 watt output genoeg te nemen. Is ons dat te gering, wel dan blijft er niets anders over dan een „ruimere” eindbuis te kiezen, die b.v. 9 watt opneemt en 4 watt output bij 5 % geeft. Bij een afgifte van 2 watt output zal de vervorming dan stellig niet meer dan 1 à $1\frac{1}{2}$ % bedragen en dat is een zeer gunstige waarde, echter ten koste van hoger energiegebruik door de grotere buis.

Natuurlijk komt bij velen de vraag om de hoek kijken: Waarom geven we zo'n kleine buis niet wat hoger anodespanning; er komt dan vanzelf meer wisselstroomenergie uit. Dat is inderdaad ook 't geval, maar we overschrijden dan zijn z.g. toelaatbare anodedissipatie. Deze is $V_a \times I_a$, dus spanning op de anode maal anoderuststroom.

Het uiteindelijke antwoord op de vraag is dus: een eindbuis is zodanig geconstrueerd dat de anode een grote anodestroom verdragen kan, hetgeen o.a. bereikt wordt door deze

zwart te maken, zodat de opgewekte warmte weer goed kan worden uitgestraald.

De gebruiksmogelijkheden van een buis liggen dus vast door zijn constructie, afmetingen en koelmogelijkheden.

MICROFONISCH EFFECT

Bij buizen van oudere typen konden geluiden of trillingen van buiten af het rooster in de buis in trilling brengen; deze trilling kwam weer versterkt uit de luidspreker, bereikte de buis weer, enz. Een hevig geloei kon het gevolg zijn; men noemde dit verschijnsel microfonisch effect. Bij de moderne indirect verhitte buizen komt het vrijwel niet meer voor; bij de direct verhitte batterijbuisjes helaas wel.

CONSTRUCTIE VAN RADIOBUIZEN

Nu nog iets over de uitvoering van huidige radiobuizen. Vanzelfsprekend moeten de elektroden binnen in de glasballon bevestigd worden; welnu, onder in de radiobuizen van oudere constructie treffen we de z.g. glaskneep aan, waarin de steundraadjes worden gehecht en de verbinding naar buiten de glasballon tot stand komt. In de kneep treffen we tevens een glazen buisje aan. Hieruit sluit men de luchtpomp aan; is de buis voldoende luchtledig, dan smelt men het dicht (fig. 58). Nu moeten we er nog rekening mede houden, dat dergelijke metaaldraadjes door de warmte uitzetten; men moet dus een metaalsoort gebruiken, die bij verwarming evenveel uitzet als glas (de z.g. uitzettingscoëfficiënt moet even groot zijn) anders zou het glas bij te grote uitzetting van het metaal knappen of het glas zou meer uitzetten dan het metaal en dan komt er lucht in de buis. En dat mag ook niet. Lucht in een radiobuis is funest, omdat de elektronen door botsingen met de zware luchtmoleculen hun snelheid verliezen. In de buis ziet men vaak een spiegelende laag op de glasballon. Welnu, in de buis brengt men steeds een klein metalen plaatje aan dat er uitziet als een schepje, met een magnesiumverbinding er op, de z.g. „getter”. Bij de normale verhitting komen steeds nog enige gasresten uit de materialen in de buis te voorschijn; deze gassen, waarvan lucht het voornaamste is, worden door de getter gebonden en slaan als een zilverachtige spiegel op de binnenkant van de glasballon neer.

Oorspronkelijk kwamen de draden ergens domweg door de glaswand; later werden zij onder, boven en opzij naar buiten gebracht (fig. 59). Toen kwamen de pootjes-buizen: ontelbaar is het aantal modellen (fig. 60a en b). Een tussenvorm, die niet meer wordt toegepast, was de P-huls, waar de pennen vervangen werden door zij-nokken. 5 of 8 (fig. 60c). De inwendige constructie was geheel gelijk aan die van de pootjes-buizen: de gehele opbouw van de metalen elektroden geschiedde op de z.g. glaskneep in de ballon; de doorvoerdraden lopen hierbij over een vrij grote weg langs elkaar, wat met het oog op onderlinge beïnvloeding ongunstig is, terwijl de lek-mogelijkheid tussen de elektroden groot was, omdat tijdens het gebruik van de buis niet vermeden kan worden, dat emitterende stof op de glaskneep neerslaat en daar een dun geleidend laagje vormt.

Op een bepaald ogenblik kwamen de Amerikanen met een geheel stalen buis, waarbij de aansluitdraden via glaskralen



fig. 58

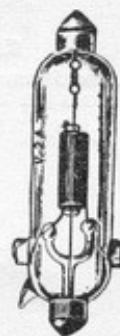


fig. 59

Een der eerste
Marconibuizen
de V24



fig. 60a

Eindpentode B443
(met of zonder zij-
aansluiting)

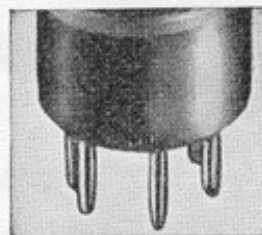


fig. 60b

Oude 6/7 pens Euro-
pese pennenvoet



fig. 60c
Onderaanzicht van
de 8-noks P-voet



fig. 61
Amerikaanse stalen
buis in doorsnee

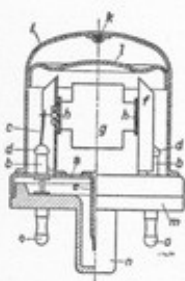


fig. 62a
Duitse stalen buis
van binnen gezien

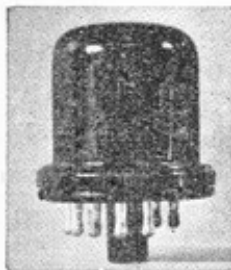


fig. 62b



fig. 63

fig. 64
Moderne buizen
v.l.n.r. Amerikaanse octal,
sleutelbuis, rimlockbuis en
miniatuur 7-penbuis

door de stalen bodemplaat werden gevoerd en het elektroden-systeem in feite op deze glaskralen kwam te rusten (fig. 61). Duitse stalen buizen volgden; ook deze constructie was wel-doordacht, maar de vrij grote voet is vrij onaantrekkelijk i.v.m. de ingenomen plaatsruimte (fig. 62a en b). Bovendien week hij sterk af van de Amerikaanse, die thans nog onder zeer veel gewone glazen buizen onder de naam „octal” (8 pen-nen) wordt toegepast (fig. 61 en 64 links).

Oorspronkelijk zag men vaak de anode-aansluiting op de top van de buis en de roosteraansluiting in de voet (fig. 63), later verwisselen ze van plaats, doch ook hier bereikte men een lage anode-roostercapaciteit.

Bij de moderne buizen treft men alle aansluitingen in de voet aan; rooster- en anode-pen liggen steeds zó tegenover elkaar, dat er zich steeds een metalen busje tussen bevindt; soms is dit de zoekpen aan de buis, bij nieuwere buizen een busje in het voetje. Bij deze nieuwere uitvoeringen heeft men gebroken met de glaskneep in de ballon en het bakelieten voetje met de pennen: de buis is geheel van glas, de bodem inclus. Dwars door die glazen bodem zijn 7, 8 of 9 pennetjes gesmolten die precies in de moderne voetjes passen. Binnen in de glasballon zijn rooster, katode en andere elektroden op die pennetjes gepuntlast. Een stevige constructie met geringe verliezen (fig. 64).

Steilheden van 10 mA/V zijn thans niet zeldzaam meer en terwijl de buizentechniek steeds verdere perfectie bereikt, zijn andere geleerden bezig de buizen geheel overbodig te maken door de uitvinding van de transistoren, die in feite het werk van de buizen verrichten zonder dat gloeistroom nodig is.

Het gebied van de batterijbuizen, dat een tijdlang geheel vergeten leek, staat bij het toenemende gebruik voor draagbare ontvangers weer in het volle licht van de belangstelling. De gloeidraden hiervan zijn ontworpen voor 1,4 V= (de spanning van een normale droge cel); het stroomverbruik is 50 à 25 mA. Omdat de gloeidraad uiterst dun is en de afstanden tussen de elektroden onderling zeer gering, dient men met deze buisjes voorzichtig om te springen, ook bij het plaatsen in de houders; de glasbodem springt nl. heel gauw wanneer aan de pinnekes wordt gewerkt. Bij nieuwe houders kunnen we beter met een defect buisje de gaatjes eerst wat opruimen (fig. 65).

Om deze kleine buisjes uit het toestel te verwijderen, kan men het best een zelfgemaak buizentrekkertje gebruiken; het is gemakkelijk uit een stripje plaatijzer te maken (fig. 66). Er is zelfs een rubber buizenzuiger in de handel, die echter een voor ons overbodige luxe lijkt (fig. 67).

