HANDLEIDING TEN BEHOEVE
VAN DE OPLEIDING VOOR
V.E.V.-EXAMENS

DEEL X

THEORIE DER ELEKTRONICA

VERENIGING TOT BEVORDERING
VAN ELECTROTECHNISCH VAK-
ONDERWIJS IN NEDERLAND

Handleiding ten behoeve
van de opleiding voor V.E.V.-examens

Deel X

Theorie der Elektronica

Tweede druk

Uitgave van de Vereniging tot
bevordering van Electrotechnisch
Vakonderwijs in Nederland

Vereniging tot bevordering van Electrotechnisch Vakonderwijs in Nederland (V.E.V.)

Het doel der V.E.V. is het bevorderen van de theoretische en praktische ontwikkeling van personen, werkzaam in het elektrotechnische vak, door: het inrichten van leerlingstelsels volgens titel II van de Nijverheidsonderwijswet, het organiseren van cursussen, het afnemen van examens, het uitgeven van handleidingen enz.
Cursussen, die opleiden voor één of meer der V.E.V.-diploma's, kunnen door de V.E.V. worden erkend, waardoor deze cursussen tegen zekere voorwaarden bepaalde rechten worden toegekend.
De V.E.V. is officieel betrokken bij de verlening van vestigingsvergunningen in de elektrotechnische branche en heeft zich op verzoek van de belanghebbende organisaties met de vakopleiding te haren behoeve belast.
Voorts is de V.E.V. als advieslichaam voor alle zaken, het elektrotechnische vakonderwijs betreffend, opgenomen in de organisatie der Vereniging ter Veredeling van het Ambacht (V.V.A.), het orgaan door de regering aangewezen voor het afnemen van vakexamens onder Rijkstoezicht.

Aanmelding voor de examens, verzoeken om inlichtingen betreffende erkende V.E.V.-cursussen, vakopleidingszaken e.d. te richten aan:

het Centraal Bureau der V.E.V.
Emmalaan 6, Amsterdam-Z.

Ten dienste van de opleidingen wordt door de V.E.V. een serie handleidingen uitgegeven.

De handleidingen kunnen worden besteld, of tegen contante betaling worden afgehaald bij het Centraal Bureau. Een complete boekenlijst wordt op aanvraag gaarne toegezonden.

Bij de eerste druk

Door de enorme vlucht welke de toepassing van de elektronica ook op ander gebied dan op dat van de radiotechniek heeft genomen, werd de behoefte gevoeld te komen tot een nieuw deel van de V.E.V.-handleiding, hetwelk meer speciaal de theorie der elektronica diende te omvatten.

De snelste en eenvoudigste wijze om tot de samenstelling van een dergelijke handleiding te komen, was het splitsen van het bestaande deel VIII „Technische vakkennis voor de radioreparateur" en het omwerken van het eerste gedeelte hiervan tot een nieuwe handleiding.

Hiertoe werden de hoofdstukken I t/m VII benevens de paragrafen 75 t/m 85, 94 t/m 96 en 101/102 van hoofdstuk VIII van genoemd boek samengevoegd, opnieuw bewerkt en aangevuld tot het thans voor u liggende deel X der V.E.V.-handleiding.

In deze vorm is dit boekwerk bedoeld om tezamen met de delen VIIIa en IX te worden gebruikt voor de opleiding van radiomonteurs en radioreparateurs. Daarnaast is het bestemd voor andere op leidingen op elektronisch gebied.
De tekst is volledig aangepast aan de laatste ontwikkelingen van deze techniek en aan bij de V.E.V.-radiocursussen opgedane ervaringen.

Met toestemming van de auteur van deel VIII, de heer H. Blok, is de bewerking uitgevoerd door een commissie van leraren, verbonden aan V.E.V.-cursussen, onder voorzitterschap van de heer C. A. J. Meijer †, directeur van ons Centraal Bureau.
In deze commissie hadden zitting de heren A. J. Albregts, J. O. van Gelder, J. T. van der Kolk, A. Leseman, J. Rongen en A. de Vries.

Aan de redactiebesprekingen hebben eveneens deelgenomen de heren J. Beckering, H. Dorreboom en J. Mariouw als medewerkers bij de organisatie van applicatiecursussen voor elektronische meet- en regeltechniek.

De commissie werd bovendien zeer actief bijgestaan door de heren G. J. Deelman en W. Sant.

Aan de leden van de commissie en verder aan allen, die aan de samenstelling van dit boek medewerkten, betuigen wij hier gaarne onze dank.

Een woord van dank zijn wij ook verschuldigd aan mevrouw M. de Vries-van Damme voor de wijze waarop zij het omvangrijke en moeilijke correctiewerk heeft verricht en aan de heer A. Kattenbeld voor het verzorgen van de clichétekeningen.

Wij menen, dat met dit boek een handleiding tot stand is gekomen, welke nuttige diensten kan bewijzen aan hen die zich de in de tegenwoordige bedrijfspraktijk steeds meer gevraagde elementaire kennis van de elektronica wensen eigen te maken.

Het bestuur van de V.E.V.

Amsterdam, januari 1958

Bij de tweede druk

Van de gelegenheid welke deze herdruk bood is gebruik gemaakt de symbolen in de vele figuren te moderniseren en aan te passen aan de normen 2052. Ook de aanduiding van de eenheden werd gemoderniseerd. Wij danken in het bijzonder de heer A. Kattenbeld die voor het bijwerken van de figuren heeft zorggedragen.

Het bestuur van de V.E.V.

Amsterdam, maart 1964.

INHOUD

Hoofdstuk I. Atoom- en elektronentheorie

§ 1. Onderzoek naar de bouw van de stof 1
§ 2. Vergroting 100 000 000 × 2
§ 3. Waarvan is de wereld gemaakt? 3
§ 4. Waaruit bestaat de stof? 5
§ 5. Waaruit bestaat een molecuul? 6
§ 6. Is het atoom deelbaar? 7
§ 7. Waaruit bestaat een atoomkern? 8

Hoofdstuk II. Elektrische verschijnselen in de stof en elektrolyse

§ 1. Botsingen tussen elektronen en atomen in gassen . . 10
§ 2. Ionisatie in vloeistoffen 12
§ 3. Corrosie 15

Hoofdstuk III. Geleiding, weerstand en zelfinductie

§ 1. De bouw van een geleider 17
§ 2. Geleiders 18
§ 3. Weerstand 19
§ 4. Contacten 20
§ 5. Zelfinductie 22
§ 6. Niet verliesvrije spoelen 23
§ 7. Spoel met parallel-verliesweerstand 24
§ 8. Verlieshoek bij parallelschakeling 25
§ 9. Kwaliteitsfactor bij parallelschakeling 25
§ 10. Spoel met serie-verliesweerstand 26
§ 11. Verlieshoek bij serieschakeling 27
§ 12. Kwaliteitsfactor bij serieschakeling 27
§ 13. Het inschakelverschijnsel bij een zelfinductie 28
§ 14. Uitschakelverschijnselen bij een zelfinductie 29

Hoofdstuk IV. Halfgeleiders

§ 1. De bouw van halfgeleiders 31
§ 2. Mogelijkheden van halfgeleiders 34

Hoofdstuk V. Isolatiematerialen in condensatoren

§ 1. Isolatiematerialen 37
§ 2. Diëlektrische constante. 38
§ 3. De condensator 38
§ 4. Temperatuurscoëfficiënt 39
§ 5. Schijnbare weerstand 39
§ 6. De niet verliesvrije condensator 40
§ 7. Condensator met parallel-verliesweerstand. 41
§ 8. Condensatoren met serie-verliesweerstand 42
§ 9. Het omzetten van een serie-verliesweerstand in een parallel-verliesweerstand 42
§ 10. Het laden van een condensator over een weerstand 43
§ 11. Het ontladen van een condensator over een weerstand 44
§ 12. Kortsluiten van een geladen condensator 45
§ 13. Enige verschijnselen bij niet-ideale isolatie. 46

Hoofdstuk VI. Elektrische geleiding door gassen

§ 1. Stroomdoorgang in een gas 49
§ 2. Verschijnselen bij gasontlading (lage druk). 51
§ 3. Donkere ontlading 51
§ 4. De doorslag. 53
§ 5. Het gebied van het abnormale glimlicht 54
§ 6. Overgang naar de boogontlading 55
§ 7. Laagspanningsboogontlading 55
§ 8. Zuilontlading 55
§ 9. Omstandigheden die van invloed zijn op de doorslagspanning 57
§ 10. De vorm van de elektroden 59
§ 11. Doorslag van de lucht 61
§ 12. Onweer. 63
§ 13. De invloed van de druk op de ontlading 64
§ 14. Gebruik van een derde elektrode 65
§ 15. Thermische elektronenemissie 66
§ 16. Gasontladingen bij wisselstroom 66

Hoofdstuk VII. Elektronen-emissie

§ 1. Statische elektriciteit. 70
§ 2. Het bombarderen van vaste stoffen met elektronen 71
§ 3. Secundaire emissie 72
§ 4. Het foto-elektrisch effect 73
§ 5. Wanneer treden elektronen buiten de geleider?. . . 74

§ 6. Emissie van elektronen door verhitting (thermische emissie) 76
§ 7. Opbouw van een voor elektronen-emissie geschikte geleider. 78
§ 8. Verhitten van de kathode 79
§ 9. Elektrische geleiding door het luchtledige 81
§ 10. De elektronenstroom 86

Hoofdstuk VIII. Afvlakinrichtingen

§ 1. Stromen en spanningen 88
§ 2. Afvlakking van de rimpelspanning 92
§ 3. Smoorspoelen 98
§ 4. Beveiliging van elektrolytische filtercondensatoren . 101

Hoofdstuk IX. Voeding met behulp van wisselstroombronnen

§ 1. Omzetting van wissel- in gelijkstroomenergie. . . . 103
§ 2. Voeding met wisselstroom van indirect verhitte buizen 104
§ 3. Gloeidraadvoeding van indirect verhitte elektronenbuizen 105
§ 4. Schakelingen voor de wisselstroomvoeding van direct verhitte buizen 109
§ 5. Schakelingen voor wisselstroomvoedingstoestellen . 110

Hoofdstuk X. Gelijkrichters

§ 1. Gelijkrichtschakelingen. 114
§ 2. Spanningsverdubbeling 117
§ 3. Gelijkrichtschakeling met condensator en belastingsweerstand 119
§ 4. Dubbele gelijkrichting 121
§ 5. Stroom-spanningskarakteristieken van een P.S.A. . 124

Hoofdstuk XI. Versterking van wisselspanningen door middel van elektronenbuizen

§ 1. Inleiding 132
§ 2. Verzwakking en versterking 132
§ 3. De elektronenbuis in de stroomketen 134
§ 4. Buiskarakteristieken 136
§ 5. Inwendige weerstand. 141
§ 6. De steilheid van een elektronenbuis. 147
§ 7. De versterkingsfactor van een elektronenbuis . . . 150
§ 8. Wisselspanningen op rooster en anode. 155

§ 9. Buis met belastingsweerstand 158
§ 10. Versterking 162
§ 11. Schermroosterbuizen 166
§ 12. Penthodekarakteristieken 169
§ 13. De I_a-U_a-karakteristieken van de penthode 170
§ 14. De I_a-U_{g1}-karakteristieken van de penthode 171
§ 15. Het verkrijgen van de negatieve roosterspanning . . 173

Hoofdstuk XII. Halfgeleiderdioden en -transistoren

§ 1. De lagendiode 176
§ 2. Gelijkrichtkarakteristiek 179
§ 3. Toepassingen 180
§ 4. De puntcontactdiode 180
§ 5. Transistoren 182
§ 6. Werking van de transistor 183
§ 7. Geaarde basisschakeling van de transistor 185
§ 8. Transistor in geaarde emissorschakeling 186
§ 9. Transistorkarakteristieken 187

Hoofdstuk XIII. Versterkerschakelingen met elektronenbuizen en transistoren.

§ 1. Een versterker met twee trioden 189
§ 2. Een versterker voor wisselspanningen 193
§ 3. De eindbuis met aanpassingstransformator 196
§ 4. De balansschakeling 200
§ 5. Een versterker met transistoren 201
§ 6. De invloed van de frequentie op de versterking . . . 203
§ 7. Vervorming 205
§ 8. Tegenkoppeling 207
Grieks alfabet 215

HOOFDSTUK I

ATOOM- EN ELEKTRONENTHEORIE

§ 1. Onderzoek naar de bouw van de stof

Het menselijk oog kan zeer kleine voorwerpen niet meer waarnemen. Het zien van een haar op een insekt kost de meesten van ons dan ook merkbare inspanning. Dank zij de uitvinding van het vergrootglas, de z.g. lens, is het mogelijk geworden tot het gebied van het zeer kleine door te dringen. Een aantal grote prestaties van harde werkers (voor ons land o.a. Antoni van Leeuwenhoek) bracht het tenslotte zover, dat we nu iets tienduizend maal vergroot kunnen zien.

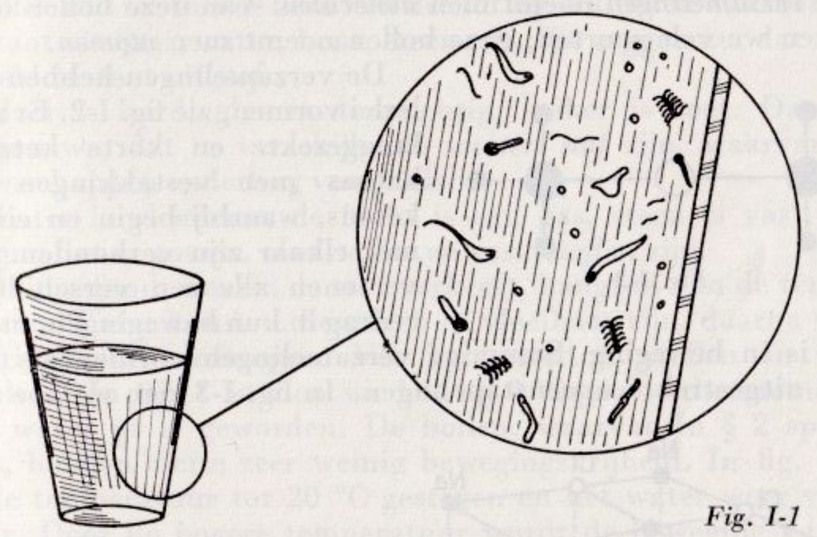


Fig. I-1

Wat dit betekent kunnen we ons het beste voorstellen, door aan te nemen, dat wij onze eigen afmetingen houden en alles om ons heen tienduizendmaal groter wordt. Een gewone vlieg zien we dan als een borstelig beest van 50 m lengte, dat is zo groot als een modern blokje huizen of een rij van 15 olifanten. Een spin is een gevaarlijk roofdier geworden, die de reuzenvlieg kan leegzuigen. Een kleine regenworm, die ons voorbij kruipt, geeft de indruk van een nieuw soort snel rijdende dieseltrein. Een tienduizendste millimeter is nu een millimeter ge-

worden. We ontdekken wezens, die we met ons blote oog niet vermogen waar te nemen. Zij hebben allerlei vormen: bollen, staven en spiralen. Sommige liggen stil, andere bewegen zich als alen in water (zie fig. I-1). De grootte varieert van enige centimeters tot stippen. Deze wezens noemt men microben.