Er bestaat thans een zéér uitgebreide collectie buizen, waarvan de gegevens zijn verzameld in de buizengidsen, die door

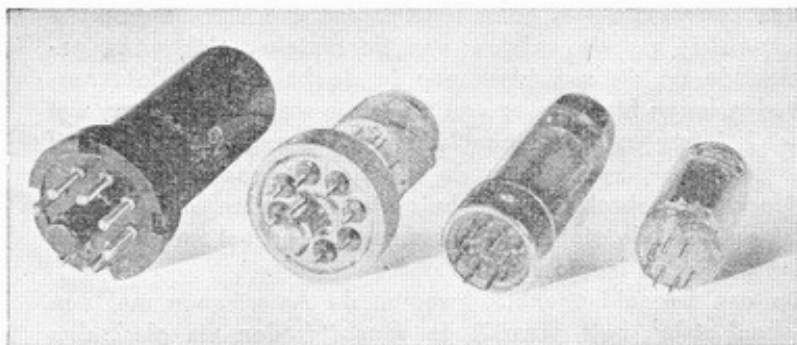




fig. 65

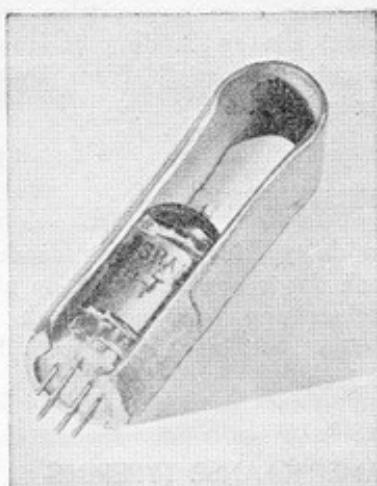


fig. 66

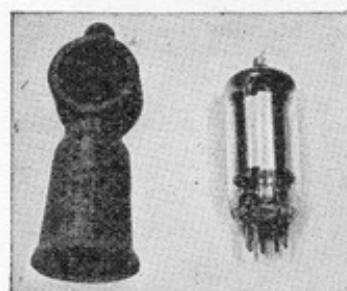


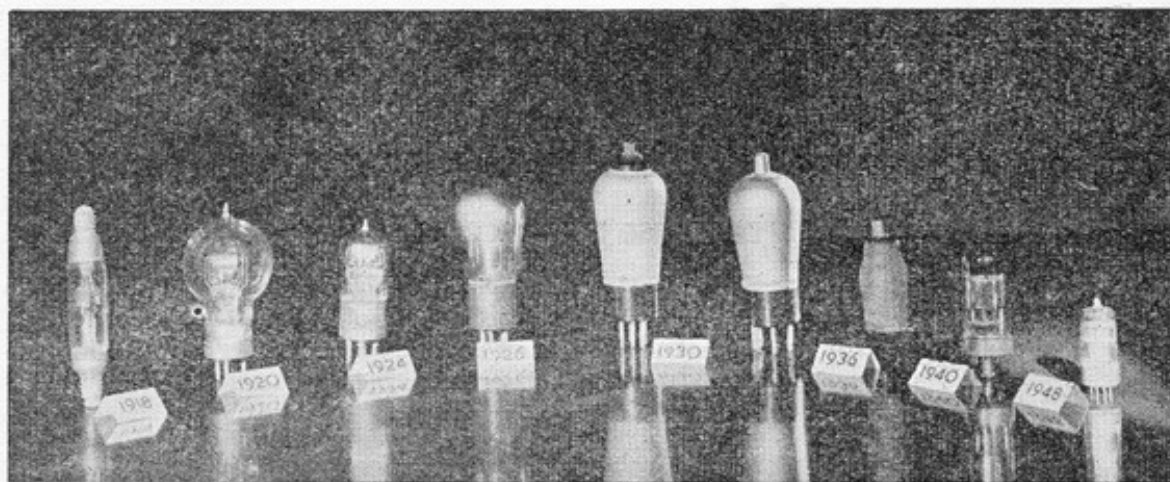
fig. 67

verschillende buizenfabrikanten worden verstrekt. De Amerikaanse firma's geven losbladige boeken uit met één of meer bladen voor elke buis; nieuwe buizen kunnen aldus worden ingevoegd. Verder zijn er buizengidsen in de handel, die tegelijkertijd buisgegevens van verschillende fabrikaten publiceren, terwijl voorts het Elektronisch Jaarboekje van de MK een schat van buisgegevens bevat.

Een nieuwe verschijning, die wel in zeer gunstige zin van alle mij tot dusver bekende uitvoeringen afwijkt is het MK Buisenhandboek.

Dit buizenboek geeft namelijk niet alleen het gebruikelijke verband tussen elektroden en de pen-situatie op de buisvoet, maar bovendien wordt elke buis temidden van zijn normale schakeling opgenomen in een zeer overzichtelijke tekening. Verder zijn bij alle verbindingen naar de elektroden vermeld, de maximale spanningen en stromen, terwijl, om het naslaan gemakkelijk te maken, de verschillende buisgroepen door kleuren zijn aangegeven. En dat alles maar voor liefst een kleine 2000 verschillende buistypen van Europese, Amerikaanse en Engelse herkomst.

Neen, wanneer we op radiogebied maar iets willen beginnen is dit boek feitelijk onmisbaar; doordat de gebruiksaanwijzing



Evolutie van de radiobuis sinds 1918. En na 1948 zijn ze nóg kleiner geworden!

in maar even negen talen werd afgedrukt kan de oplage groot zijn en... de prijs laag. (Die talen zijn: Nederlands, Engels, Indonesisch, Frans, Duits, Zweeds, Spaans, Portugees, Italiaans).

BUISTYPERING

In de typering, de naamsaanduiding, zit enig systeem, maar ook dat is een hoofdstuk op zichzelf omdat van dat systeem helaas nog wel eens wordt afgeweken. Hieronder volgen enige richtlijnen voor het „herkennen” van Amerikaanse buizen.

AMERIKAANSE TYPERING

Het eerste cijfer is de (afgeronde) gloeispanning.

0 = koude katode	25 = 25 V
1 = 1,2–1,5 V en 2 V	28 = 28 V
3 = 2,8 V of $2 \times 1,4$ V	32 = 32,5 V
5 = 5 V	40 = 45 V
6 = 6,3 V	45 = 45 V
7 = 7 of 6,3 V	50 = 50 V
11 = 11 V	70 = 70 V
12 = 12,6 V	117 = 117 V

De daarop volgende letter heeft de volgende betekenis:

H = duodiode	F = triode pentode
Q.R. = duodiodetriode	C.F.J.W. = r.f. pentode
B = duodiode pentode	D.K.M. = regelpentode
N = dubbele triode	L.V. = eindpentode
F = triode pentode	E.G.U. = afstemindicator
A.K. = mengbuizen	C.F.T. = triode
B = duodiode pentode	X.Y.Z. = gelijkrichter

Bij de nieuwste typen is deze code niet steeds aangehouden. De tweede letter A of B betekent nieuwer type.

L = uitvoering met octalvoet.

S = uitvoering met octalvoet (single ended, d.w.z.: geen topaansluiting).

Het op de letter(s) volgende cijfer geeft in het algemeen aan hoeveel elektroden naar buiten zijn uitgevoerd, waarbij de beide gloeidraden voor één aansluiting doorgaan.

Een op het laatste cijfer volgende letter heeft betrekking op de constructie.

G = glasballon (ter onderscheiding van de metalen buizen).
GT = Bantam (is kleine uitvoering in glas).

EUROPESE BUISTYPERING

En hier volgen de Europese buizen; de typering bestaat in de regel uit 2 of 3 letters, gevolgd door twee cijfers.

De eerste letter geeft aan tot welke hoofdgroep (gloeistroomsoort) de buis behoort, waarbij de letters de volgende betekenis hebben:

- A = 4 volt wisselstroom (indirect verhit)
- B = 180 mA (gelijkstroom)
- C = 200 mA (G/W-serie indirect verhit)

D = 1,2–1,4 volt batterij (direct verhit)
 E = 6,3 volt (normale buizen, indirect verhit)
 F = 13 volt speciale autoradiobuizen (indirect verhit)
 G = 5 volt
 H = 12,6 V gelijk- of wisselstroom
 K = 2 volt batterij (direct verhit)
 O = koude katode, ook germanium diode en transistor
 P = 300 mA G/W (indirect verhit)
 U = 100 mA G/W of U-serie (indirect verhit)
 V = 50 mA G/W (indirect verhit)

De groepen B, C, P, U en V zijn speciaal bestemd voor serievoeding der gloeidraden en kunnen zowel gebruikt worden op wissel- als op gelijkstroomnetten (B uitsluitend voor gelijkstroom).

Bij deze buizen wordt niet de gloei spanning doch de gloei stroom vermeld.

De schematische voorstelling van deze buizentypen vinden we reeds in fig. 33 op pag. 5–14.

De tweede en eventueel de derde letter geeft het buistype aan; hieronder volgt de betekenis dezer letter(s):

A = r.f. diode (gelijkrichter)
 B = r.f. dubbeldiode (detector en AVR diode)
 C = triode (eindbuizen uitgezonderd)
 D = eindtriode
 E = tetrode
 F = pentode (geen eindbuis)
 H = hexode of heptode
 K = octode (of heptode)
 L = eindpentode
 M = afstemindicator
 P = secundaire emissiebuis
 Q = enneode (= buis met negen elektroden)
 S = zaagtandspanningsbuizen
 W = enkelfazige gasgevulde gelijkrichter
 Y = enkelfazige gelijkrichter (hoogvacuum)
 Z = dubbelfazige gelijkrichter (hoogvacuum)

De daarna volgende 2 cijfers hebben de navolgende betekenis: Het eerste kencijfer zegt welke buisvoet gebruikt is; het tweede laat zien of men met de laatste dan wel een oudere uitvoering van een bepaald buistype te doen heeft.

1–9 zijcontactbuizen met topaansluiting *)
 11–19 Duitse stalen buizen
 21–29 sleutel (Lock-in) en octalbuizen
 31–39 octalbuizen (Eng.)
 40–49 rimlockserie (8-pin)
 50–59 diversen, zijcontact en 9-pin sleutelbuizen
 61–79 subminiatur
 71–79 dwergtypen
 80–89 noval-serie (9-pin)
 90–99 7-pins miniaturtypen
 110 Pico-serie, overeenkomstig met rimlock.

Behoudens de gloei stroom-waarden, bezitten buizen van welke serie ook, die hetzelfde nummer dragen, gewoonlijk eenzelfde karakteristiek.

In Engeland volgt men het systeem van de systeemloosheid;

*) Uitgezonderd UCH4, UBL1 met octalvoet.

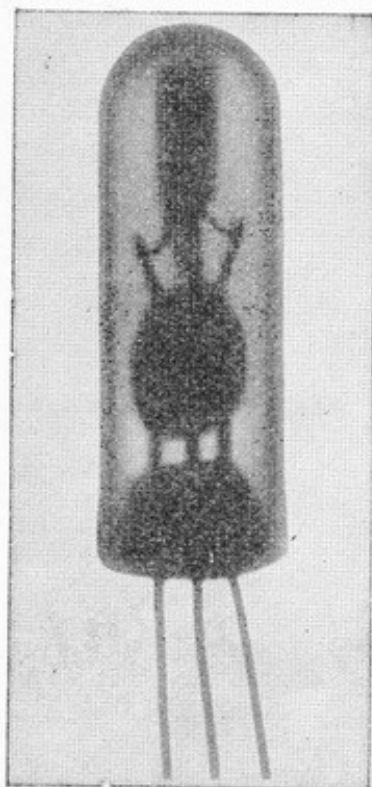


fig. 68

Röntgen-opname van een alloy-junction transistor (foto: Philips)

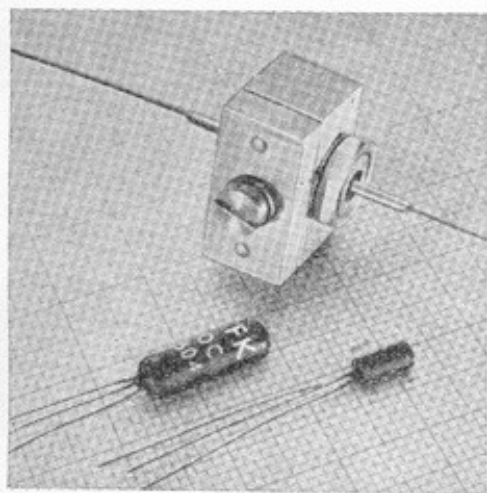


fig. 69

Miniatuur transistoren van Telefunken

we zullen het onbesproken laten; slechts Mullard volgt het Europees systeem.

Wonderlijk genoeg gaat men er in Europa hoe langer hoe meer toe over de Amerikaanse typering te volgen, terwijl zelfs in Engeland een tendens bestaat om zich wat meer bij de Amerikaanse typering aan te sluiten.

HALFGELEIDERS

Het volgende gedeelte handelt over transistoren. Deze materie is bepaald moeilijk en niemand behoeft zich te schamen wanneer hij er niets van begrijpt. In verband hiermee staat het iedere cursist vrij de vragen te beantwoorden of niet. Zijn waarderingscijfer zal er niet onder lijden. Kan hij het wél, zoveel te beter!

ELEKTRONENTHEORIE

We zullen hier nu kennismaken met de toepassing van de z.g. halfgeleiders, die normaal tot de isolatoren behoren doch onder bepaalde omstandigheden de eigenschappen van geleiders bezitten.

Om deze vrij moeilijke materie te kunnen benaderen is het noodzakelijk iets meer over de elektronentheorie te vertellen. In de natuur kennen we 92 elementen, dus bouwstenen (die we niet mogen verwarren met galvanische elementen). De kleinste vorm waarin zo'n element voorkomt is een atoom. Bij sommige elementen kan één atoom niet zelfstandig bestaan; meerdere, b.v. 2 of 3, vormen dan tezamen een molecule, die dan toch nog zuiver het betrokken element vertegenwoordigen. Soms echter vormen één of meer atomen van het ene element een verbinding met één of meer atomen van een ander element; zo zegt men voor water: H_2O , hetgeen zeggen wil: 2 atomen waterstof (H = hydrogenium) vormen tezamen met één atoom zuurstof (O = oxigenium) één watermolecule. Men noemt dergelijke verbindingen van verschillende elementen *scheikundige verbindingen*; hierbij gaan de oorspronkelijke eigenschappen van de samenstellende elementen geheel verloren en komen nieuwe eigenschappen voor de dag. Zoals gezegd kent men 92 elementen; ieder element bestaat uit een kern plus één of meer elektronen. En die kern bestaat dan uit een aantal protonen; het juiste aantal daarvan komt overeen met het bij de betrokken atoomkern behorende aantal elektronen. Het mooie is nu, dat het aantal elektronen bij alle elementen verschillend is: waterstof opent de rij met 1 elektron, uranium sluit de rij met 92 elektronen. Verder bevatten de kernen nog een aantal neutronen, die onwerkzaam zijn en dus verder onbesproken zullen blijven.

De protonen zijn dus de tegenhangers van de elektronen; zij hokken dicht opeen in wat wij de atoomkern noemen. Zij zijn ca. $1800 \times$ zo zwaar als elektronen, die dus zeer licht zijn. Nu zijn die elektronen steeds in beweging om de bijbehorende kern, maar gelijk dit met de „opstelling” van een voetbalelftal het geval is, hebben zij officieel gesproken een vaste plaats. Men stelt zich de atoomkern voor als een pit met daaromheen de z.g. schillen. Op elke schil behoort nu volgens ondoorgrondelijke natuurwetten een aantal elektronen; op de eerste 2 stuks, op de tweede 8 stuks, op de derde 18 stuks enzovoort, totdat alle 92 stuks ondergebracht zijn. Bezit een schil het voorgeschreven aantal elektronen,

dan noemt men die *compleet*; elk atoom dat alle ringen bezet heeft blijkt nu een z.g. edelgas te zijn, een gas dat met geen enkele andere stof een chemische verbinding aan kan gaan. Voorbeelden zijn: neon, argon, krypton, xenon. Mengen laten dergelijke gassen zich wél, maar dan vormen zij *mengsels*, een natuurkundig begrip, terwijl elk bestanddeel in zijn mengsel zijn oorspronkelijke eigenschappen behouden heeft. En omdat er maar een beperkt aantal elementen bestaat dat de buitenste ring gevuld heeft met het bij die ring behorende aantal elektronen, volgt daaruit dat het merendeel der elementen die buitenste ring niet gevuld heeft. Want het is een natuurwet, dat van de kern af gerekend de binnenste ringen steeds gevuld zijn en dat tekorten zich in de buitenste ring demonstreren.

Om nu voorbeelden te noemen verwijzen we naar het plaatje: voor het element germanium zijn de eerste 3 ringen volledig bezet en bevat de buitenste ring er slechts 4, terwijl bij het element silicium de twee binnenringen compleet zijn en de buitenring er slechts 4 bevat i.p.v.

Nu kunnen we 3 toestanden onderscheiden: a) de buitenste ring bevat maar enkele tekorten; deze elementen rekenen we tot de niet-metalen en zijn bekend als de isolatoren; b) de buitenste ring mist nagenoeg alle elektronen en bevat er dus maar enkele, vrijwel nooit meer dan 4 of 5; deze stoffen zijn de metalen; c) bij de derde of middenstof treffen we de stoffen als germanium, silicium, arsenicum, indium en gallium aan, die we de *halfgeleiders* noemen. De rol die de elektronen op de buitenring spelen is zeer belangrijk. Is die ring compleet, dan kan dat element nimmer een chemische verbinding aangaan; we zagen dat bij de edelgassen. Incomplete ringen kunnen dat dus wél en we begrijpen nu wel, dat juist dié elektronen de hoofdrol in die verbindingen spelen; ze vormen als het ware „haakjes” waarmee ze naar de kernen van andere atomen grijpen. Dit gebeurt dus wederkerig en de atomen gaan aldus op een „kluitje” zitten. Het aantal samenklontende atomen is nu steeds zó groot, dat uiteindelijk de buitenste ringen van alle atomen het juiste aantal elektronen bevatten en nu compleet zijn. Nu is „kluitje” maar een raar woord en daarom zullen we maar vertellen, dat we een dergelijke formatie een *kristal* noemen. Want wat wij in de wandeling een kristal noemen, een glinsterend stuk glas of edelgesteente, is maar een klein deel van de op de wereld voorkomende kristalvormen; feitelijk is elk materiaal, zoals ijzer, lood, koper, zouten enz. uit kristallen opgebouwd; het materiaal heeft dan een *kristallijne structuur*. Op de tekening zien we de ruimtelijke voorstelling van kristalstructuur van een koolstofatoom. Er bestaan meerdere kristallisatievormen van koolstof, dit is een heel bijzondere nl. van diamant.

Hiernaast zien we deze voorstelling platgedrukt; de grijphaakjes (elektronen) zijn hierop te zien. Nu noemt men die elektronen op de buitenste ring de *valentie-elektronen*, die dus de (grijp) waarde van een element vertegenwoordigen. Zijn er 4, dan is dat element 4-waardig of, zoals men zegt, de valentie is 4.