Hout gelijkt op een spons met enorme gaten erin. Een mooi gepolijst stuk ijzer blijkt *nu* grote krassen in het oppervlak te hebben. We zien echter nog niets wat een aanwijzing geeft omtrent de *bouw van de stof*. De vergroting is nl. voor ons doel nog lang niet sterk genoeg.

§ 2. Vergroting 100 000 000 X

Wij stellen ons nu voor, dat alles om ons heen nogmaals 10 000 maal wordt vergroot. We geraken nu in een geheel andere wereld. IJzer en water zien we als zodanig niet meer. We zien slechts bewegende grote en kleine verzamelingen bollen. Deze *verzamelingen* noemt men *moleculen*. Van deze bollen ontdekken we vele soorten; deze bollen noemt men *atomen*.

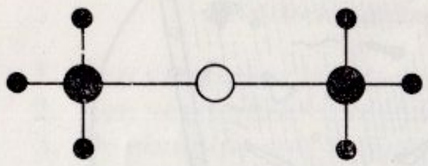


Fig. I-2

De verzamelingen hebben allerlei vormen, zie fig. I-2. Er zijn langgerekte en korte ketens, ketens met vertakkingen en ketens, waarbij begin en einde met elkaar zijn verbonden. Zij vertonen alle een verschillend gedrag in hun bewegingen, maar *alles* is in beweging. Sommige verzamelingen vormen als het ware uitgestrekte opeenstapelingen. In fig. I-3 zien we hoe natrium-(Na) en chlooratomen (Cl) in keukenzout (NaCl) zich met elkaar verbonden hebben, terwijl fig. I-4 aangeeft hoe in diamant vier koolstofatomen (C) met elkaar een hechte verbinding vormen.

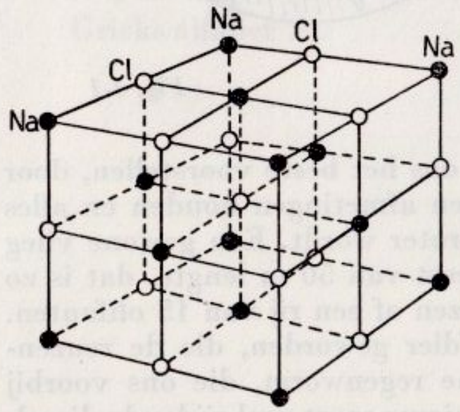


Fig. I-3

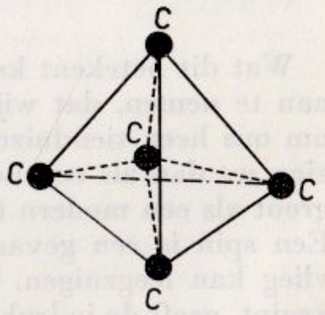


Fig. I-4

Tenslotte blijkt, dat ook in de bollen, de z.g. atomen, nog weer deeltjes in beweging zijn.

Andere verzamelingen schieten met grote snelheid door de ruimte; daarbij wentelen zij rond als een tol. Onderlinge botsingen komen voor. Soms gebeurt daarbij niet meer dan dat de snelheid der verzamelingen toe- of afneemt, zoals bij botsende biljartballen.

In andere gevallen breken de verzamelingen in stukken. De stukken verenigen zich bij nieuwe botsingen weer tot gehelen.

In de verzamelingen zien we na de botsingen heftige heen en weer gaande bewegingen van de bollen.

§ 3. Waarvan is de wereld gemaakt?

Alles wat we om ons heen met de zintuigen kunnen waarnemen, bestaat uit ijzer, water, hout, steen enz. We zeggen nu, dat onze wereld bestaat uit *stof*.

IJzer is hard, glas is doorzichtig, suiker is zoet. Daarom zeggen we, dat er verschillende *soorten stof* zijn, waarvan de eigenschappen onderling verschillen.

Water is vloeibaar, de lucht is een gas, steen is vast. We zeggen dat er *gassen*, *vloeistoffen* en *vaste stoffen* zijn.

De toestand, waarin de stof verkeert, hangt af van de temperatuur. Water kan b.v. bevroren of vloeibaar zijn, daarna weer bevriezen of verdampen. Vet kan smelten, stollen en weer smelten. In fig. I-5a zien we hoe bij 0 °C (zie de thermometer) het water ijs is geworden. De bollen, waarvan in § 2 sprake was, hebben hierin zeer weinig bewegingsvrijheid. In fig. I-5b is de temperatuur tot 20 °C gestegen en het water weer vloeibaar. Door de hogere temperatuur wordt de beweging van de bollen groter en zelfs verlaten enkele even het wateroppervlak. In fig. I-5c kookt bij 100 °C het water. Alles is in heftige beweging en veel van de bollen verlaten het oppervlak om er niet weer in terug te keren. Het water gaat over in damp.

Sommige vaste stoffen komen in *kristalvorm* voor (suiker in deze vorm noemen we kristalsuiker) andere in z.g. amorfe toestand, b.v. krijt [1]).

[1]) Amorf betekent eigenlijk vormloos, in dit geval: niet uit kristallen opgebouwd.

Grotere en kleinere hoeveelheden van de stof vertonen dezelfde eigenschappen. Een korreltje suiker smaakt zoet, een lepel vol smaakt ook zoet.

Elke soort stof heeft gewicht; als we een voorwerp omhoog werpen, *valt* het weer terug op de aarde. Het voorwerp wordt

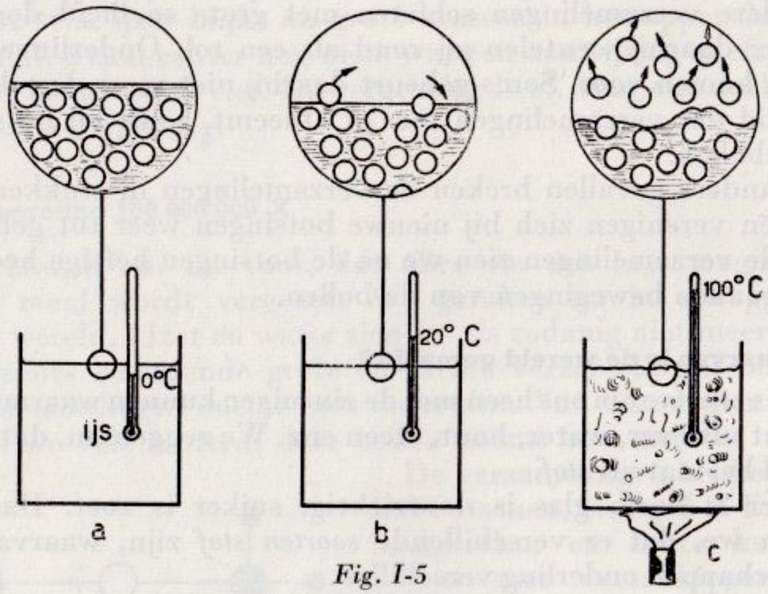


Fig. I-5

blijkbaar door de *aarde* aangetrokken. De aarde veroorzaakt dus het *gewicht* en het *vallen*. We zeggen nu, dat de stof *massa* heeft. De massa van de aarde trekt de massa van het voorwerp naar zich toe. Het is enigszins te vergelijken met het aantrekken van een stukje ijzer door een magneet.

Opgaven

1. Vertel iets van de stof.
2. Noem enige soorten stof.
3. Noem de eigenschappen, die ge kent van een soort stof.
4. Noem de toestanden, waarin de volgende stoffen kunnen verkeren; water is vloeibaar; als het vriest wordt het ..... IJzer is vast, als het witgloeiend wordt gemaakt, zal het bij verdere verhitting ..... Kwik is ....., als het sterk wordt afgekoeld zal het .....
5. Met hoeveel kracht trekt de aarde een voorwerp aan dat 1 kg weegt?

§ 4. Waaruit bestaat de stof?

Uit de proef met suiker leerden we, dat een grote en een kleine hoeveelheid van de stof dezelfde eigenschappen vertonen. De vraag is nu echter of dit zo blijft, als de hoeveelheid steeds kleiner en kleiner gemaakt wordt. Het antwoord hierop is: neen. Van elke stof is een bepaalde kleinste hoeveelheid aan te wijzen, die nog de eigenschappen van de stof bezit. Deze noemen we het *molecuul* (het korreltje). Het molecuul is zeer klein tegenover een kubieke millimeter. Als een molecuul in kleinere stukken wordt gedeeld, hebben deze stukken niet meer dezelfde eigenschappen. Naast de eigenschappen van de *soort* stof vertonen de moleculen nog de volgende eigenschappen: *De moleculen trekken elkaar aan*. Het kost kracht om hen van elkaar te verwijderen. IJzer is taai en hard. De moleculen van vaste stoffen liggen min of meer regelmatig in vlakke lagen gerangschikt. De lagen liggen op haar beurt op elkaar gestapeld (zie fig. 3). De moleculen vertonen daarbij voortdurende, heen en weer gaande bewegingen. Dit noemen we *trillen*. De moleculen van gassen en vloeistoffen zijn vrijwel niet aan een bepaalde plaats gebonden. Zij bewegen zich met zeer verschillende snelheden in alle richtingen door elkaar in de ruimte (zie fig. I-6). Daarbij komen onderlinge botsingen voor. Hoe hoger de temperatuur wordt, des te heftiger bewegen de moleculen. Ook botsen de moleculen tegen de wanden van het vat of de ruimte, waarin zij zijn opgesloten.

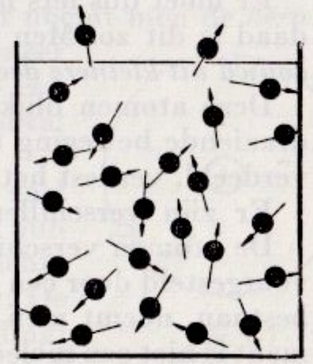


Fig. I-6

We herhalen nog even:

De stof bestaat uit moleculen. Een molecuul ijzer vertoont de eigenschappen van ijzer en is dus te onderscheiden van een molecuul goud of een molecuul suiker. De moleculen zijn in voortdurende beweging.

Opgaven

6. Vertel iets van de moleculen.
7. Vertel iets van de bouw van een vaste stof.
8. Vertel iets van de bouw van een vloeistof.
9. Zie fig. I-5. Vul in:
   Als de temperatuur stijgt, worden de bewegingen en botsingen van de vloeistofmoleculen.....

De oppervlakte van de vloeistof bestaat uit bewegende ..... De moleculen trekken elkaar wel aan, maar als een molecuul een daarvoor gunstige..... meemaakt, vliegt het zover..... het vloeistofoppervlak, dat het er niet weer in terug komt. Bij een minder gunstige ..... zal het weer in de vloeistof terugvallen. Als er veel moleculen weg vliegen, raakt het vat leeg; dit noemen we .....

10. Vertel iets van verdampen.
11. Welke soorten stoffen kunt U aan een elektronenbuis ontdekken?

§ 5. Waaruit bestaat een molecuul?

We bekijken een lucifer eens nauwkeurig. We steken er een of twee aan en letten goed op hetgeen er gebeurt. Als de vlam is uitgedoofd en de rook verspreid, merken we op: het hout is verbrand, er is as overgebleven. De moleculen hout bestaan niet meer. We maken nu de gevolgtrekking, dat er andere moleculen zijn ontstaan, o.a. die van as.

Er moet dus iets met de moleculen hout zijn gebeurd. Inderdaad is dit zo. Men heeft ontdekt, dat *de moleculen zijn opgebouwd uit kleinere deeltjes*. Deze deeltjes noemt men *atomen*.

Deze atomen blijken ook weer in voortdurende trillende en draaiende beweging te zijn. Als een molecuul in atomen wordt verdeeld, verliest het de eigenschappen van de stof.

Er zijn verschillende soorten atomen ontdekt nl. ca. 100. De atomen verschillen onderling in grootte en worden veelal voorgesteld door een bol. Stoffen die alleen uit één soort atomen bestaan, noemt men elementen. Het kleinste deel van een element is niet een molecuul, maar een atoom.

De atomen oefenen aantrekkingskracht op elkaar uit. Twee of meer atomen kunnen zich verbinden tot moleculen. Het tot stand komen van de verbinding hangt o.a. af van de temperatuur. De eigenschappen van de moleculen hangen af van de soorten en aantallen atomen, waaruit zij zijn opgebouwd. De moleculen kunnen in groepen atomen of in afzonderlijke atomen uiteenvallen. Dit uiteenvallen hangt o.a. eveneens af van de temperatuur. De atomen kunnen zich weer tot andere verzamelingen aaneensluiten. Daarbij ontstaan dan andere soorten moleculen.

Opgaven

12. Vertel iets over atomen.
13. Noem enige verschijnselen, die erop wijzen, dat moleculen uit kleinere deeltjes moeten bestaan.

14. Noem enige soorten stof en veranderingen welke men er aan kan opmerken.
15. Noem enige *eigenschappen*, welke moleculen verliezen bij de verandering in andere moleculen.
16. Hoeveel soorten atomen heeft men reeds ontdekt?
17. Verklaar, waarom een molecuul niet steeds in atomen uiteenvalt.

§ 6. Is het atoom deelbaar?

Lange tijd meende men, dat het atoom ondeelbaar was. De naam atoom betekent dan ook: ondeelbaar (eigenlijk: onsnijbaar).

Het echtpaar Curie en eveneens Rutherford hebben zeer duidelijk aangetoond, dat deze mening onjuist was. Ze hebben ontdekt, dat er enige soorten atomen bestaan, welke bij normale temperatuur inwendig veranderen. Daarbij worden snel vliegende deeltjes uit het atoom weggeschoten en er komt energie vrij. Men noemt dit radio-activiteit. *Radium* en *uranium* zijn de bekendste soorten. Het atoom blijkt te bestaan uit een betrekkelijk groot middengedeelte; dit noemt men de *kern*. Om de kern heen bewegen zich een of meer kleinere deeltjes. De eigenschappen van een atoom hangen af van de kern en het aantal kleine deeltjes.