Koolstof, germanium en silicium zijn vierwaardig. Zoals gezegd mogen we ons volstrekt niet voorstellen alsof die elektronen braaf op hun plaats blijven; integendeel, zij wentelen steeds om de kern en bij de isolatoren kan men rustig aannemen dat ze de omgeving van die kern nóóit verlaten;

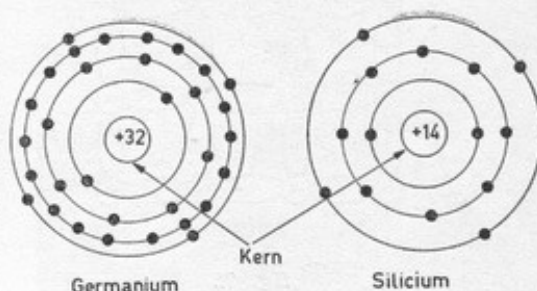


fig. 70

Symbolische voorstelling van de elementen germanium en silicium, waarbij hun totaal aantal elektronen (en dus ook de protonen) in de kern staat aangegeven

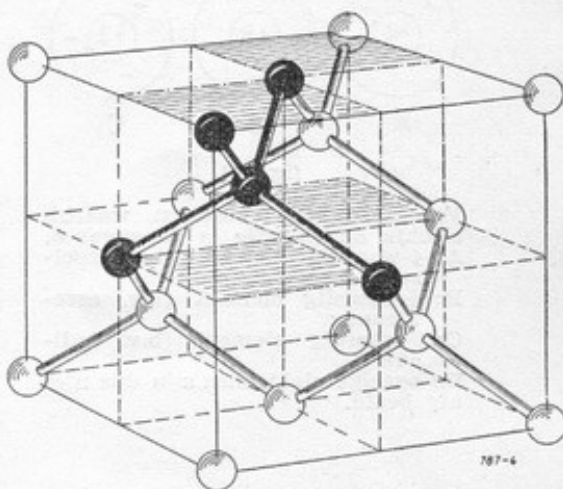
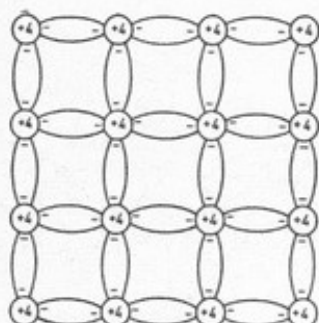


fig. 71

Hier zien we, hoe vierwaardige koolstofatomen gerangschikt zijn. Elk bolletje stelt een atoomkern voor; elk verbindingsbuisje stelt de baan van 2 elektronen voor. Elk bolletje steekt n.l. 4 grijparmpjes uit, maar de omringende bolletjes steken óók 4 grijparmpjes uit. We kunnen 't dus ook zó zeggen: elk bolletje steekt 4 armpjes uit maar wordt tevens door 4 armpjes van de omringende bolletjes gegrepen. We noemen een dergelijke structuur een *kristalrooster*; het bovenstaande kristalrooster is van één zeer bepaalde koolstofvorm, n.l. de diamant die n.b. een goede isolator is! Wel een bewijs, van hoeveel invloed die kristalstructuur is, want we kennen koolstof immers als een geleider. Maar hier is dus een uitzonderingsvorm



ZUIVER

fig. 72

„Platgedrukte” voorstelling van de atoomstructuur van een 4-waardig element, b.v. koolstof. De cirkeltjes geven de kern weer, de kromme lijntjes stellen de z.g. valentiebindingen voor; het zijn dus de „grijp-elektronen”. De overige elektronen spelen géén rol en zijn niet afgebeeld

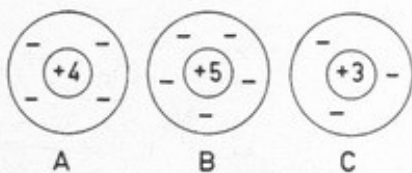


fig. 73

Vereenvoudigde symbolen, waarbij slechts de valentie is aangegeven.
A: 4-waardig element (b.v. koolstof of germanium);
B: 5-waardig element (b.v. arsenicum);
C: 3-waardig element (b.v. indium).
De overige elektronen zijn dus niet afgebeeld.

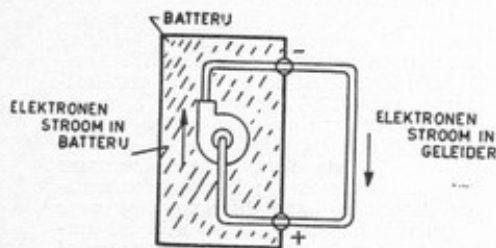


fig. 74

dit geldt zowel voor de elektronen op de incomplete buitenste ring als voor die op de binnenste complete ringen. Bij geleiders is dat heel anders: daar kan een der elektronen uit de buitenste (incomplete) ring gerust eens bij een andere atoomkern op bezoek gaan, waardoor de éne kern dus één of meer elektronen verliest en de andere kern er een paar bij krijgt. Doch nogmaals: de elektronen op de complete binnenringen zijn honkvast en zijn niet in staat om stuivertje te wisselen. Van geleiders zegt men nu, dat ze vrije elektronen bezitten. Verliest een element nu zijn karakter, of nog scherper gezegd, wordt het nu een ander element, wanneer er een paar elektronen tijdelijk afgedwaald zijn? Neen hoor; we mogen nl. nooit vergeten dat in de kern het aantal tegenspelers, de protonen, niet verandert. Bij de beschouwing van de gedragingen van atomen onderling, of het nu is tussen soortgenoten of tussen atomen van andere elementen, moeten we ons realiseren, dat alléén de elektronen op de niet-complete buitenste ring een rol spelen; de elektronen op complete binnenringen zijn in het inter-atomaire verkeer slechts figuranten, die verder geheel buiten beschouwing gelaten zullen worden.

Een atoom, dat nu enige elektronen kwijt is noemt men een ion, een positief ion, terwijl, wanneer er enige vreemde elektronen op bezoek zijn, men van een negatief ion spreekt; in beide gevallen is het atoom geïoniseerd.

Het rondspringen van die vrije elektronen is systeemloos; de onderlinge ruimte tussen de atoomkernen is heel groot zodat elke stof, zelfs ijzer, in feite net een krentenbrood is: de krenten zijn de kernen en het brood is de massa wentelende elektronen, die we het elektronengas noemen. In elke stof zitten miljoenen en nog eens miljoenen elektronen; bij geleiders is het aantal vrije elektronen ook zeer groot. Toch verschilt het aantal bij verschillende stoffen en het resultaat zien we in de weerstandsverschillen tussen de geleiders onderling. Overigens kunnen we aan de bewegingen van elektronen wel een richting geven; door een z.g. potentiaalverschil te veroorzaken of zoals we zeggen, een spanningsverschil te veroorzaken aan de einden van een geleider door er een batterij op aan te sluiten bereiken we, dat de positieve klem een aantrekkingskracht op de negatief geladen elektronen uitoefent; uit de geleider treden ze in de spanningsbron. Aan de min-klem van de batterij heerste een elektronenoverschot, dat maar al te graag in het geleidermateriaal treedt. Want dat heeft door het vertrek van de elektronen naar de +klem zelf zo langzamerhand een positieve lading gekregen (= gebrek aan elektronen). En dit gebeuren noemt men een elektrische stroom.

Nu zal er toch wel een grote nieuwsgierigheid ontstaan zijn over het probleem: hoe krijgen we in de spanningsbron die elektronen nu zover, dat ze van de plus-klem naar de min-klem lopen en blijven lopen? Nu, we zagen reeds in de eerste les dat die elektronen in de spanningsbron een „lift” krijgen, door scheikundige werking of door mechanische kracht. We zullen hier niet ver op in kunnen gaan; laten we ons maar met een watervoorbeeld vergenoegen en aannemen, dat in de spanningsbron de elektronen naar een hoger niveau worden gebracht, met een pomp of zo, vanwaar ze weer naar beneden kunnen stromen.

Gelukkig gaat ook in andere opzichten deze vergelijking op:

wanneer die elektronen „boven” zijn hebben ze weer de kracht gekregen om naar beneden te vallen, net als 't water. De elektronen „boven” bezitten een behoorlijk arbeidsvermogen; die beneden zijn futloos en bezitten dus weinig arbeidsvermogen. Het „hoogte-verschil” kunnen we dan potentiaal-verschil noemen, ofschoon we er zo dagelijks „spanning” tegen zeggen.

Wanneer we bovenstaande kwestie goed begrijpen kunnen we doorgaan; wie het nog niet helemaal doorheeft moet alles nog eens goed nalezen, want we beginnen nu aan de halfgeleiders en dan denken we aan de elementen germanium, silicium, arsenicum, radium, gallium, om de voornaamste te noemen. Om te beginnen zullen we uitgaan van volkomen zuivere materialen, die dus uitsluitend één element bevatten. Nu, in werkelijkheid komen die nooit of te nimmer in de natuur voor. Maar men is in het proces van de zuivering, raffinage, al ver gevorderd en neem nu maar aan dat we werkelijk een brokje zuiver germanium voor onze neus hebben liggen, om nu maar de voornaamste halfgeleider te noemen.

Nu, het is een isolator met een vrij behoorlijke diëlektrische constante, nl. 16. Terwijl het 32 elektronen bevat is het 4-waardig, m.a.w. op de buitenring zitten 4 elektronen; de overige 28 laten we dus maar weer buiten beschouwing. Als 4-waardig element ziet het er dus precies eender uit als b.v. het reeds genoemde koolstofelement; we zagen reeds de „platgedrukte” kristalopbouw van enige gewone atomen. Toch is germanium lang geen gewone isolator; verontreinigen we het nl. met een 5-waardige stof, bijvoorbeeld arsenicum, dat 5-waardig en op zichzelf óók een isolator is, dan zal zo'n enkel arsenicum-atoom rustig een verbinding met een 4-tal germanium-atomen aan kunnen gaan. Maar... arsenicum is 5-waardig en er blijft dus één elektron over.

Voorwaarde voor dit verschijnsel is, dat er zich maar één arsenicum-atoom bevindt op elke 10.000.000 germanium-atomen. Nu, men ziet inderdaad kans dit mengsel naar behoren te mengen. En aangezien er miljarden atomen in een kubieke centimeter gaan, zullen er in dat mengsel nog ettelijke vrije elektronen rondzwaken. Germanium, dat aldus „verontreinigd” is met arsenicum, zoals men het noemt, is dus een geleider geworden, en wanneer we op de einden van een blokje of draad van dit materiaal een batterij aansluiten, zal er een stroom lopen. Geen grote, want in feite is 't ook niet zo'n erge beste geleider.