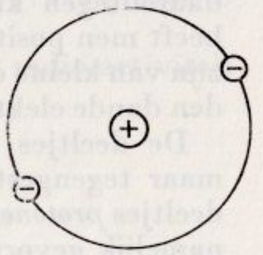


Fig. I-7

De kleine deeltjes bewegen zich zeer snel om de kern heen. Ook draaien zij om hun eigen as. Men noemt ze *elektronen*. Ten opzichte van de kern zijn de elektronen zeer licht. De elektronen vertonen een elektrische lading; deze heeft men *negatief* genoemd. De elektronen lopen voortdurend in ongeveer cirkelvormige banen om de kern, die echter in verschillende vlakken kunnen liggen.

Deze banen liggen op verschillende *vaste* afstanden van de positieve kern. Het aantal banen hangt af van het aantal elektronen, dat de kern kan aantrekken.

In fig. I-7 is een heliumatoom voorgesteld. Om de positieve kern draaien twee elektronen. De elektronen zijn beide negatief elektrisch geladen en stoten elkaar dan ook af. De kernen trekken de er omheen wentelende elektronen aan. Men kan duidelijk aantonen, dat een of meer elektronen door toevoer van energie, b.v. door botsingen, van het atoom zijn af te halen. Men stelt de elektronen voor door een bolletje met een minteken erin of er bij. De vrijgemaakte elektronen kunnen zich onder bepaalde omstandigheden verplaatsen.

18. Vertel iets van het atoom.
19. Hoe stelt U zich een atoom voor?
20. Vertel iets van het elektron.
21. Maak een schetsje van een atoom met vier elektronen.
22. Maak een schetsje van een molecuul met enige soorten atomen erin.

§ 7. Waaruit bestaat een atoomkern?

De ontdekking van de radio-activiteit had nog meer gevolgen.

Eerst werd ontdekt, dat het atoom niet ondeelbaar was. Later bleek de ondeelbaarheid ook voor de kern niet op te gaan. Na leerzame onderzoekingen bleek het volgende: Elke soort atoom bestaat uit een speciale kern en een zeker aantal bijbehorende elektronen. De kern vertoont een bepaalde elektrische lading. Deze lading is tegengesteld aan die van het elektron. Een atoomkern van het zeldzame gas helium b.v. heeft een kern, die twee elektronen aantrekt, meer niet (fig. I-7), een uranium-atoomkern daarentegen kan 92 elektronen aantrekken. Deze kernlading heeft men positief genoemd. De kernlading blijkt afkomstig te zijn van kleine deeltjes. Deze zijn veel vaster met de kern verbonden dande elektronen.

De deeltjes hebben een positieve elektrische lading, gelijk, maar tegengesteld aan die van het elektron. Men heeft deze deeltjes *protonen* genoemd. Het gewicht van de kern wordt voornamelijk gevormd door protonen en deeltjes zonder lading, de z.g. *neutronen*. De kern wordt voorgesteld door een cirkel met een plusteken erin of ernaast. De kernen van de meeste soorten atomen hebben een stevige bouw. Van enkele soorten zijn zij aan natuurlijke ontleding onderhevig. Daarbij komen o.a. snel vliegende elektronen vrij. Deze elektronen hebben een snelheid van ongeveer 100 000 km/sec.

Door speciale „beschieting" met snel vliegende neutronen kan men sommige atoomkernen in stukken doen springen. Daarbij komt een zeer grote hoeveelheid energie vrij. Op dit verschijnsel berust de atoombom. Een andere toepassing van hetzelfde principe is, dat men sommige stoffen radio-actief kan maken door ze met neutronen te „beschieten". Dit gebeurt o.a. in het cyclotron van het „Instituut voor Kernphysisch Onderzoek" te Amsterdam.

De radio-actieve stoffen kunnen o.a. gebruikt worden voor de kankerbestrijding.

23. Vertel iets over de ontdekking door het echtpaar Curie omtrent de atoombouw.
24. Vertel iets over de bouw van de atoomkern.
25. Maak een schetsje van een heliumatoom.
26. Vertel iets van de neutronen en protonen.
27. Wat kunt U vertellen van de elektronenbeweging in een verhitte draad en in een koude draad.
28. Vertel iets van de afmetingen van moleculen en atomen en de onderlinge afstanden ertussen.
29. Een elektron wordt zoals U weet door een positieve elektrische lading aangetrokken. Vul in:
    De lucht bestaat uit een groot aantal ....., deze ..... voortdurend heftig door elkaar heen. Daarbij ..... de moleculen voortdurend tegen elkaar. Stel: een positieve elektrische lading oefent invloed uit op een aantal vrij gemaakte elektronen. Het zal dan moeilijk zijn om een aantal elektronen door de lucht te verplaatsen. Dit kunnen we verbeteren door de ruimte ..... te maken, of door de ..... groter te maken, daar dan de ..... groter wordt.
30. Welk nuttig gebruik is U bekend van de radio-activiteit van sommige stoffen?

HOOFDSTUK II

ELEKTRISCHE VERSCHIJNSELEN IN DE STOF EN ELEKTROLYSE

§ 1. Botsingen tussen elektronen en atomen in gassen

We merkten reeds eerder op, dat er in vele gevallen elektronen uit de atomen kunnen worden verwijderd. Zulke „losse" elektronen noemen we *vrije elektronen*. We nemen even aan, dat we over een aantal vrije en naar onze wens bewegende elektronen beschikken. We bombarderen een aantal normale gasatomen hiermede (zie fig. II-1) en merken nu het volgende op:

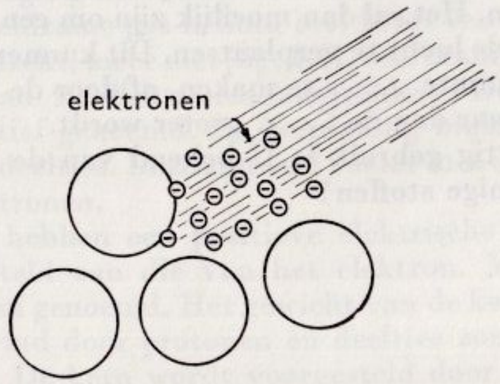


Fig. II-1

Bij geringe elektronensnelheden zijn de botsingen *elastisch* D.w.z.: de botsende lichamen veranderen van richting maar de atomen veranderen inwendig niet. De elektronen verliezen maar weinig snelheid of arbeidsvermogen van beweging (afgekort A.v.B.). Dit A.v.B. wordt door de gasatomen opgenomen. Deze atomen krijgen daardoor een grotere snelheid. Bij *zekere grotere snelheden* van de elektronen verliezen zij echter bij botsing bijna de gehele snelheid. Na korte tijd, ongeveer 10^{-8} sec, zien we de getroffen (verder bewegende) atomen enig licht uitstralen. Wat is er gebeurd? De elektronen werden sterk afgeremd en het arbeidsvermogen werd opgenomen door de atomen. De atomen gaven echter de energie weer vrij in de vorm van licht.

Men moet zich dit alles als volgt voorstellen: Een (of meer) der elektronen van het atoom werd(en) als het ware met een

stoot in een grotere baan gebracht, de z.g. *toestand van aanslag* van het atoom. Dit blijkt een slechts kort bestaanbare toestand en bij het terugspringen in de oude baan komt de opgenomen energie weer vrij in de vorm van licht.

Door het terugspringen van een elektron van een baan naar een bepaalde kleinere baan, wordt een *lichtgolf* opgewekt van een daarbij behorende golflengte (frequentie) (fig. II-2).

Bij iedere andere overgang en bij andere atomen ontstaan weer andere golflengten.

Een groot deel valt buiten het zichtbare deel van het frequentie-spectrum en is voor ons dus onzichtbaar.

Bovengenoemd verschijnsel is er de oorzaak van, dat sommige gassen kunnen oplichten in een zéér bepaalde kleur, *die karakteristiek is voor de aard van het gas*. Bekende voorbeelden zijn:

Natrium — geel
Neon — rood
Kwik — blauw

Van deze eigenschap wordt gebruik gemaakt in de gasontladingslampen, zoals bij de natriumlampen, neonbuizen (reclame) en kwikdamplampen (hoge druklampen, menglichtlampen, TL-buizen).

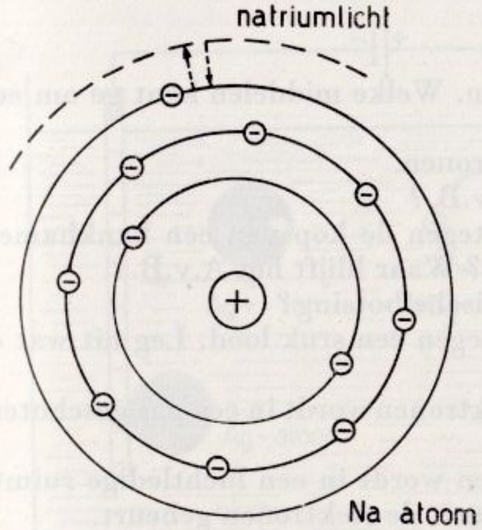


Fig. II-2

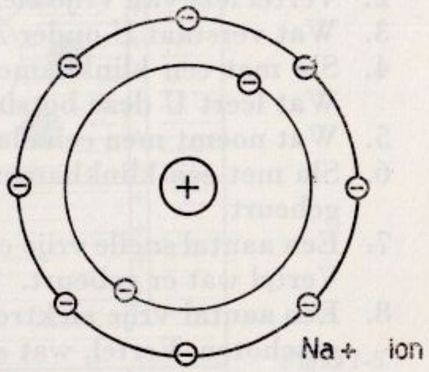


Fig. II-3

Bij voortdurend toenemende snelheid van de bombarderende elektronen ontstaat een nieuw verschijnsel. De elektronen in de atomen worden zover van de kern los gemaakt, dat er als het

ware geen baan meer voor hen bestaat. Zij vliegen van het atoom af. Het gevolg is nu dat er *vrije* elektronen ontstaan en *positief geladen* atomen, welke een of meer elektronen missen. Dergelijke atomen noemen we *geïoniseerde atomen* of *ionen* (zie fig. II-3). Het verschijnsel heet *ionisatie*.

De geïoniseerde atomen en vrije elektronen verkeren evenals de overige moleculen en atomen in voortdurende beweging en onderlinge botsingen.

De bedoelde atomen zijn als het ware elektrisch geladen lichamen. Zij worden door negatieve elektrische ladingen aangetrokken. Zij stoten andere positieve geïoniseerde atomen af en trekken elektronen aan. Als dat lukt, komt de arbeid weer vrij. Dit noemt men ook wel *emitteren* of *uitstralen*.

Ionisatie kan echter eveneens geschieden door de botsende atomen zelf, als zij maar voldoende snelheid hebben (stootionisatie). Voorts door snel vliegende ionen en door nieuw ontstaande vrije elektronen. Ook door bestraling met lichtenergie kan ionisatie ontstaan.

In vloeistoffen komt eveneens ionisatie voor, de verschijnselen zijn daarbij echter anders. Ook in vaste stoffen is in zekere zin ionisatie mogelijk.

Opgaven

1. Vertel iets van een gas-ion. Welke middelen kent ge om een gas te ioniseren?
2. Vertel iets van vrije elektronen.
3. Wat verstaat U onder A.v.B.?
4. Sla met een klinkhamer tegen de kop van een bankhamer. Wat leert U deze botsing? Waar blijft het A.v.B.?
5. Wat noemt men een elastische botsing?
6. Sla met een klinkhamer tegen een stuk lood. Leg uit wat er gebeurt.
7. Een aantal snelle vrije elektronen wordt in een gas geschoten. Vertel wat er gebeurt.
8. Een aantal vrije elektronen wordt in een luchtledige ruimte geschoten. Vertel, wat er met de elektronen gebeurt.

§ 2. Ionisatie in vloeistoffen

Een drinkglas wordt gevuld met water. Het glas is nu, natuurkundig gesproken, gevuld met een enorme massa opeengehoopte moleculen. Uit een vulpenhouder laten we nu op de bovenste laag van het water enkele druppels inkt vallen. Deze vermengen zich min of meer met de bovenste laag. Na krachtig roeren blijkt het water *overal* dezelfde (verdunde) inkttint te hebben. Bij een vloeistof is het dus mogelijk als het ware een willekeurige moleculenrangschikking te maken.

Komt ionisatie nu ook in vloeistoffen voor? Het antwoord luidt: Zuivere alkohol, petroleum, water en speciale oliesoorten vertonen bij normale temperatuur vrijwel geen ionisatie.

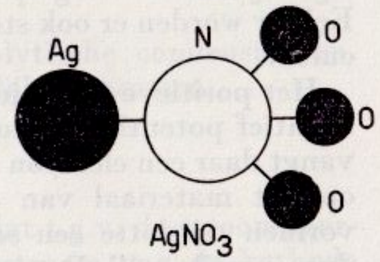


Fig. II-4

Oplossingen van zouten, verdunde zuren en logen vertonen deze ionisatie in sterke mate. Deze ionisatie is echter anders dan bij gassen.

Stel we nemen het bad om te verzilveren, zoals beschreven is in deel I der V.E.V.-handleiding (Theorie der Elektriciteit). De formule voor zilvernitraat is $AgNO_3$ (zie fig. II-4). Het zilvernitraat is in water opgelost. Het is daarbij verdeeld in *moleculen*. De twee natuurkundigen Clausius en Arrhenius hebben nu de volgende theorie opgesteld.

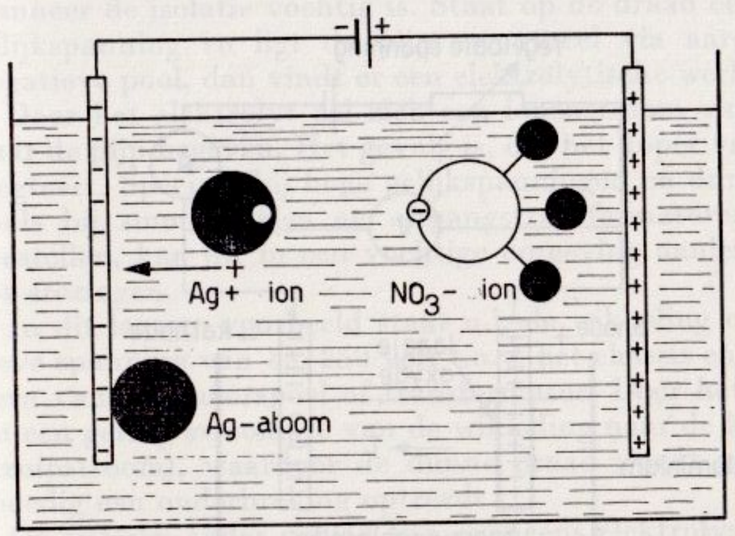


Fig. II-5

De moleculen zilvernitraat zijn gedeeltelijk gesplitst, en wel in *twee ionen* (zie fig. II-5). Eén soort ion wordt gevormd door een zilveratoom, dat een elektron heeft afgestaan. *Het zilver-ion*

is dus positief. De NO_3-groep heeft een elektron aangetrokken. Deze groep vormt dan een negatief ion. Men moet zich dit als volgt voorstellen. De ionen zijn met de overige moleculen overal in de vloeistof verdeeld zoals de inktdeeltjes. Zij verkeren alle in trillende beweging, zodat er steeds onderlinge botsingen voorkomen. Als gevolg van deze botsingen worden er voortdurend $AgNO_3$-moleculen gesplitst in positieve en negatieve ionen. Echter worden er ook steeds weer ionen gecombineerd tot moleculen.

Het positieve zilver-ion begeeft zich naar de kathode, die op negatief potentiaal gehouden wordt door de batterij. Het ontvangt daar een elektron en zet zich als een neutraal zilverdeeltje op het materiaal van de kathode af. Al deze zilverdeeltjes vormen tenslotte een *samenhangende laag*. De kathode wordt dus „verzilverd". De negatieve NO_3-groep begeeft zich naar de positieve anode. Bestaat deze anode uit zilver, dan verenigt een dergelijke NO_3-groep zich weer met een zilveratoom onder afgifte van een elektron. Het nu weer neutrale zilvernitraatmolecuul lost in het water op. Er wordt dus steeds evenveel zilver van de anode opgelost, als aan de kathode wordt afgegeven.

De aan de anode afgegeven negatieve elektronen worden door de batterij naar de kathode teruggepompt.

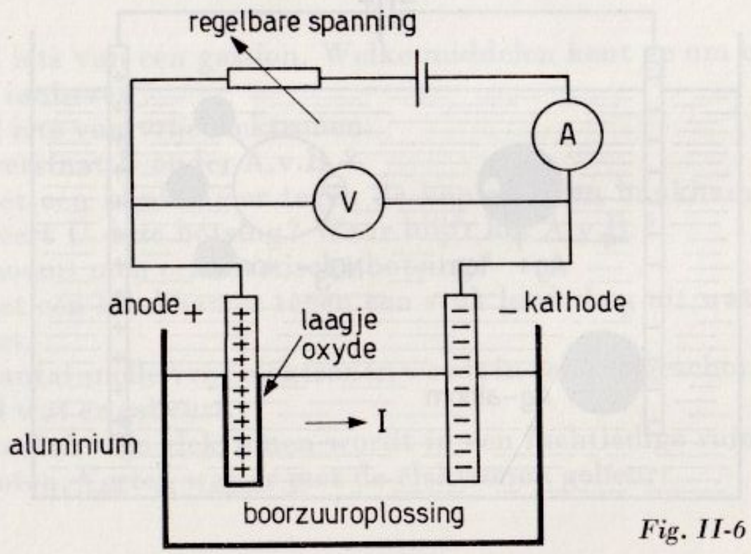


Fig. II-6

Een belangrijk elektrolytisch proces ontstaat in een boorzuuroplossing met aluminiumanode. Het water (H_2O) van de

oplossing wordt ontleed in zuurstofgas en waterstofgas. De aan de anode vrijkomende actieve zuurstof oxydeert ogenblikkelijk het aluminiumoppervlak en de anode wordt bedekt met een laagje aluminiumoxyde (Al_2O_3). Aanvankelijk wordt de stroomsterkte in hoofdzaak bepaald door de weerstand van de vloeistof. Het oxyde is echter een slechte geleider en vergroot de weerstand van de keten, waardoor de stroom afneemt (zie fig. II-6).

Dit proces vindt plaats bij elektrolytische condensatoren. Ook corrosie is het gevolg van dergelijke processen.

§ 3. Corrosie

Bij het verzilveren zagen we reeds, dat t.g.v. de stroomdoorgang door de vloeistof een elektronenstroom van de kathode naar de anode gaat en een ionenstroom in de *omgekeerde richting*. Deze ionen transporteren de metaaldelen van de anode (+) naar de kathode (—).

De anode wordt daardoor steeds meer weggevreten, de kathode groeit aan.

Dergelijke processen vinden steeds plaats, wanneer zich twee spanningvoerende geleiders in een elektrolyt bevinden. Dit kan zich b.v. voordoen bij een geïsoleerde draad in een metalen pijp, wanneer de isolatie vochtig is. Staat op de draad een positieve gelijkspanning en ligt de pijp, eventueel via aarde, aan de negatieve pool, dan vindt er een elektrolytische werking plaats.

Door het elektrolyt zal zich een ionenstroom van de draad naar de pijp begeven. Het gevolg is, dat het koper van de draad wegteert. Speciaal bij hoge gelijkspanningen en dunne draden, zoals bij smoorspoelen en uitgangstransformatoren in radiotoestellen, kan dit in een vochtige omgeving aanleiding geven tot storingen.

In dit laatste voorbeeld staat n.l. de wikkeling op een positieve spanning van ca. 250 volt t.o.v. het chassis en dus van de kern van de smoorspoel of transformator. Door het vocht kan nu een gering stroompje van de wikkeling naar de kern vloeien (kruipstroom), waardoor de dunne draad wordt aangetast en spoedig een onderbreking optreedt.

Op velerlei ander gebied kan eveneens elektrolyse optreden, b.v. bij leidingen in de grond t.g.v. *zwerfstromen*, in de omgeving van batterijen en accu's door de zure dampen, die deze kunnen afgeven, door niet geheel zuurvrije vloeimiddelen bij solderen enz.

9. Vertel iets van elektrolyse.
10. Geef aan wat er met het zilver-ion gebeurt bij de elektrolyse.
11. Geef aan wat er met het NO_3-ion gebeurt bij de elektrolyse.
12. Welke elektrische stromen kunt U in het zilverbad aanwijzen?
13. Weet U iets van de stroomdoorgang bij een geïoniseerd gas te voorspellen?

HOOFDSTUK III

GELEIDING, WEERSTAND EN ZELFINDUCTIE

§ 1. De bouw van een geleider

In geleiders kunnen sommige elektronen zeer gemakkelijk van het atoom worden losgemaakt. Hierover hebben de moderne zeer gevoelige meetinstrumenten ons nog enige belangrijke dingen geleerd. De inwendige bouw van geleiders kunnen we ons als volgt voorstellen:

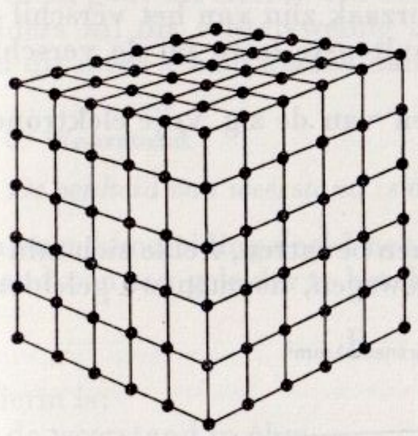


Fig. III-1

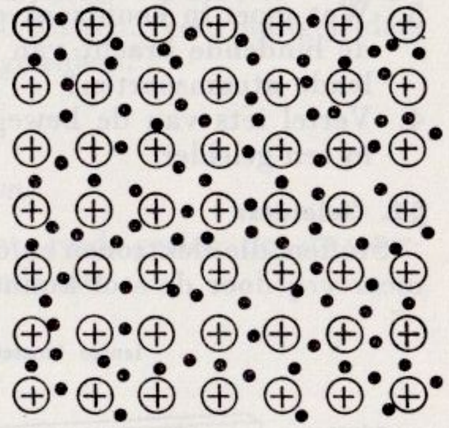


Fig. III-2

De atomen liggen in rijen naast en op elkaar. Dit noemt men rangschikking in een *rooster* (zie fig. III-1). De eigenlijke stof voor de kernen en elektronen neemt (b.v. in het metaal koper) maar weinig ruimte in beslag. Atoomkernen en elektronen verkeren in voortdurende beweging. De grootte en snelheid van deze beweging hangen af van de temperatuur. De meeste elektronen zijn vrij vast verbonden. (Zij lopen daarbij in banen.) Aan de buitenbaan zijn de elektronen echter *zeer los* verbonden. Hoewel de bindende kracht voor alle geleiders klein is, is deze toch van atoomsoort tot atoomsoort groter of kleiner. Een elektron verlaat deze baan reeds onder invloed van de bewegingen van de naburige elektronen. Slechts *af en toe* zijn deze elektronen op hun baan in het atoom.

Deze „losse" elektronen bewegen zich al botsende met andere

elektronen als *vrije elektronen* in de ruimten tussen de atoomkernen door.

Een atoom dat een of meer elektronen mist, noemen we *ion*. Alle atomen in een geleider zijn gelijk in eigenschappen. Dit wil zeggen, dat de atomen in een geleider vrijwel steeds in een iontoestand verkeren.

Een geleider is op te vatten als een *ionenrooster* (zie fig. III-2). In de ruimte tussen het rooster bewegen zich de vrije elektronen kris en kras door elkaar. Hoe hoger de temperatuur, hoe heftiger de botsingen en bewegingen.

Opgaven

1. Vertel iets van een rooster.
2. Vertel iets van de vrije elektronen in een geleider.
3. Wat moet in hoofdzaak de oorzaak zijn van het verschil in de bindende kracht van de buitenste baan bij de verschillende atoomsoorten?
4. Vertel iets van de bewegingen van de z.g. vrije elektronen in een geleider.

§ 2. Geleiders

Stoffen, die elektronen en/of ionen bevatten, welke zich min of meer vrij door de stof kunnen bewegen, noemen we geleiders.

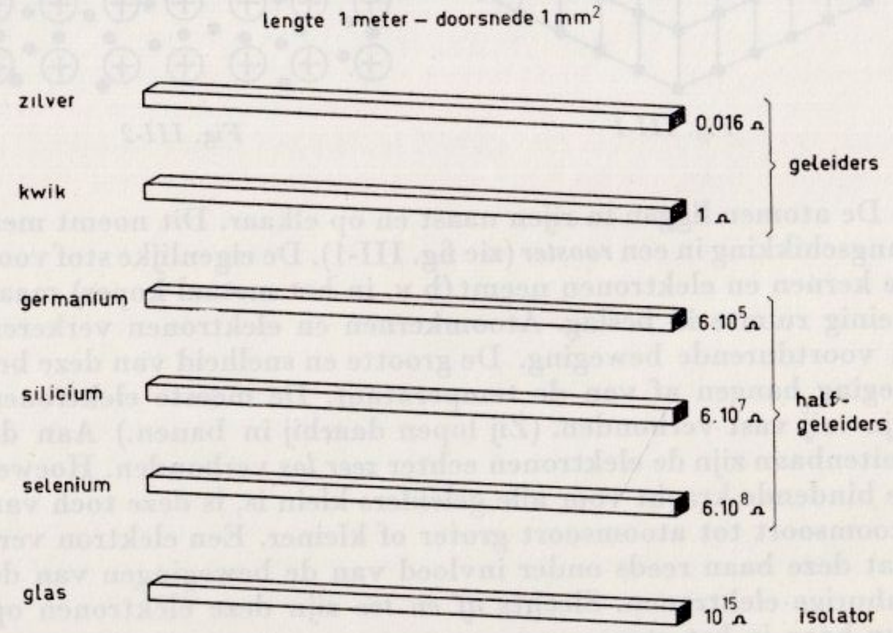


Fig. III-3

Immers een verplaatsing van elektronen (en/of ionen) betekent, dat er een elektrische stroom vloeit.

Voor de geleiders kosten de verplaatsing van elektronen en de ionisatie weinig arbeid. Kost de verplaatsing van de elektronen veel arbeid, dan wordt aan deze verplaatsing dus veel „weerstand" geboden. In fig. III-3 zien we enkele voorbeelden, waarbij tevens de weerstand in ohm (globale waarden) is opgegeven.

Voor de halfgeleiders of slechte geleiders mag men o.a. aan de ionisatieverschijnselen denken in elektrolyten.

Het volgende maakt dit begrijpelijk. Stel dat we een vaste stof willen ioniseren. Hiertoe moeten er elektronen afvloeien. Dit houdt in, dat er een elektronenstroom zal vloeien. Voor niet-geleiders, welke dus een zeer hoge weerstand aan de stroom bieden, gaat dit slechts ten koste van zeer veel arbeid. Voor geleiders zal dit echter weinig arbeid kosten. Voor halfgeleiders zal dit meer arbeid kosten dan bij geleiders.

§ 3. Weerstand

De eenheid van weerstand is de ohm.

In onze handleiding deel I hebben we reeds gezien, dat de weerstand van een geleider te berekenen is uit:

$$R = \rho \frac{l}{A}.$$

Hierin is:
R de weerstand in ohm,
ρ de soortelijke weerstand van de geleider,
l de lengte van de geleider in meters,
A de doorsnede van de geleider in mm².

In plaats van de soortelijke of specifieke weerstand ρ, wordt ook wel het *geleidingsvermogen* γ gebruikt.

$$\gamma = \frac{1}{\rho}$$

De soortelijke weerstand van een stof is de weerstand van een staaf met een lengte van 1 meter en een doorsnede van 1 mm² bij 20 °C.

Behalve dat de s.w. afhankelijk is van de aard van de stof,

heeft ook de temperatuur er invloed op. Hoe groot deze invloed is wordt aangegeven door de *temperatuurscoëfficiënt.*

Weten we de s.w. bij een bepaalde temperatuur dan is deze voor een andere temperatuur te berekenen uit:

$$\rho_t = \rho\,(1 + \alpha \times t)$$

waarin:
ρ = de soortelijke weerstand,
α = de temperatuurscoëfficiënt,
t = het temperatuursverschil in °C.

Voor de meeste stoffen is de temperatuurscoëfficiënt positief, voor enkele negatief, zoals kool, constantaan en enkele halfgeleiders.

Tot deze laatste behoren de ferroferrieten. Hierbij zijn enkele met een zeer grote negatieve temperatuurscoëfficiënt. Men maakt daarvan weerstanden waarvan de waarde sterk afneemt met het toenemen van de temperatuur, de z.g. *N.T.C.-weerstanden* (Negatieve Temperatuur Coëfficiënt-weerstanden).