Men noemt de aldus toegevoegde elektronen surplus-elektronen, en hierin wijkt het germanium dan ook af van een gewone geleider: daarin heeft nl. dat éne atoom een elektron tekort en het andere teveel, maar in totaal zijn er toch evenveel elektronen als protonen. Bij germanium heeft geen enkel atoom een tekort aan elektronen, maar samen hebben ze een teveel, dank zij de arsenicum-atomen, die men hier donors noemt (= afgevers). Het op deze wijze verkregen germanium noemt men N-materiaal, waarin de aantallen protonen en elektronen niet meer kloppen: er zijn elektronen te veel.

Germanium kan echter ook op een andere manier verontreinigd worden, nl. met een 3-waardig element, b.v. indium, ook weer in dezelfde dosering als bij arsenicum. Ook dit atoom nestelt zich onopvallend tussen de germanium-atomen, maar hier komt men plaatselijk een elektron tekort. Zo'n ontbrekende elektron noemt men een „gat” en daar er massa's gaten zijn treedt hier ook een merkwaardige toestand op.

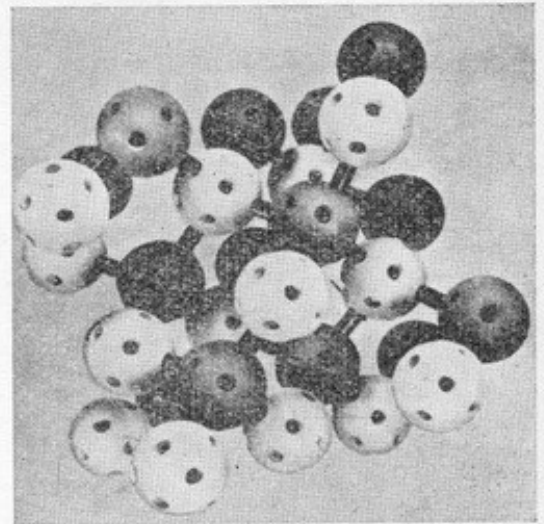


fig. 75

Atoomstructuur van een germanium kristal; de „putjes” zijn de valentie elektronen

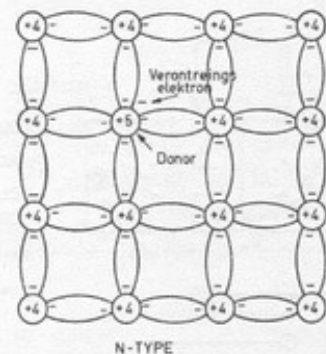


fig. 76

Germanium atomen, verontreinigd met een 5-waardig element, b.v. arsenicum (= de donor). De kromme lijntjes zijn de valentie-elektronen-bindingen

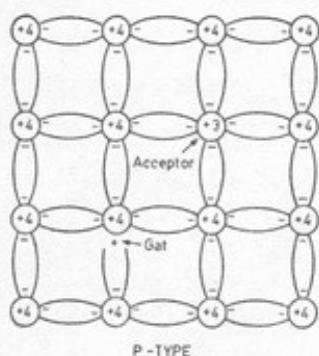


fig. 77

Germaniumatomen, verontreinigd met een 3-waardig element, b.v. indium (= de acceptor)

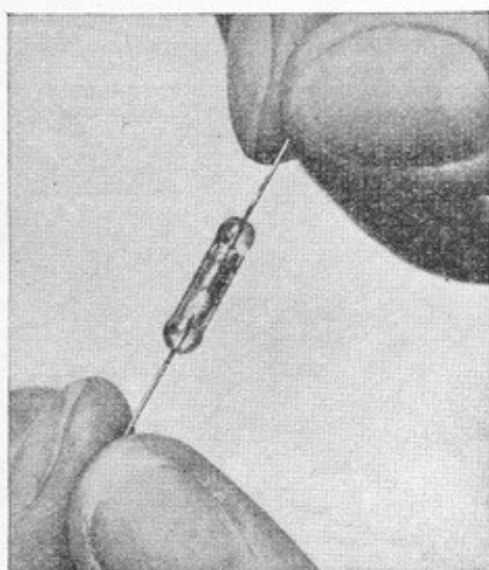


fig. 78

Germanium- of kristaldiode (foto Telefunken)

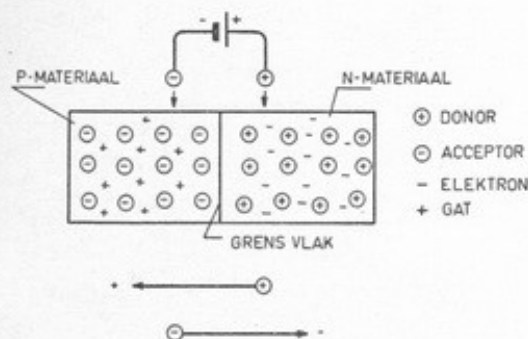


fig. 79

Samenvoeging van p- en n-materiaal: de acceptor in het p-materiaal stoten de elektronen in 't N-materiaal van zich af en de donors in 't N-materiaal stoten de gaten in 't p-materiaal eveneens van zich af

Want nu blijkt germanium een geleider geworden te zijn; dat is met een batterijtje en een milli-ampèremeter te bewijzen. Kijk, bij dit soort geleiding gaat 't zo: de +klem van de batterij heeft een elektronentekort en de min-klem een overschot. Dat is normaal. En normale geleiders trekken de elektronen door de geleider van de min-klem naar de plus-klem. Welnu, in dit germaniummateriaal met gaten, dat men P-materiaal noemt, reizen de gaten in de geleiders van de plus-klem naar de min-klem.

Komt nu zo'n gat aan de min-klem, dan zal het daar een elektron ontmoeten, de z.g. recombinatie treedt op, het gat is verdwenen en het elektron eveneens. Maar terwijl dit gat verdwijnt, zal er in de geleider aan de plus-klem een elektron in de batterij treden, terwijl dat elektron een gat hulpbehoevend en eenzaam achterlaat. Geen nood, het karakter van een gat is positief (gebrek aan elektronen) en het gat wordt door de (negatieve) min-klem van de batterij aangetrokken. Daar deze geschiedenis zich steeds herhaalt, loopt er dus een gatenstroom in het P-materiaal van de plus-klem naar de min-klem. De batterij merkt van dit alles niets: in de batterij lopen er zoals altijd elektronen van de plus-klem naar de min-klem en daarom beschouwen we die gatenstroom maar als normaal. Toch moeten we even aan 't idee wennen. De verontreinigende atomen noemen we de acceptors = aannemers. Door hun aanwezigheid is het aantal protonen niet meer gelijk aan 't aantal elektronen; er is nu namelijk een tekort aan elektronen, reden waarom we het P (pos) materiaal noemen.

Om nu te onthouden hoe 't precies zit moeten we naar de n van donors en de p van acceptors kijken: donors zitten in negatief (n) en acceptors in positief (p) materiaal.

Inplaats van germanium hadden we ook een silicium kunnen nemen, inplaats van arsenicum ook antimonium, en als acceptor ook wel aluminium, gallium of borium (boor).

Dit zijn dus halfgeleiders, die aldus de eigenschappen van normale geleiders hebben verkregen.

HALFGELEIDER DIODEN

Een moderne toepassing vinden we nu in de samenvoeging van een stukje P-materiaal met een stukje N-materiaal. Een dergelijke samenvoeging (eng.: junction) vormt nl. een gelijkrichter en is bekend onder de naam: kristaldiode (OA50 enz.).

Op de tekening zien we die samenvoeging.

Zullen nu de overschot-elektronen (excess-elektronen) uit het N-materiaal nu direct naar de gaten (holes) in 't P-materiaal vliegen, waardoor er geen P- en geen N-materiaal meer zou bestaan?

Nu, een enkele zal 't misschien wel lukken, als hij wat opgejut is door warmte, licht of een andere energiebron, maar verder volstrekt niet.

En nu komt 't sleutelgeheim van de transistorwerking: in feite vormt namelijk de samenvoeging, de junction als het ware een galvanisch elementje, weliswaar met een geringe spanning, maar die spanning is toch voldoende om elke beweging van gaten of elektronen te verhinderen. Het wonderlijke is nu, dat het N-materiaal de plus-klem vormt en het P-materiaal de min-klem. Om dit nu te doorgronden moeten we achtereenvolgens de laagjes P- en N-materiaal, resp.

links en rechts van de scheidingslijn beschouwen.

Rechts, in het gehele gebied van de donors is een zeker elektronenovervloed; deze elektronen verdelen zich over het materiaalgebied rechts van het grensvlak. De donors, die zoals we weten 5-waardig zijn, bergen in hun kern echter nog een 5e proton, dat niet langer door een elektron in evenwicht gehouden is, want zoals we weten spelen die elektronen „ergens” ver van die kern af en hoe verder ze ervan af zijn, des te sterker domineert het positieve karakter van de kern.

In het linker gebied, het P-gebied, ontmoeten we het tegengestelde. Hier vinden we de acceptors, die als 3-waardige atomen een elektron en een proton minder bezitten dan de hun omgevende germanium-atomen. Om in de valentie-binding met hun 3-waardige burens niet te kort te schieten reiken de germanium-atomen de acceptor een elektron dat hem niet toekwam; het resultaat is dat nu „ergens” een gat ontstaan is. Is dat „ergens” nu maar vlak bij de acceptor, dan zijn de 3 protonen in de acceptorkern in evenwicht met de 3 elektronen. Maar vooral op dat scheidingsvlak spelen die „gaten” weer ver van huis en als gevolg daarvan zal het feit, dat de acceptor een proton te kort heeft, aan het P-materiaal links langs het grensvlak een negatief karakter geven. 't Klinkt misschien wel even vreemd, maar een protonen-tekort is hetzelfde als een elektronen-overschot. 't Wonderlijk eis dus dat N-materiaal met een elektronen-overschot uiteindelijk een positief karakter heeft en het P-materiaal met een elektronentekort, dus met „gaten” een negatief karakter heeft. Maar nogmaals, dat komt van de donors, resp. de acceptors.