§ 4. Contacten

Ook contacten bezitten een zekere weerstand. Berekenen we deze weerstand echter met de bekende formule, dan vinden we een veel te lage waarde.

Op het aanrakingsvlak van twee contacten is nl. de werkzame doorsnede belangrijk kleiner dan we oppervlakkig zouden veronderstellen.

In fig. III-4 is geschetst, hoe twee contactvlakken (sterk vergroot) elkaar raken.

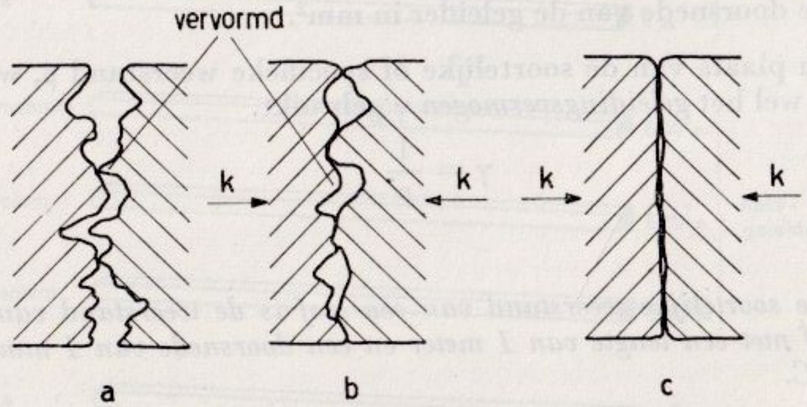


Fig. III-4
a. elkaar juist rakend; b. met een zekere druk (contactdruk) tegen elkaar; c. gepolijst en met druk tegen elkaar

In de regel zullen de elkaar aanrakende oppervlakken, de z.g. contactvlakken, niet volkomen glad en vlak zijn. De aanraking vindt dan b.v. plaats op één of enkele uitstekende punten (zie fig. III-4a). De gezamenlijke oppervlakte van deze eenkel punten is dan ook uiterst klein in vergelijking met de doorsnede van de stroomvoerende geleiders.

We drukken nu de beide vlakken met kracht tegen elkaar. Deze druk noemen we de *contactdruk*. De spitse punten zullen, voor zover er op wordt gedrukt, gaan vervormen of in het zachtste oppervlak binnendringen. Het gezamenlijke contactoppervlak wordt dan groter, ook al omdat er nu meer punten contact maken (zie fig. III-4b).

Voor het geval de oppervlakken vlak worden gepolijst is het aantal aanrakingspunten veel groter (zie fig. III-4c). We dienen er echter zeer goed op te letten, dat de vlakken precies in de juiste stand (niet scheef) tegen elkaar aan drukken.

De meeste metalen zullen onder invloed van de dampen en gassen uit de atmosfeer (b.v. zuurstof en zwavelwaterstof) bedekt worden met een slecht-geleidende laag.

Ondanks de vrij algemeen heersende mening van het tegendeel is zilveroxyde slecht-geleidend, evenals zilversulfide.

Uit bovenstaande blijkt, dat een contact een zekere extra weerstand zal hebben. Dit noemt men de *overgangsweerstand.*

De grootte van deze overgangsweerstand is afhankelijk van de afwerking van het contact, de contactdruk en de soortelijke weerstand. Bovendien speelt de reinheid van het contact een belangrijke rol.

Een hoge contactdruk is het belangrijkste hulpmiddel om een goed contact te waarborgen.

Bij een hoge contactdruk wordt immers het werkzame contactoppervlak vergroot en eventuele vuil- en oxydelaagjes doorgedrukt.

Een hoge contactdruk geeft vooral bij droge schuivende contacten aanleiding tot „vreten", wat een grote slijtage geeft en het werkzame contactoppervlak verkleint. Hierdoor neemt de overgangsweerstand toe. In dergelijke gevallen is smeren van het contact met paraffine- of silicone-olie noodzakelijk. Zware contacten worden met zuivere vaseline ingevet.

Ook om aantasting te voorkomen verdient het aanbeveling om contacten licht in te vetten.

Bij contacten voor zeer lage spanningen geeft een dun, niet geleidend huidje reeds aanleiding tot moeilijkheden. Vooral bij meetinstrumenten (b.v. schakelaars voor shunts) kan dit fou-

tieve aanwijzing tot gevolg hebben. Bij telefonie evenals bij versterkers kan het aanleiding tot ruis en kraken geven.

Een dergelijk huidje kan bij een redelijke contactdruk onder omstandigheden een spanning van enkele tientallen volt isoleren.

Bij lampjes voor kerstboomverlichting, die in serie geschakeld zijn, past men dit juist bewust toe. In de lamphuls is parallel aan de gloeidraad een geoxydeerd contact aangebracht, wat de brandspanning van het lampje (ca 16 V) kan isoleren. Brandt de gloeidraad door, dan komt de volle netspanning op het oxydelaagje te staan, waardoor dit doorslaat en een verbinding parallel aan de onderbroken gloeidraad tot stand brengt. De rest van de lampjes kan nu weer branden.

Ook in de telefoontechniek past men dit principe toe. Contacten die een zeer geringe spanning voeren geeft men een geringe hulpstroom van vrij hoge spanning (b.v. 100 V). Bij het sluiten van het contact doet deze hoge spanning het isolerende laagje doorslaan, zodat er een goed contact is ontstaan (z.g. fritterstroom).

Voor kleine contacten (contactpunten van relais e.d.) past men wel edele metalen toe, zoals zilver, platina, rhodium, iridium, goud.

§ 5. Zelfinductie

Zoals we weten ontstaat bij het transport van ladingen in een geleider in en om die geleider een magnetisch veld. Bij wisselstroom een wisselend magnetisch veld (wisselveld).

Dit eigen wisselveld wekt in de geleider zelf een inductiespanning op. De grootte van deze E.M.K. van zelfinductie hangt af van de frequentie en de *coëfficiënt van zelfinductie* van de geleider. Dit laatste wordt in de regel afgekort tot het woord „zelfinductie". Het wordt aangegeven door de letter L en uitgedrukt in de eenheid henry.

De eenheid van zelfinductie wordt als volgt gedefinieerd:

Een spoel heeft een zelfinductie van één henry, wanneer een stroomverandering van één ampère per seconde een E.M.K. van één volt opwekt.

De zelfinductie van een spoel zonder ijzer kan worden berekend uit de formule

$$L = K \times N^2 \times 10^{-8}$$

waarin

L = de coëfficiënt van zelfinductie in henry
K = de vormfactor van de spoel
N = het aantal windingen.

Hieruit volgt, dat het aantal windingen in het kwadraat in eerste instantie de zelfinductie van de spoel bepaalt.

De factor *K* is afhankelijk van de *afmetingen* van de spoel. Zo zal een spoel welke kort en dik is, een geheel andere zelfinductie vertonen dan een lange dunne spoel met een even groot aantal windingen.

Een grote toeneming van de zelfinductie kan worden bereikt door het aanbrengen van ijzer in het magnetisch veld van de spoel.

§ 6. Niet verliesvrije spoelen

Tot nu toe hebben we steeds met ideale spoelen (zelfinducties) gewerkt. In de praktijk zijn deze niet te verwezenlijken. Er treden altijd verschillende soorten verliezen op, die de werking min of meer ongunstig beïnvloeden. Sommige van deze verliezen zijn afhankelijk van de frequentie, andere soorten zijn dit niet. Frequentie-onafhankelijke verliezen treden b.v. op in de koperweerstand van de spoel (ohmse weerstand) en in de lekweerstand van het isolatiemateriaal. Frequentie-afhankelijke verliezen treden op door wervelstromen in de draden en in het eventueel aanwezige kernmateriaal. In dit laatste treden ook hysteresisverliezen op, terwijl in het isolatiemateriaal bij hoge frequenties ook nog diëlektrische verliezen optreden.

Al deze verliezen tezamen verwarmen de spoel ten koste van toegevoerde elektrische energie. We kunnen een dergelijke spoel ook vervangen denken door een ideale zelfinductie, dus zonder verliezen plus een weerstand van zodanige waarde, dat er dezelfde warmte-ontwikkeling in plaats vindt, als in de oorspronkelijke niet verliesvrije spoel onder de beschouwde omstandigheden. Deze denkbeeldige weerstand noemen we *de verliesweerstand* van de spoel. Hij zal dus altijd groter zijn dan b.v. de ohmse weerstand van de spoel alleen, omdat er veel meer factoren bij zijn inbegrepen.

Een niet verliesvrije spoel splitsen we dus in een zuivere zelfinductie, waarbij de stroom- en spanningsvectoren onderling een hoek van 90° maken en een zuivere ohmse weerstand, waarbij stroom en spanning met elkaar in fase zijn.

Deze denkbeeldige verliesweerstand kunnen we ons naar verkiezing in serie of parallel aan de spoel geschakeld denken. We spreken dan van een serie-verliesweerstand of een parallel-verliesweerstand. Voor een zelfde warmte-ontwikkeling zullen ze echter een geheel verschillende waarde hebben.

§ 7. Spoel met parallel-verliesweerstand

Wanneer een weerstand parallel aan een spoel geschakeld wordt, zoals in fig. III-5 aangegeven is, kunnen we het vectordiagram van de optredende stromen en spanningen tekenen als in fig. III-6.

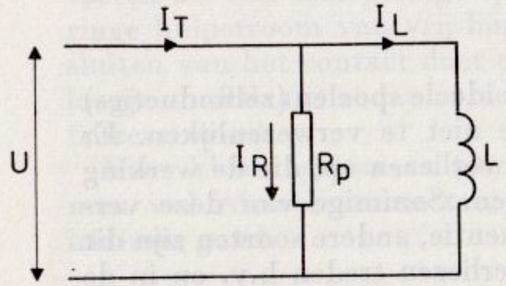


Fig. III-5

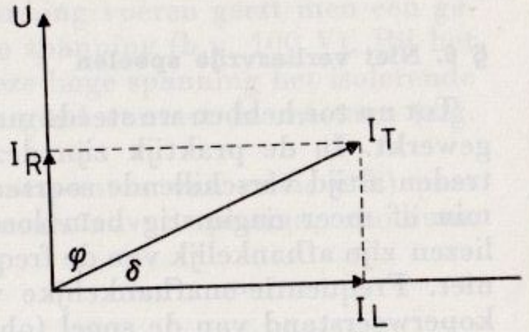


Fig. III-6

De faschoek tussen stroom en spanning is dan:

$$\cos \varphi = \frac{I_R}{I_T}$$

Zoals we weten is:

$$I_R = \frac{U}{R_p} \text{ en } I_T = \frac{U}{Z}$$

Dit ingevuld in bovenstaande formule geeft:

$$\cos \varphi = \frac{I_R}{I_T} = \frac{\frac{U}{R_p}}{\frac{U}{Z}} = \frac{U}{R_p} \times \frac{Z}{U} = \frac{Z}{R_p}$$

of:

$$\cos \varphi = \frac{Z}{R_p}$$

Maken we in bovenstaande formule R_p kleiner, dan wordt cos φ groter. Een grotere cos φ komt overeen met een kleinere hoek φ (cos φ = 1 bij φ = 0° en cos φ = 0 bij φ = 90°).

Bij kleiner worden van R_p wordt dus ook de fasehoek kleiner (U en I_T meer met elkaar in fase).

De verliezen nemen dus toe bij kleine R_p.

§ 8. Verlieshoek bij parallelschakeling

Ook in dit geval kunnen we van een verlieshoek spreken. Uit fig. III-6 volgt dat:

$$\text{tg } \delta = \frac{I_R}{I_L}$$

Bekend is dat:

$$I_R = \frac{U}{R_p} \text{ en } I_L = \frac{U}{X_L}$$

Dit geeft ingevuld:

$$\text{tg } \delta = \frac{I_R}{I_L} = \frac{\frac{U}{R_p}}{\frac{U}{X_L}} = \frac{U}{R_p} \times \frac{X_L}{U} = \frac{X_L}{R_p}$$

of:

$$\text{tg } \delta = \frac{X_L}{R_p}$$

Wordt in deze formule R_p groter, dan wordt tg δ kleiner en ook de verlieshoek δ kleiner (tg δ = 0 wanneer δ = 0 en tg φ = ∞ bij δ = 90°).

§ 9. Kwaliteitsfactor bij parallelschakeling

Wanneer de stroom door de spoel groot is t.o.v. de stroom door de weerstand, dan zullen de verliezen gering zijn. De kwaliteit van het geheel is dus goed.

We kunnen dit schrijven als volgt (zie fig. III-6):

$$\text{tg } \varphi = \frac{I_L}{I_R}$$

Wanneer we I_L vervangen door $\frac{U}{X_L}$ en I_R vervangen door $\frac{U}{R_p}$ dan vinden we:

$$\text{tg}\,\varphi = \frac{\frac{U}{X_L}}{\frac{U}{R_p}} = \frac{U}{X_L} \times \frac{R_p}{U} = \frac{R_p}{X_L}$$

$$\text{tg}\,\varphi = \frac{R_p}{X_L}$$

Deze verhouding noemen we de kwaliteitsfactor (Q).

§ 10. Spoel met serie-verliesweerstand

In fig. III-7 is een ideale spoel L voorgesteld, in serie met een weerstand R_s, waarin alle verliezen welke in de spoel zouden optreden, in warmte worden omgezet.

Het bijbehorende vectordiagram krijgt de gedaante van fig. III-8.

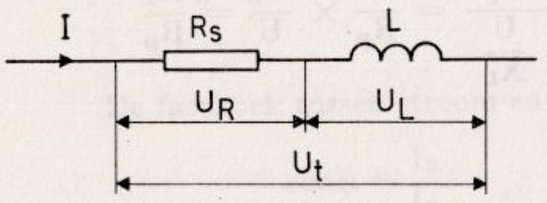


Fig.III-7

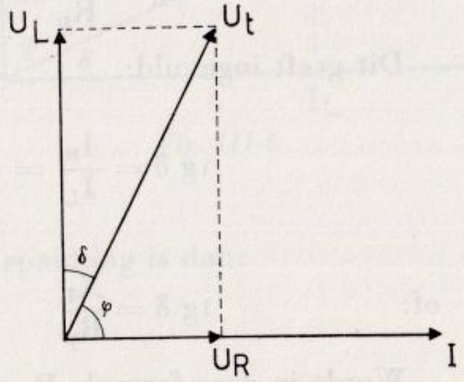


Fig.III-8

Sturen we een stroom I door de serieschakeling, dan staat het spanningsverlies U_L over de spoel 90° verschoven t.o.v. deze stroom en is het spanningsverlies over de weerstand in fase met de stroom. Door deze twee spanningsvectoren samen te stellen als in fig. III-8 is aangegeven, vinden we de totale spanning U_t. Uit de fig. blijkt, dat de hoek van faseverschuiving tussen stroom en spanning aangegeven kan worden door:

$$\cos\varphi = \frac{U_R}{U_t}$$

We weten dat:

$$U_R = RI \text{ en } U_t = ZI$$

Ingevuld in bovenstaande formule geeft dit:

$$\cos\varphi = \frac{U_R}{U_t} = \frac{R_s I}{ZI} = \frac{R_s}{Z}$$

We zien hieruit, dat hoe groter de verliezen worden, dus hoe groter R wordt t.o.v. X_L of Z, des te kleiner wordt de hoek φ (immers een grote cos φ betekent een kleine hoek φ).

§ 11. Verlieshoek bij serieschakeling

We kunnen echter ook de verhouding tussen R_s en X_L beoordelen aan de hoek δ. Deze is nl. volgens fig. III-8:

$$\text{tg}\,\delta = \frac{U_R}{U_L}$$

Daar $U_R = R_s I$ en $U_L = X_L I$

volgt, dat $$\text{tg}\,\delta = \frac{U_R}{U_L} = \frac{R_s\,I}{X_L\,I} = \frac{R_s}{X_L}$$

Omdat deze hoek de mate van de optredende verliezen aangeeft, noemen we dit de verlieshoek tg δ.

Hoe kleiner deze hoek tg δ is, des te minder zijn de optredende verliezen.

§ 12. Kwaliteitsfactor bij serieschakeling

Bij spoelen is het meer gebruikelijk om de kwaliteitsfactor op te geven, wanneer men aan wil duiden, hoe de verhouding tussen de schijnbare weerstand en de verliesweerstand is. Deze kwaliteitsfactor wordt door Q voorgesteld en volgt ook uit fig. III-8 nl.:

$$Q = \text{tg}\,\delta = \frac{X_L}{R_s}$$

Hoe groter Q, des te minder zijn de optredende verliezen en des te beter is de spoel.

Opmerking:

Daar X_L afhankelijk is van de frequentie (immers $X = 2\pi fL$) zal ook de verlieshoek en de kwaliteitsfactor daarvan afhangen en dient er dus te worden opgegeven, voor welke frequentie deze gelden.

§ 13. Het inschakelverschijnsel bij een zelfinductie

Sluiten we een spoel aan op een gelijkspanning, dan zal de stroom door de spoel slechts langzaam de waarde bereiken, die uit de wet van ohm volgt. Begint er nl. een stroom te vloeien, dan ontstaat er ook een magnetisch veld. Dit aangroeiende veld wekt in de spoel een tegen-E.M.K. op (Wet van Lenz).

Het verschil tussen de aangelegde spanning en de tegen-E.M.K. bepaalt nu de grootte van de stroom. Men kan ook als volgt redeneren: Om een bepaalde tegen-E.M.K. te krijgen (die nooit groter kan zijn dan de aangelegde spanning) is een zekere veldverandering nodig en dus een daarbij behorende stroomtoename.

In fig. III-9 is dit langzaam toenemen van de stroom bij het inschakelen van een spoel voorgesteld.

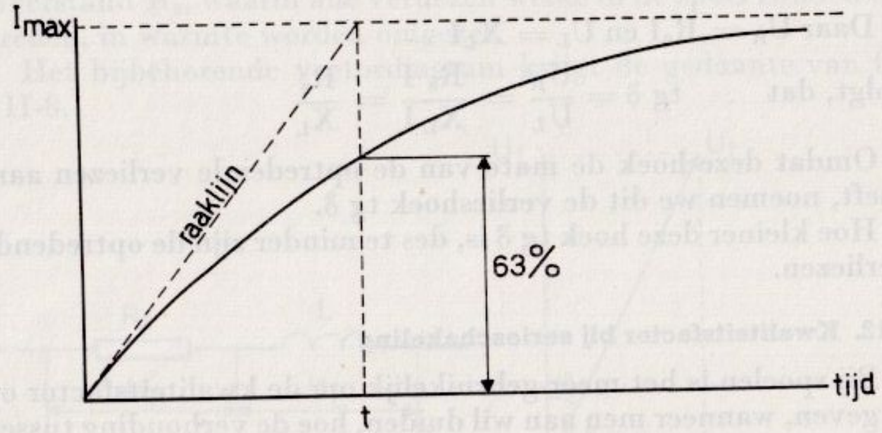


Fig. III-9

De tijd welke nodig is om 63% van de maximale stroom te bereiken, wordt de tijdconstante van de spoel genoemd.

We weten, dat elke spoel behalve zelfinductie ook ohmse weerstand heeft. De tijdconstante kan worden berekend uit de formule

$$t = \frac{L}{R}$$

waarin is:

t de tijdconstante in sec.
L zelfinductie van de spoel in henry
R serie-verliesweerstand in ohm.

§ 14. Uitschakelverschijnselen bij een zelfinductie

In fig. III-10 is een zelfinductie L weergegeven, aangesloten op een batterij B. Tengevolge van de klemspanning U_B loopt er een stroom I_L door de spoel. Deze stroom I_L veroorzaakt in de spoel een magnetisch veld. Laten wij dit magnetisch veld verdwijnen door de stroom langzaam te verminderen door een schuifweerstand of snel verdwijnen, door het contact C te openen, dan houdt de stroom tijdens het afnemen van het veld voortdurend dezelfde richting door de spoel. Ook bij het plotseling openen van het contact C zal de stroom de oorspronkelijke richting willen behouden.

Tengevolge van het veranderen, hier afnemen, van het magnetisch veld, wordt er een spanning in de spoel opgewekt, waarvan de richting in overeenstemming is met de stroomrichting door de spoel. Deze spanning is in fig. 10 als E.M.K. gestippeld aangegeven en staat tegengesteld aan de batterijspanning U_B (getrokken pijl).

De grootte van de opgewekte spanning wordt bepaald door de snelheid waarmede het veld verdwijnt. (Zie dl. I.) Bij enigszins grote zelfinducties kunnen bij het plotseling uitschakelen gemakkelijk spanningen van vele duizenden volt ontstaan. Door deze hoge spanningen wordt de eerst nog geringe contactopening overbrugd, waardoor de lucht tussen de contacten ioniseert en een vlamboog ontstaat. Vooral bij grotere vermogens is een dergelijke lichtboog moeilijk te blussen (vonkenschotten, blaasmagneten e.d.). Ook betekent deze hoge spanning een gevaar voor de isolatie van de spoel (doorslag of overslag).

Om het optreden van deze hoge spanning te voorkomen, wordt wel een weerstand parallel aan de spoel geschakeld. Heeft de spoel dezelfde ohmse weerstand als de hieraan parallel geschakelde weerstand R, dan zal bij het verbreken van het contact de stroom i_L (in het eerste ogenblik gelijk aan de waarde voor het uitschakelen) door R vloeien. De spanning aan de spoel wordt dan niet groter dan de oorspronkelijke batterijspanning, n.l. $R \times I_L$. Merk op, dat de stroomrichting in de weerstand is omgekeerd, terwijl de stroomrichting in de spoel dezelfde is gebleven.

De hoge spanningen, die bij het plotseling verdwijnen van het magnetisch veld in een spoel kunnen ontstaan, vinden ook diverse nuttige toepassingen. Zo wordt langs deze weg de ontstekingsvonk aan de bougies van benzinemotoren verkregen. De spanning bedraagt ca. 15 kV.

Bij TL-buizen wordt tijdens het starten ook van dit principe gebruik gemaakt om de buis te doen ontsteken (ca. 500 V). In televisie-apparaten wordt op deze manier wel de hoogspanning opgewekt van ca. 20 kV, nodig voor de anodespanning voor de TV-beeldbuis.

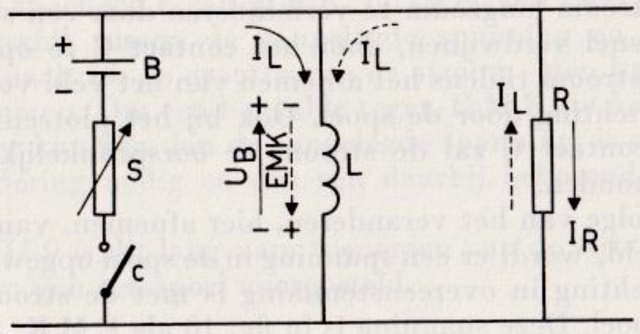


Fig. III-10

Hierin is:

U_B batterijspanning
I_{LB} batterijstroom door de spoel
E.M.K. de in de spoel opgewekte spanning t.g.v. het verdwijnende veld
I_R batterijstroom door de weerstand R
I_L de door de in de spoel opgewekte E.M.K. onderhouden stroom ($I_L = I_R$).

Opgaven

(Raadpleeg zonodig deel I der V.E.V. handleiding)

5. Beschrijf in het kort het ontstaan van de E.M.K. van zelfinductie in een spoel.
6. Beschrijf in het kort het stroomverloop in de spoel bij aansluiting op een wisselspanning en verwaarlozing van de weerstand.
7. Wat verstaan we onder de coëfficiënt van zelfinductie?
8. Verklaar waarom de inductieve weerstand van een spoel evenredig is met de frequentie.
9. Vertel iets van het meetkundig verband tussen Z, R en $2\pi fL$.

HOOFDSTUK IV

HALFGELEIDERS

§ 1. De bouw van halfgeleiders

In het voorafgaande bestudeerden we het ladingstransport in elektrolyten en geleiders. Nu beschouwen we het ladingstransport in vaste halfgeleiders en enkele voor ons doel belangrijke verschijnselen, welke zich daarbij voordoen. Reeds eerder werd aangegeven, dat van halfgeleidende stoffen de soortelijke weerstand een waarde heeft, welke ligt tussen ongeveer 50 en 6×10^8 ohm per meter per mm^2. Het energieverlies tijdens het transport zal dus hoog zijn in vergelijking met het verlies in geleiders.

In tegenstelling tot geleiders, waarin het transport in de regel door elektronen, en tot elektrolyten, waarbij dit in de regel door ionen geschiedt, vindt het ladingstransport bij halfgeleiders, afhankelijk van de materiaalsoort, plaats door negatief geladen elektronen of door positieve ladingen, die „gaten" worden genoemd.

Een volledige verklaring van deze verschijnselen zou in dit boek te ver voeren. Om echter enigszins een indruk te krijgen hoe het ladingstransport bij en de typische verschijnselen in halfgeleiders (b.v. gelijkrichting) ontstaan, moge de volgende beschouwing dienen.

Het kenmerk van een halfgeleider — hierbij wordt dan onder een halfgeleider verstaan een halfgeleidend materiaal, dat speciaal voor dit doel is geprepareerd (dus geen nat hout b.v.) — is, dat de atomen van dit materiaal gewoonlijk op een „nette" manier zijn gerangschikt, dus min of meer volgens een kristalrooster zijn opgebouwd. Lees hierover hoofdstuk III § 1 nog eens na. Een tweede eigenschap van een halfgeleider is, dat de elektronen, in tegenstelling tot die bij geleiders, betrekkelijk vast aan het atoom verbonden zijn en dus moeilijk door het materiaal kunnen heen en weer bewegen. Dit hangt ook weer samen met de kristalstructuur van de halfgeleiders.

Ter verklaring diene fig. IV-1, waarin schematisch de opbouw van een germaniumatoom is gegeven. Germanium is een stof, die veel bij halfgeleiders wordt toegepast.

Het atoom van germanium bevat 32 elektronen, waarvan er

28 sterk aan het atoom zijn verbonden, doordat ze zich in volledig gevulde banen om de atoomkern bewegen. De 4 overige elektronen, die zich in de niet gevulde buitenste baan bevinden, zijn veel minder sterk met de kern verbonden.

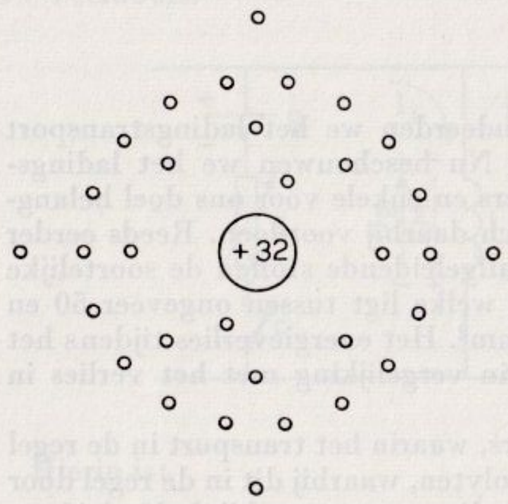


Fig. IV-1

Deze 4 elektronen, de z.g. valentie-elektronen, bepalen de opbouw van het kristal.

Zouden nl. b.v. 4 germaniumatomen naast elkaar worden gelegd (zie fig. IV-2) dan zullen meteen een valentie-elektron van het ene atoom met een valentie-elektron van het andere elektron op elkaar dusdanig inwerken, dat ze elkaar min of meer gaan „vasthouden". Dit vasthouden heet: „covalente binding".

Deze vaste binding van de elektronen in een goed geordend zuiver kristal heeft tot consequentie een betrekkelijk slechte geleiding van dit materiaal.

Een dergelijk kristal is echter geen volkomen isolator, omdat er door invloeden van buitenaf wel eens een elektronenpaar uit elkaar kan worden geslagen. Hierbij ontstaan dan twee elektronen, die dan betrekkelijk vrij door het materiaal kunnen bewegen, totdat ze op een gegeven ogenblik weer door een andere open gevallen plaats in de buitenste baan van een atoom worden opgenomen. Deze vrije beweging van de elektronen dragen vanzelfsprekend bij tot de geleiding van elektriciteit van het materiaal. Uit bovenstaande beschouwing blijkt ook, dat de geleiding toeneemt bij toenemende temperatuur (de weerstand neemt af bij hoger wordende temperatuur).