We tekenen dat interne elementje gestippeld naast het N- en P-materiaal, ofschoon het zich natuurlijk onzichtbaar op het grensvlak bevindt. Ook stellen we deze slagboom wel eens voor als een „spanningsheuvel” tussen het N- en het P-materiaal voor.

Elektronen van links zouden heus wel naar rechts willen lopen, maar links hebben we al een elektronentekort; evenzo zouden er heus wel „gaten” van rechts naar links willen lopen, maar ze zijn daar niet, want er is daar immers een elektronenoverschot. Het enige wat er gebeurt is dit: de neg. acceptors links duwen de overschot-elektronen rechts nòg meer naar rechts en de pos. donors rechts duwen de pos. gaten links nòg meer naar links.

Het bovenstaande is niet gemakkelijk te begrijpen; hebben we het echter aangenomen, dan is 't niet zo moeilijk in te zien, dat er geen stroom zal lopen als we een uitwendige batterij verbinden met dit materiaal; kijk maar eens even wat er gebeurt: er loopt geen stroom. Ook hier niet; integendeel, we verhogen de scheidings-slagboom en de gaten gaan nòg meer naar links en de elektronen nòg meer naar rechts. Nu gaan we de polariteit van de batterij omdraaien; de plusklem aan 't P-materiaal links en de min-klem aan 't N-materiaal rechts.

Nu hangt het helemaal van de batterijspanning af wat er gebeurt: is die spanning even hoog als die van 't denkbeeldige P-N-elementje, nu, dan gebeurt er zeker niets. Want vergeet niet dat beide materialen op zichzelf een hoge weerstand hebben (zie de figuren op de volgende pagina).

Maar maken we de batterijspanning hoger, tot minstens 2 volt bijvoorbeeld, dan is het met de macht van de acceptors en

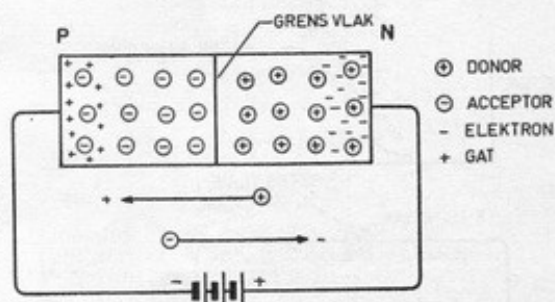


fig. 80

Door de aanwezigheid van de aldus „tegen” geschakelde batterij zal de afstoting nòg groter worden. Er kan dus géén stroom lopen

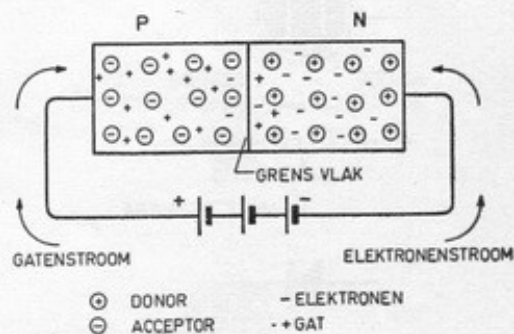
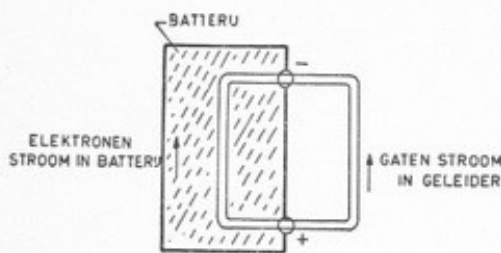


fig. 81

De batterij is thans „mee” geschakeld; de invloed van het inwendige batterijtje is overwonnen en er kan een stroom lopen



De stroomloop in p-materiaal: de gatenstroom

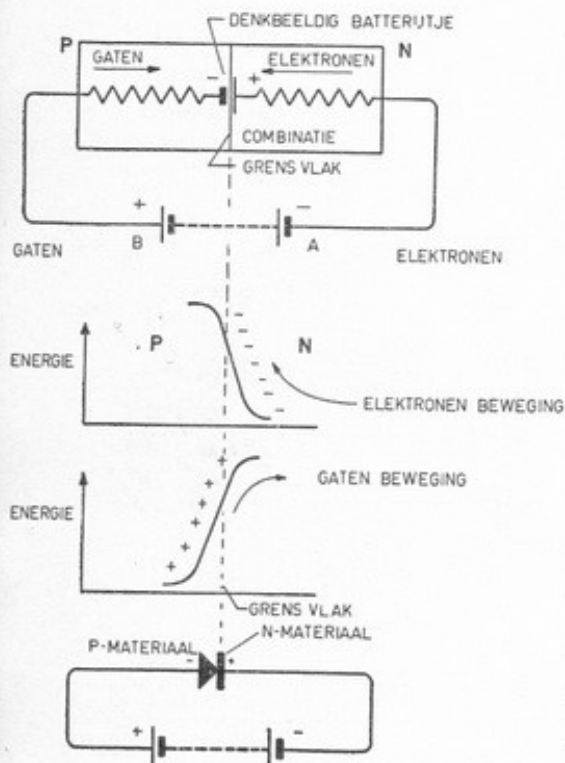


fig. 82

In de bovenste figuur zien we de inwendige weerstand van de halfgeleiders voorgesteld door de bekende zigzag-lijn. Daaronder zien we, hoe de „spanningsheuvels” overwonnen worden door de uitwendige batterij

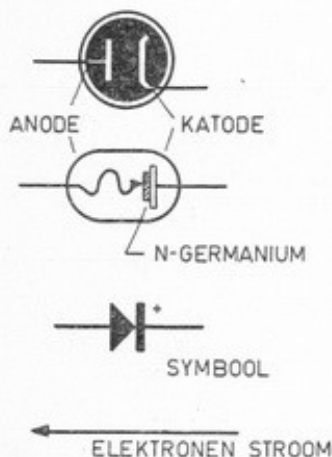


fig. 83

Punt-contact germanium diode

donors gedaan, het materiaal laat elektronen door en is een geleider, zij het dan met een vrij hoge soortelijke weerstand. We zeggen nu: de P-N-samenvoeging, de junction is geleidend. Nu, we weten wel hoe we een ding noemen, dat in één richting stroom wel doorlaat en in de andere niet. Dat is een gelijkrichter. En de junction is geleidend geworden onder de invloed van een uitwendige batterij, dus: een elektrisch veld. De scheidingsbarrière is dus geslecht.

Nu moeten we even de stroomloop in de doorlaatrichting op de voet volgen:

De positieve batterij-klem drijft de gaten naar het N-gebied, terwijl de negatieve batterij-klem de elektronen dwingt in het P-gebied te dringen. Op het grensvlak verenigen de elektronen en gaten zich, combineren ze, zoals we dat noemen. Maar voor elke combinatie die daar plaats vindt, voltrekt zich een scheiding bij de plus-klem van de batterij en het vrijgemaakte elektron treedt in de batterij; het daarvoor vrijgekomen gat begeeft zich naar het N-gebied.

Omgekeerd treedt een elektron bij de min-klem uit de batterij en begeeft zich in de richting van het P-gebied.

De totale stroom nu, die door het kristal stroomt, is samengesteld uit: een elektronen-stroom in het N-gebied, een gatenstroom in het P-gebied en een combinatie van elektronen en gaten in de omgeving van het grensvlak.

Wanneer we dus een batterij zodanig schakelen dat de junction geleidend geworden is, dan wordt de „spanningsheuvel” als het ware lager gemaakt, ja zelfs geheel weggenomen door de aanwezigheid van die batterij.

Gebleken is dat die junction óók geleidend wordt door bestraling met zonlicht (de z.g. fototransistor) en ook wel door verwarming. In beide gevallen wordt er energie uit het heelal aan toegevoegd.

En dat junction-batterijtje, dat gevormd wordt door de P-N-junction, kan dat stroom leveren? Neen, bij kamertemperatuur niet. Maar bij verhitting of belichting wel; hierop berusten de onlangs uitgevonden Solar-batterijen, die zonlicht in elektrische stroom omzetten. De gelijkrichtende werking die reeds lang bekend was, wordt hiermede verklaard. We kennen als nieuwste ontwikkeling de z.g. germaniumdiode, waarbij een draadje van een gouddraad op N-materiaal rust. Door de plaats van samenkomst te formeren, zoals men dat noemt, ontstaat onder het draadje een geringe hoeveelheid P-materiaal; gaat men uit van P-materiaal dan ontstaat daar N-materiaal, in beide gevallen vindt gelijkrichting plaats.

DE TRANSISTOR

De transistor nu is in feite niets anders dan twee gelijkrichters, die met hun ruggen of gezichten tegen elkaar geplaatst zijn; wij krijgen dan P-N-P of N-P-N. In ieder geval is het plaatje in 't midden zéér dun, liefst niet dikker dan één atoom. Moeilijk te maken, maar men staat tegenwoordig voor niets. Laat ons eens uitgaan van een P-N-P transistor. We plaatsen over de linker diode een batterij, zodanig dat er stroom loopt, dus in de doorlaat-richting. Dit is dus normaal. Verhogen of verlagen van de batterij-spanning doet de stroom hoger of lager worden. We breken de zaak af en gaan de rechter diode in de z.g. sper-richting op een batterij aansluiten. Net wat te verwachten was: er loopt géén stroom. En al maken we de spanning hoger, er loopt géén stroom.

Nu laten we deze schakeling bestaan en sluiten de linker diode weer op de oorspronkelijke manier aan.

Kijk, nu wordt 't interessant. Maar wat gebeurt er nu precies in het middenstukje, in het P-materiaal? De elektronenstroom, afkomstig van de negatieve batterijklem A heeft de „spannings-heuvel” in het N-materiaal glansrijk overwonnen en stort met kracht in het P-materiaal; het was immers een diode in doorlaatrichting, die wanneer men maar een behoorlijke voorspanning geeft, geen tegenstand meer biedt. In feite heeft deze zijde van de transistor dus een lage weerstand.

Bezien we nu de rechter diode, dan zouden we, omdat die in de „sper”-richting geschakeld is, geen stroom mogen verwachten. Enige pagina's terug lasen we namelijk, dat er geen elektronenstroom van P naar N loopt, eenvoudig omdat er geen elektronen beschikbaar zijn in 't P-materiaal. Nu die echter door de linker diode via het N-materiaal in het P-materiaal gebracht zijn, is er geen enkele hindernis meer; de elektronen glijden als het ware de spanningsheuvel af van het P-gebied in het N-gebied.

Resumerend kunnen we zeggen: de elektronen gaan rustig van de linker min-klem A via het N-materiaal, het P-materiaal en het N-materiaal in de plus-klem (B) van de rechter batterij lopen en het lijkt zelfs wel of de verbinding van het P-materiaal naar het verbindingpunt tussen beide batterijen helemaal niet nodig is; de aanwezigheid van elektronen in het P-materiaal lijkt wel de schakeling veranderd te hebben in twee diodes in doorlaatrichting.

Toch is dat niet helemaal waar: er loopt nog een klein stroompje van het P-materiaal naar punt C en wanneer we de stromen in de meters controleren, zullen we zien dat de stroom door meter A gelijk is aan die door meter B en door meter C tezamen.

En hoe ontstaat nu het verschil in stroom door meter A en Meter B? Wel, dit is min of meer een kwestie van „de weg van de minste weerstand”. Wanneer de Rijn bij Pannerden ons land binnenkomt, ja dan biedt de rechter rivierarm meer weerstand dan de linker; het resultaat is dat de „Waal” het meeste water ontvangt en de Rijn langs Arnhem het minste (de IJssel buiten beschouwing gelaten). Bovendien ontmoet een enkel elektron nog wel eens een „gat” en dan combineren ze, zogezegd.

Nu zullen we eerst eens namen gaan geven aan de tot nu gebruikte materialen: het linker N-materiaal noemen we de „emitter” (eng.: uitzender), het P-materiaal: de „basis” en het rechter N-materiaal: de collector (= opvanger). Die stroom door de collector is dus kleiner dan die door de emitter, maar waarom? Niet door de hoge weerstand van de collector, maar eenvoudig, omdat er niet meer elektronen in de basis beschikbaar zijn, want de emitter is immers het orgaan dat de grootte van de stroom bepaalt. Met andere woorden, of we de collector-batterij (de rechter) nu een hoge of een lage spanning geven, dat doet er praktisch niets toe. Dit is een heel belangrijk feit.

Wanneer we namelijk de transistor, in dit geval een N-P-N transistor gaan bezigen om te versterken, schakelen we de transistor min of meer op dezelfde manier als een buis; voor 't gemak stellen we het even zó voor, dat in serie met de emitterbatterij (links) een wisselstroom-generator (die het input-signaal levert) geschakeld is. Wanneer we nu, weer in

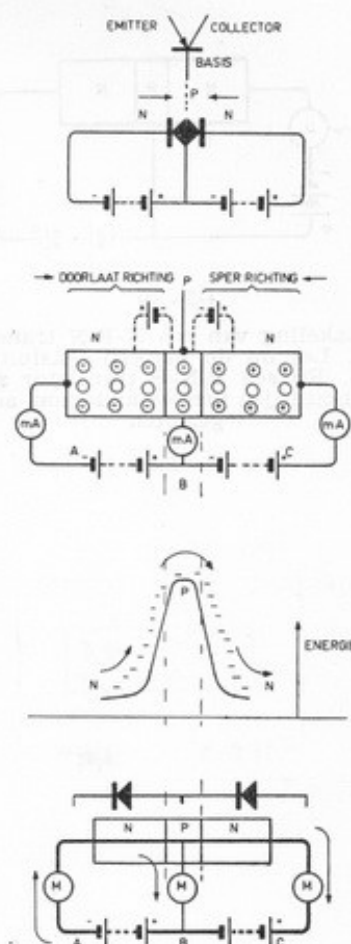


fig. 84

Doordat er in de linker N-P-junction stroom loopt, wordt de rechter P-N-junction geleidend, waardoor het lijkt dat de rechter diode zich heeft „omgedraaid”. De **hoofd**-stroom loop van A naar N-P-N naar C, door de batterij via B naar A. Een **kleine** stroom takt zich af bij P en loopt via B door de batterij naar A.

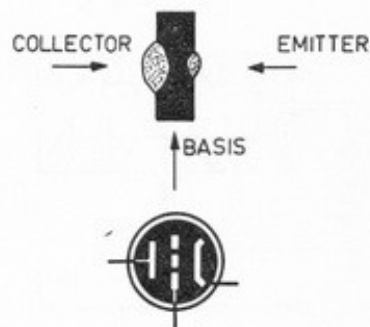


fig. 85

De transistor, vergeleken met een triode-buis

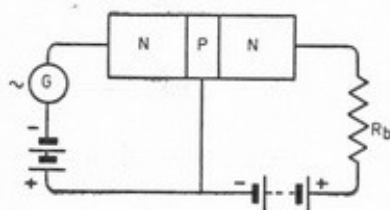


fig. 86

Schakeling van een N-P-N transistor. Let op de batterij-aansluitingen. Bij een P-N-P transistor zijn de batterijen precies andersom aangesloten

overeenkomst met de buizen, in de collectorleiding een belastingsweerstand R_b opnemen, dan is de zaak compleet. De door generator G geleverde stroom beïnvloedt de emitterstroom en in de collectorstroom vinden we die stroom terug. Versterkt? Helaas moeten we zeggen: neen. De collectorstroom is steeds kleiner dan de emitterstroom. Indien we dus van stroomversterking zouden mogen spreken, zou die minder dan één bedragen; we noemen die stroomversterking α (alfa); meestal is $\alpha = 0,9$. Aan een dergelijke versterker hebben we niet veel. Maar, omdat de lagere collectorstroom niet het gevolg is van de een of andere hoge inwendige weerstand maar door elektronengebrek, mogen we gerust een véél hogere R_a toepassen en om spanningverlies in R_a te ontgaan, een veel hogere collectorspanning toepassen.

Neem nu maar eens even aan, dat de ingangsweerstand R_i van onze transistor 500Ω is en de R_a is 1000000Ω , dan zien we direct, dat hier van een grote versterking tengevolge van de hogere weerstand sprake is.

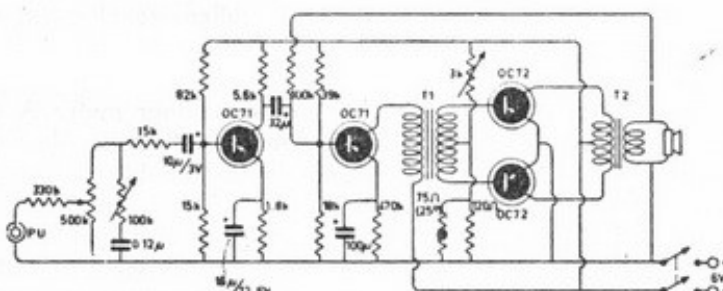
De spanningsversterking is dan nl.

$$\alpha \times \frac{R_a}{R_i} \text{ of } 0,9 \times \frac{1000000}{500} = 1800.$$

Deze versterking is dan uitsluitend het gevolg van de versterking door het weerstandsverschil tussen R_a en R_i , we noemen het de weerstand-versterking, die niet verward mag worden met het begrip „weerstand-versterking” in de buizentechniek.

fig. 87

Grammofoonversterker met 4 transistoren



In de praktijk zal men, evenals bij een buis, aan de input-zijde van een transistor een wisselspanning willen aanvoeren, om die aan de output-zijde weer versterkt af te voeren. Er is echter een opvallend verschil met buizen: de ingangsimpedantie van een buis is hoog; die van een transistor is heel laag. Met de uitgangsimpedantie is er niet zoveel verschil. Als gevolg van de hoge ingangsimpedantie wordt het input-sigitaal bij een buis nagenoeg niet belast; de lage ingangsimpedantie van een transistor belast wel degelijk het input-sigitaal; daarom past men vaak inplaats van de schakeling met weerstanden een schakeling met ingangs- en uitgangstransformatoren toe en spreekt men bij transistoren liever over stroom- of vermogensversterking dan over spanningsversterking. In de figuur zien we het schema van een transistorversterker; de beide eerste transistoren zijn met weerstanden en condensatoren gekoppeld; de beide laatste, in balans geschakelde, zijn met transformatoren gekoppeld.

Nu moeten we nog even een transistor, samengesteld uit P-N-P-materiaal bezien; in feite komen deze veel meer voor dan N-P-N transistoren. Om te beginnen: ook hierbij spreekt

men van een emitter, basis en collector. De batterijen schakelt men precies andersom. Bij N-P-N transistoren is er sprake van een elektronenstroom. Welnu, het gehele verhaal daarover geldt volkomen voor de P-N-P transistor, mits men het woord „elektron” maar vervangt door „gat”. En zoals we weten lopen gaten van de plus-klem van een batterij naar de min-klem.