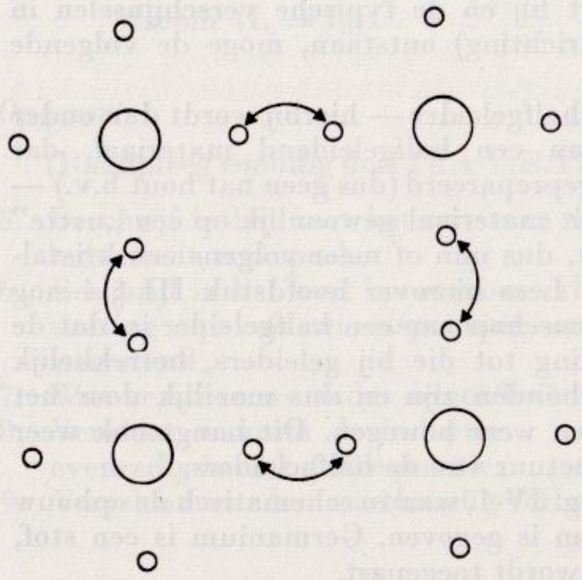


Fig. IV-2

We zullen onze beschouwing over het geleidingsvermogen van halfgeleiders nu voortzetten met een uitbreiding van de theorie, welke voor het begrip van de verdere effecten, die in halfgeleiders optreden, nodig is. Hiertoe gaan we weer uit van het kristalrooster. Nemen we aan, dat in het „zuivere" germanium kristalrooster van fig. IV-3 een atoom van een andere stelling wordt aangebracht.

Nemen we verder aan, dat dit atoom in zijn buitenbaan één elektron meer heeft dan het germaniumatoom (een dergelijk atoom is b.v. een arsenicumatoom).

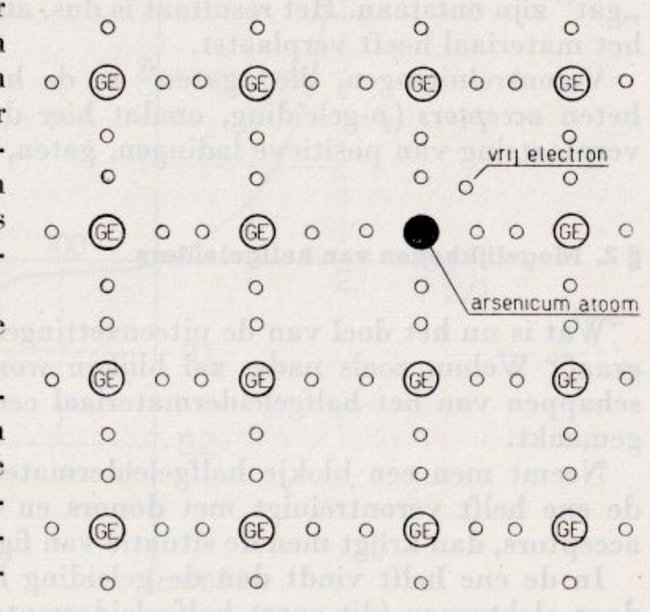


Fig. IV-3

Er ontstaat dan de volgende toestand:

Van de vijf valentie-elektronen zullen er vier een covalente binding met de elektronen van de buuratomen in het germanium aangaan.

Deze vier elektronen zullen dus weer betrekkelijk vast aan hun plaats zijn gebonden.

Het vijfde elektron heeft echter geen enkele reden om op zijn plaats te blijven; het wordt niet vastgehouden en kan zich vrij bewegen.

Het resultaat is, dat de geleiding van het materiaal door deze zeer kleine verontreiniging belangrijk is toegenomen. Dit laatste dus ten gevolge van het feit, dat door de toevoeging van het arsenicumatoom een elektron geen enkele vaste plaats in het kristalrooster kan vinden en dus willekeurig door het materiaal kan bewegen.

Verontreinigingsstoffen, zoals arsenicum, die vrije elektronen in de halfgeleider brengen, heten *donors* (*n*-geleiding, omdat de geleiding door negatief geladen elektronen plaatsvindt).

Ongeveer dezelfde toestand, alhoewel iets moeilijker te begrijpen, treedt op, wanneer het verontreinigende atoom geen vijf, doch slechts drie elektronen in de buitenbaan heeft (een dergelijke stof is gallium of indium). In dat geval heeft de buitenbaan van het atoom een elektron te kort om zich te verbinden met de germanium-buuratomen. Zo'n open plaats in een kristalrooster heet een „gat".

Zo gauw één of ander zwervend elektron in de buurt van dit „gat" komt, „valt" het er in, waardoor weer een covalente binding is ontstaan. Nu moet er echter op een andere plaats een „gat" zijn ontstaan. Het resultaat is dus, alsof het gat zich door het materiaal heeft verplaatst.

Verontreinigingen, die „gaten" in de halfgeleider brengen, heten *acceptors* (*p*-geleiding, omdat hier de geleiding door de verplaatsing van positieve ladingen, gaten, plaatsvindt).

§ 2. Mogelijkheden van halfgeleiders

Wat is nu het doel van de uiteenzettingen in de vorige paragraaf? Welnu, zoals nader zal blijken wordt van deze eigenschappen van het halfgeleidermateriaal een dankbaar gebruik gemaakt.

Neemt men een blokje halfgeleidermateriaal, waarvan men de ene helft verontreinigt met donors en de andere helft met acceptors, dan krijgt men de situatie van fig. IV-4.

In de ene helft vindt dan de geleiding hoofdzakelijk plaats door elektronen (dit soort halfgeleidermateriaal heet *n-materiaal*) terwijl deze in de andere helft hoofdzakelijk door „gaten" (positieve ladingen) wordt veroorzaakt (*p-materiaal*).

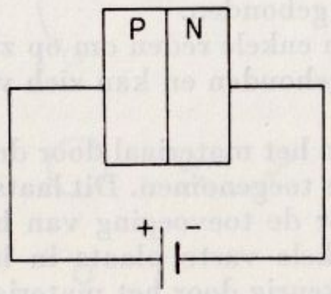


Fig. IV-4

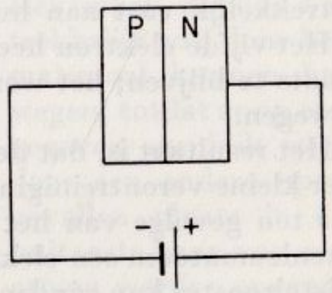


Fig. IV-5

Het blijkt nl., dat, indien op het plaatje van p-materiaal een positieve spanning t.o.v. de plaat van n-materiaal wordt aangesloten, de stroom een betrekkelijk kleine weerstand ondervindt en er dus een grote stroom zal vloeien.

Wordt de spanningsbron daarentegen omgekeerd aangesloten (zie fig. IV-5), dan zal er slechts een zeer kleine stroom vloeien.

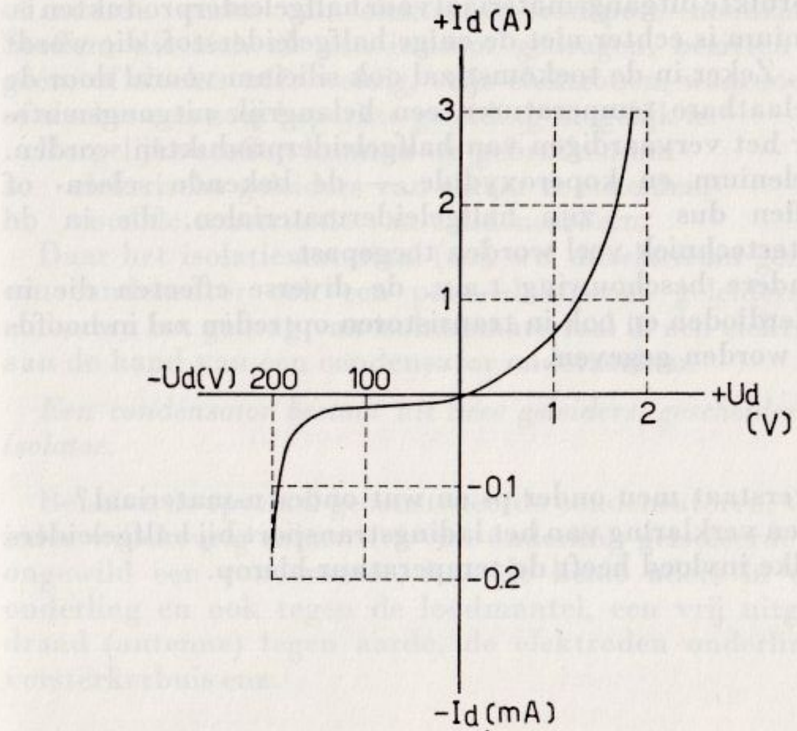


Fig. IV-6

Het gelijkrichtend effect, dat hier in het kort beschreven is, wordt bewerkstelligd, door de contactlaag of grenslaag tussen het plaatje p-materiaal en het plaatje n-materiaal.

Deze grenslaag, die dus een belangrijke rol speelt in de verschijnselen, die optreden bij halfgeleiderdioden en zoals we in hoofdstuk XII zullen zien ook bij de transistor, heet de p-n grenslaag (p-n junction).

In fig. IV-6 is de karakteristiek van een praktische halfgeleiderdiode gegeven.

Op het eerste gezicht lijkt dit geen goede diode te zijn.

Wanneer men echter de spanning- en stroomschaal in het positieve gebied vergelijkt met die in het negatieve gebied, dan ziet men inderdaad dat er een groot verschil bestaat in beide gebieden.

In dit hoofdstuk is een beschouwing gegeven over de geleiding in halfgeleiders.

Het uitgangspunt bij deze beschouwingen was de geleiding in het materiaal germanium, omdat dit materiaal tot nu toe het meest gebruikte uitgangsmateriaal voor halfgeleiderprodukten is.

Germanium is echter niet de enige halfgeleiderstof, die wordt toegepast. Zeker in de toekomst zal ook silicium vooral door de hoger toelaatbare temperaturen een belangrijk uitgangsmateriaal voor het vervaardigen van halfgeleiderprodukten worden.

Ook selenium en koperoxydule — de bekende seleen- of cuproxcellen dus — zijn halfgeleidermaterialen, die in de gelijkrichtertechniek veel worden toegepast.

Een nadere beschouwing t.a.v. de diverse effecten die in halfgeleiderdioden en ook in transistoren optreden zal in hoofdstuk XII worden gegeven.

Opgaven

1. Wat verstaat men onder p- en wat onder n-materiaal?
2. Geef een verklaring van het ladingstransport bij halfgeleiders en welke invloed heeft de temperatuur hierop.

HOOFDSTUK V

ISOLATIEMATERIALEN IN CONDENSATOREN

§ 1. Isolatiematerialen

Uit de vorige beschouwingen bleek, dat voor geleiding één of andere vorm van elektronen-transport noodzakelijk is. Stoffen, die zich als een isolator gedragen, bezitten dan ook géén, of slechts zéér weinig, vrije elektronen, waardoor er géén of slechts een zeer beperkte geleiding mogelijk is.

Dergelijke stoffen kunnen we gebruiken om

a. elektrische geleiders van elkaar te scheiden,
b. voor de constructie van condensatoren.

Daar het isolatiemateriaal (ook wel *diëlektricum* genoemd) in een condensator ook een paar elektrische geleiders scheidt, zullen we het gedrag van isolatiemateriaal in een elektrisch veld aan de hand van een condensator onderzoeken.

Een condensator bestaat uit twee geleiders, gescheiden door een isolator.

Behalve de speciaal geconstrueerde condensatoren, vormt ook ieder willekeurig samenstel van onderling geïsoleerde geleiders ongewild een condensator, b.v. de beide aders in een kabel onderling en ook tegen de loodmantel, een vrij uitgespannen draad (antenne) tegen aarde, de elektroden onderling in een versterkerbuis enz.

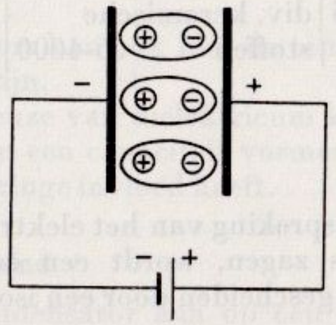


Fig. V-1

In isolatiemateriaal zijn de elektronen aan de kern gebonden en kunnen het atoom niet verlaten, hoewel zij wel bewegingen om de kern kunnen uitvoeren.

Legt men een gelijkspanning aan tussen de beide geleiders van een condensator (zie fig. V-1) dan zullen de elektronen een kracht ondervinden in de richting van de positieve pool. Hierdoor zal in de atomen toch een verschuiving van de elektronen in de positieve richting plaatsvinden.

Het is dus alsof ieder atoom een positieve en negatieve zijde gekregen heeft en alle negatieve kanten naar de pluspool gekeerd zijn (en dan natuurlijk de positieve kanten in de richting van de minpool liggen).

Wordt de spanning te hoog opgevoerd, dan ontstaat tenslotte toch, het eerst op de zwakste plek, ionisatie en dus geleiding. Het isolatiemateriaal „slaat door" (doorslagspanning). Een geringe stroom zal door de hoge spanning op de plaats van doorslag toch reeds een groot vermogen vertegenwoordigen en dus een aanmerkelijke warmteontwikkeling geven, waardoor het isolatiemateriaal ter plaatse van de doorslag vernield wordt.

§ 2. Diëlektrische constante

Meten we een condensator zonder isolatiemateriaal tussen de platen in vacuum en brengen we daarna een diëlektricum aan, dan blijkt de capaciteit groter te zijn geworden.

Het aantal malen dat de capaciteit groter is geworden, tengevolge van dit isolatiemateriaal, noemen we de diëlektrische constante van dit materiaal.

Diëlektrische constante van enige stoffen:

lucht 1,0	mica 6,5	glas 5-16,5
olie 2,5	porselein . . . 6	polytheen . . . 2,25
papier 2,5	div. keramische	polystyreen . . 2,55
hardpapier . . . 5	stoffen . . . 6-4000	polyvinylchloride 3,2

§ 3. De condensator

Zoals we bij de bespreking van het elektrische gedrag van isolatiemateriaal reeds zagen, wordt een condensator gevormd door twee geleiders, gescheiden door een isolator, ook wel diëlektricum genoemd.

De eenvoudigste vorm van een condensator bestaat uit twee vlakke en evenwijdige platen, waartussen zich een isolerende stof bevindt.

De capaciteit van een dergelijke condensator kunnen we bekenen uit de formule:

$$C = 1{,}1\,\frac{\varepsilon\,A}{4\pi\,d} \text{ of } C = 0{,}088\,\frac{\varepsilon\,A}{d}$$

Hierin is:
C de capaciteit van de condensator in pF,
ε de diëlektrische constante,
A het werkzame oppervlak van de elektroden in cm^2,
d de afstand tussen de platen in cm.

De eenheid van capaciteit is de farad.

Eén farad is de capaciteit van een condensator, die bij een spanning van 1 volt een lading heeft van 1 coulomb.