Denk er maar niet te lang over na; ook ik vind het maar raar om aan te wennen, maar alles went. En verder zijn alle eigenschappen gelijk aan die van de N-P-N transistoren.

Wat gelden er nu voor bezwaren aan transistoren? Nu, de afstanden die de elektronen in het materiaal moeten afleggen zijn lang; men spreekt van lange looptijden. En die maken dat voor hoge frequenties de transistor nog geen gemeengoed is geworden. Voor laagfrequent toepassingen is hij echter reeds een gewild artikel. Het grote bezwaar is de verwarming, die door de stroomdoorgang of omgevingstemperaturen veroorzaakt wordt. We moeten nl. een transistor evenals een buis in zijn gunstigste werkpunt instellen en die instelling wordt door de stroomdoorgang weer verstoord. Dit geldt vooral voor eind-transistoren. We zullen dat in de volgende lessen zien.

Verder moeten we nog een enkel woord over de voorganger van deze transistor, de puntcontact-transistor, zeggen. Hierbij nam men of een blokje P- of N-materiaal en bracht daar, vlak bij elkaar, 2 dunne bronzen spitse veertjes aan. Het blokje was de basis, het ene stiftje de emitter, het andere de collector. Door éven een precies uitgekende (te grote) stroom door één der beide veertjes te sturen, verkreeg men een zeer kleine junction; we noemen deze handeling „formeren”.

Bij de toepassing veroorzaakt de emitterstroom door dat kleine oppervlakje een sterk elektrisch veld, wat ook weer de „spanningsheuvel” moest overwinnen. Verder hebben we ook hier weer te maken met een gatenstroom of een elektronenstroom, afhankelijk van het gebruikte basis-materiaal.

De puntcontact-transistor lijkt nu reeds uit de geschiedenis verdwenen te zijn, er was een te hoge spanning voor nodig: circa 20 volt, tegen 6 volt voor de junction-transistor. Bovendien zijn ze teer.

De hier beschreven transistor noemt men de laag-transistor (layer); verder ontwikkelt men thans een tetrode transistor en de fototransistor, die geen emitter bezit, doch waarin lichtstralen (z.g. Photons) de „spanningsheuvel” overwinnen.

Tenslotte noemen we nog de mogelijkheden om een transistor te schakelen: de geaarde basisschakeling, de geaarde emitterschakeling en de geaarde collectorschakeling.

De geaarde emitterschakeling benadert het meest de normale buisschakeling; de ingangsimpedantie is dan hoger dan tot dusver verteld werd, terwijl helaas de uitgangsimpedantie veel kleiner wordt.

Groter stroomversterking α' (= alfa accent) is mogelijk; de weerstandversterking wordt kleiner. De geaarde collectorschakeling lijkt op onze katode-volger: heel hoge ingangsimpedantie, lage uitgangsimpedantie, versterking kleiner dan 1. En de geaarde basis-schakeling die we het eerst bespraken, lijkt op de geaarde roosterschakeling.

Over de toepassing van deze transistoren zullen we in de volgende lessen terugkomen.

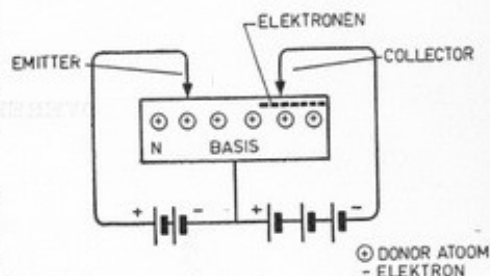


fig. 88

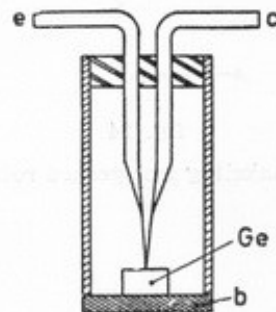


fig. 89

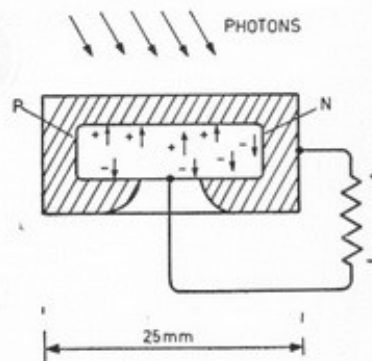


fig. 90

De Solar batterij: onder de invloed van zonlicht wordt een stroom opgewekt

SCHAKEL-MOGELIJKHEDEN VOOR TRANSISTOREN

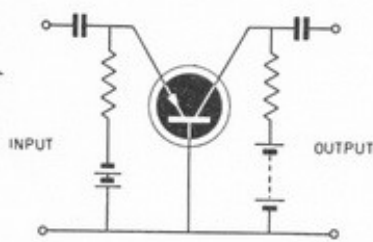


fig. 91

Geaarde basisschakeling
lage ingangsimpedantie
hoge uitgangsimpedantie

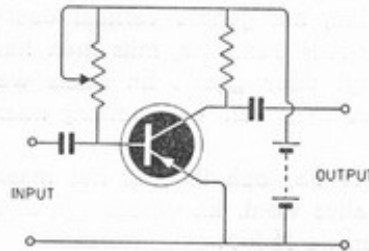


fig. 92

Geaarde emitterschakeling

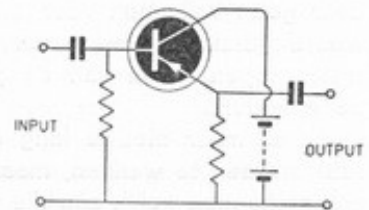


fig. 93

Geaarde collectorschakeling
hoge ingangsimpedantie
lage uitgangsimpedantie

OVEREENKOMSTIGE BUIS-SCHAKELINGEN

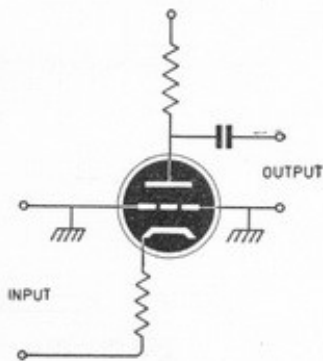


fig. 94

Schakeling met geaard rooster

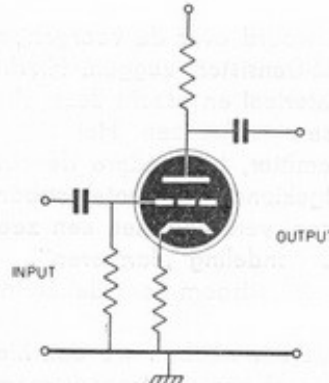


fig. 95

Normale buisschakeling

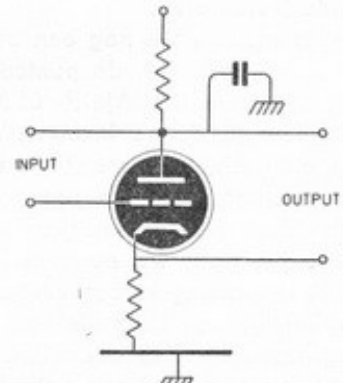


fig. 96

Katodevolgerschakeling

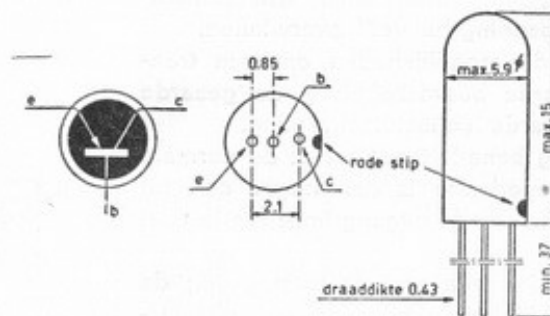


fig. 97

Uitvoeringsvorm en aansluitschema van
Philips transistoren OC12, 13, enz.

VRAAGSTUKKEN BIJ DE VIJFDE LES

1. Wat verstaan we onder emissie van elektronen?
2. Wat is een karakteristieke eigenschap van een diode en wat zegt die naam ons?
3. Op welke manieren kunnen we de elektronenstroom in een diode beïnvloeden?
4. Wat is een indirect verhitte katode?
5. Welk gevaar ontstaat wanneer we het rooster van een buis positief maken t.o.v. de katode?
6. Wat is de roosterruimte en door welke beide grenzen wordt deze bepaald?
7. Verklaar eens het begrip steilheid.
8. Wat is hte begrip versterkingsfactor?
9. Als we over de inwendige weerstand van een buis spreken, wat bedoelen we dan?
10. Aan welke eis moet de uitwendige (belastings)weerstand bij een triode voldoen van de grootst mogelijke output te leveren?
11. Kan het gehele gelijkstroomvermogen, dat een eindbuis als voeding uit het voedingsapparaat verkrijgt, in wisselstroom output worden omgezet?
12. Kunnen we bij buizen met groot anodestroomverbruik zonder bezwaar een koppelweerstand toepassen?
13. Wordt bij de transistorfabricage gebruik gemaakt van zuivere materialen?
14. Wat is een donor en wat is een acceptor?
15. Vertel of er bij een geaarde basisschakeling stroom door de collector kan lopen, wanneer de emitterstroom op nul gebracht wordt.
16. Kan de collectorstroom groter zijn dan de basisstroom?
17. Hoe is in 't algemeen de ingangsimpedantie van een transistor, vergeleken met die van een radiobuis?
18. Wanneer we weten, dat de collector-stroomvariaties steeds kleiner zullen zijn dan de emitter-stroomvariaties bij een geaarde basis-schakeling, hoe verklaren we dan de uiteindelijke versterking van een transistor?
19. Verklaar de werking van een N-P-N transistor; teken het schema.
20. Vertel welk verschil er is tussen een normale geleider en een halfgeleider.