De eenheid farad is voor praktisch gebruik véél te groot. Men gebruikt daarom normaal de volgende eenheden:

μF	micro farad	10^{-6}F
nF	nano farad	10^{-9}F of mμF of kpF
pF	pico farad	10^{-12}F of μμF
mpF	milli-pico farad	10^{-15}F

§ 4. Temperatuurscoëfficiënt

Zowel de afmetingen van een condensator als de diëlektrische constante van het isolatiemateriaal zijn van de temperatuur afhankelijk, zodat ook de capaciteit van een condensator van de temperatuur afhankelijk is.

De capaciteitstoename per pF en per °C noemen we de temperatuurscoëfficiënt.

Evenals bij geleiders kan ook hier de temperatuurscoëfficiënt positief of negatief zijn.

Door een juiste keuze van diëlektricum kunnen verschillende condensatoren samen een capaciteit vormen, waarop de temperatuur slechts een geringe invloed heeft.

§ 5. Schijnbare weerstand

Sluiten we de condensator aan op een wisselspanning, dan bedraagt de schijnbare weerstand:

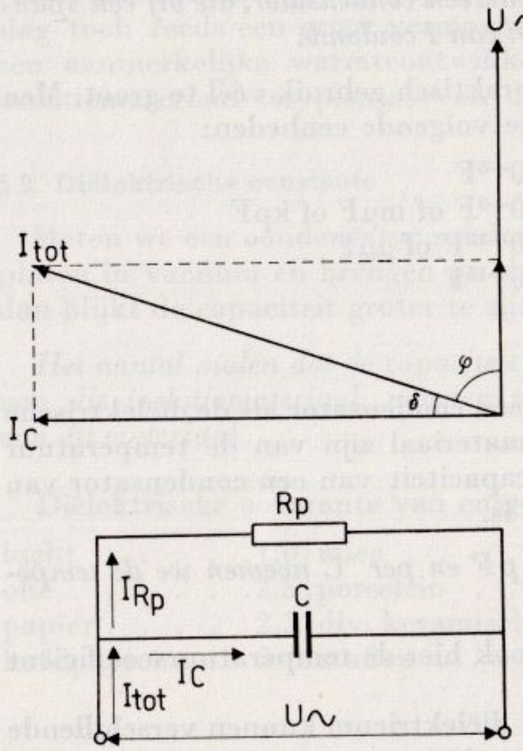
$$X_c = \frac{1}{\omega\,C} \text{ of } X_c = \frac{1}{2\pi\,f\,C}$$

Hierin is:

X_c de schijnbare weerstand in ohm,
C de capaciteit van de condensator in farad,
ω de cirkelfrequentie van de wisselspanning ($2\pi f$),
f de frequentie van de wisselspanning in hertz.

§ 6. De niet verliesvrije condensator

Daar geleiders altijd enige weerstand bezitten en isolatoren ook nooit volkomen isoleren, zal in een condensator altijd enig verlies optreden. Deze verliezen kunnen optreden in een serieweerstand (b.v. de toevoerdraden en de weerstand van de elektroden) en in een parallelweerstand (isolatielek e.d.). Ook het verschuiven van de elektronen in het diëlektricum kost arbeid en is dus uit te drukken in een verliesweerstand, de z.g. *diëlektrische verliezen*. Inde praktijk worden de verliezen in een condensator gevormd door een combinatie van serie- en parallelweerstanden. Om het ons bij berekeningen en metingen gemakkelijk te maken, denken we ons altijd alle verliezen tezamen geconcentreerd in één weerstand, welke we naar verkiezing in een serie- of als een parallelweerstand uitdrukken.



$$\operatorname{tg}\delta = \frac{I_{Rp}}{I_C} = \frac{X_C}{R_p}$$

Fig. V-2

In al deze gevallen treedt energieverlies op en ontstaat er een faseverschuiving tussen stroom en spanning. Zoals we reeds weten, is voor een zuivere capaciteit de faschoek tussen stroom

§ 7. Condensator met parallel-verliesweerstand

We kunnen ons de faseverschuiving van een niet verliesvrije condensator ontstaan denken, door alle verliezen in een parallelweerstand geconcentreerd voor te stellen, zoals ook in fig. V-2 is aangegeven.

De verliesstroom I_{R_p} loopt dan door R_p, de zuivere capacitieve stroom I_C door C.

Voor een normale condensator zal I_{R_p} steeds klein zijn ten opzichte van de stroom I_C.

Hoe groter de verhouding is tussen I_C en I_{R_p}, des te beter is de *kwaliteit* van de condensator en des te kleiner is het hoekje, dat we de *verlieshoek* noemen.

Uit fig. V-2 volgt dat:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{I_{R_p}}{I_C}$$

We weten reeds, dat:

$$I_R = \frac{U}{R_p} \text{ en } I_C = \frac{U}{X_C}$$

Dit geeft ingevuld in de bovenstaande formule:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\frac{U}{R_p}}{\frac{U}{X_C}} = \frac{U}{R_p} \times \frac{X_C}{U} = \frac{X_C}{R_p}$$

Bij een goede condensator zal de verlieshoek slechts klein zijn, b.v. 0,01, dus zal I_{tot} nagenoeg gelijk zijn aan I_C. De schijnbare weerstand Z zal dus ook praktisch gelijk zijn aan de X_C. In dat geval mogen we ook zonder een al te grote fout te maken zeggen dat:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{Z_C}{R_p}$$

§ 8. Condensatoren met serie-verliesweerstand

In fig. V-3 is aangenomen dat alle verliezen worden veroorzaakt door de serieweerstand R_s; de spanning over de weerstand zal bij een goede condensator belangrijk kleiner zijn dan de spanning over de condensator.

Uit fig. V-3 volgt nu:

$$\text{tg } \delta = \frac{U_{R_s}}{U_C}$$

Nu is

$$U_{R_s} = R_s \times I \text{ en } U_C = X_C \times I$$

Ingevuld in bovenstaande formule:

$$\text{tg } \delta = \frac{R_S \times I}{X_C \times I} = \frac{R_s}{X_C} = \frac{R_s}{\frac{1}{\omega C}} = R_S \times \omega C$$

Bij een gunstige tg δ (b.v. 0,01) kunnen we X_C weer praktisch gelijk stellen aan Z, waardoor

$$\text{tg } \delta = \frac{R_S}{Z_C} \text{ bij een verliesarme condensator.}$$

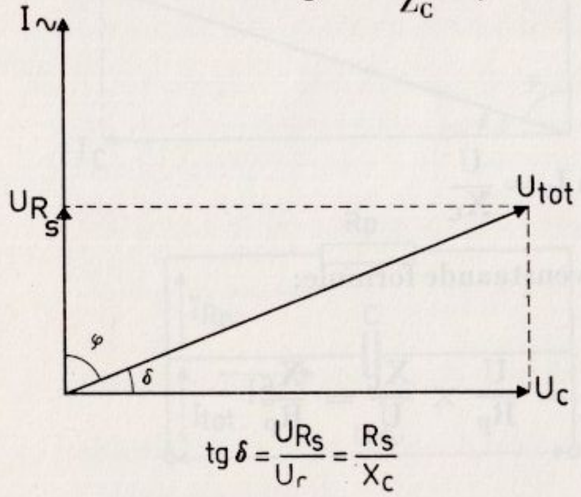


Fig. V-3a

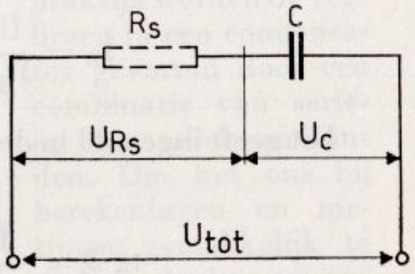


Fig. V-3b

§ 9. Het omzetten van een serie-verliesweerstand in een parallel-verliesweerstand

Vergelijken we de resultaten die we verkrijgen bij een condensator met serie-verliesweerstand en een condensator met parallel-weerstand, dan merken we op, dat bij een kleine verlieshoek (tg δ), de serie-weerstand klein zal zijn, de parallel-weerstand echter juist groot.

Voor een bepaalde condensator met een gegeven verlieshoek kunnen we dan ook naar verkiezing de verliesweerstand als een zekere serieweerstand of als een parallel-weerstand opgeven.

Voorbeeld:

We meten bij een condensator van 32 μF een serie-verlies-weerstand van 2 ohm. Gevraagd wordt nu welke parallel-weerstand dezelfde verliezen doet ontstaan. Gemeten is met 50 Hz.

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2 \,.\, 3{,}14 \,.\, 50 \,.\, 32 \,.\, 10^{-6}}$$

$$X_C = 100 \ \Omega$$

$$\text{tg } \delta = \frac{X_C}{R_p} = \frac{R_s}{X_C}$$

$$R_p = \frac{(X_C)^2}{R_s}$$

$$R_p = \frac{100^2}{2} = 5\,000\ \Omega$$

Een serieweerstand van 2 ohm komt in dit geval dus overeen met een parallelweerstand van 5 000 ohm. In beide gevallen bedraagt tg δ 0,02.

§ 10. Het laden van een condensator over een weerstand

Wanneer een condensator in serie met een weerstand op een gelijkspanning wordt aangesloten, zal de spanning aan de condensator eerst snel, dan steeds langzamer toenemen.

Omdat het spanningsverschil tussen de batterij en de condensatorspanning voortdurend kleiner wordt, zal de laadstroom door de weerstand ook kleiner worden, zodat het steeds langer gaat duren, voordat een bepaalde hoeveelheid elektriciteit aan de condensator toegevoerd is. Theoretisch zal daardoor de condensatorspanning zelfs nooit gelijk kunnen worden aan de batterijspanning.

Het verloop van dit opladen is in fig. V-4 grafisch weergegeven.

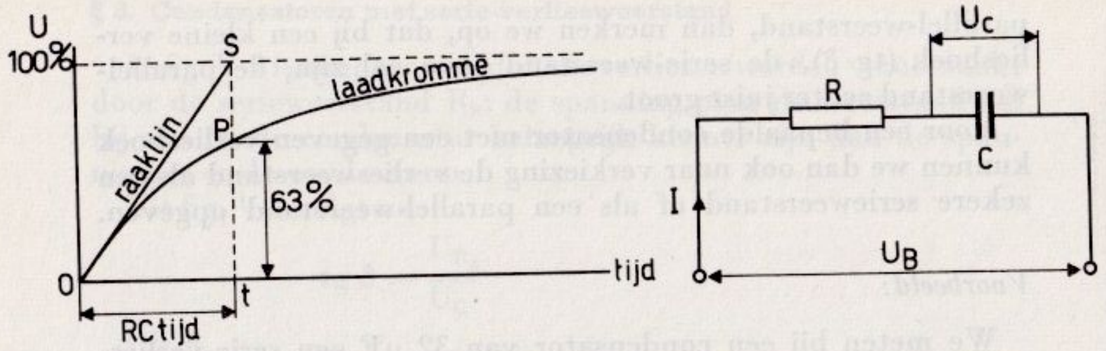


Fig. V-4a

Fig. V-4b

Trekken we vanuit de oorsprong de raaklijn aan de laadkromme en laten we vanuit het snijpunt S met de batterijspanning een loodlijn neer, dan blijkt de condensatorspanning een waarde van 63% van de batterijspanning bereikt te hebben.

De laadtijd t die nodig is om deze waarde van 63% te bereiken blijkt te zijn:

$$t = R \times C$$

t in seconde,
R in ohm,
C in farad.

Deze tijd noemen we naar de formule de RC-tijd van de condensator met weerstand.

Voor de berekeningen met deze formule is het meestal gemakkelijk om de weerstand in megohm en de capaciteit in micro farad in te vullen.

§ 11. Het ontladen van een condensator over een weerstand

Wordt een condensator over een weerstand ontladen, dan zal in het begin de ontlading door de hoge condensatorspanning snel geschieden, maar bij het steeds meer dalen van de spanning zal ook de ontlaadstroom voortdurend kleiner worden. Daardoor duurt het steeds langer, voordat de spanning weer met een zelfde hoeveelheid is verminderd. Theoretisch zal de condensator zelfs nooit geheel ontladen worden.

Het verloop van dit ontladen is in fig. V-5 grafisch weergegeven.

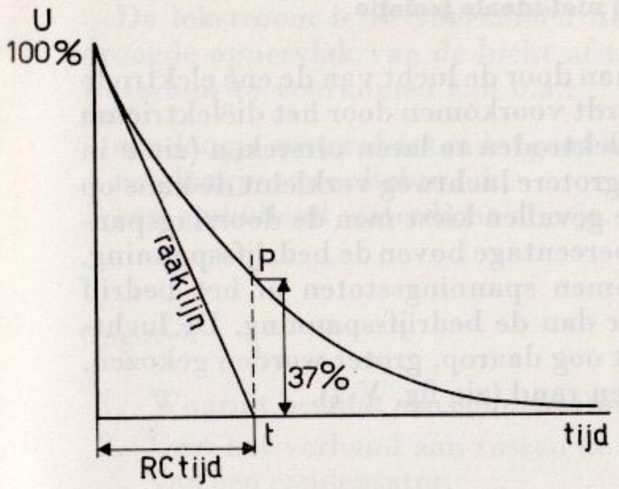


Fig. V-5a

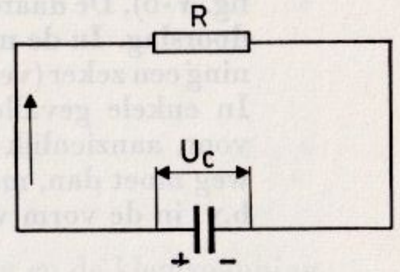


Fig. V-5b

Trekken we weer de raaklijn aan de ontlaadkromme, dan geeft het snijpunt met de tijdas de tijd aan, waarbij de condensator ontladen wordt tot op 37% van de oorspronkelijke spanning.

Deze tijd noemen we weer de RC-tijd van de condensator met weerstand, omdat bij 37% van de spanning weer geldt:

$$t = R \times C$$

t in seconde,
C in farad,
R in ohm.

§ 12. Kortsluiten van een geladen condensator

Sluiten we een geladen condensator kort om deze te ontladen, dan zal de condensatorlading zich over een zeer geringe weerstand vereffenen, nl. alleen over de inwendige serieweerstand van de condensator, de weerstand van de verbindingsdraad en de overgangsweerstand van het contact. In de regel kunnen we deze totale weerstand op een fractie van een ohm stellen, vooral bij een goede condensator (lage tg δ).

Het gevolg is, dat bij kortsluiten een ontlaadstroom kan vloeien, die honderden ampère bedraagt. Hoewel deze stroom maar kortstondig vloeit, is het niet te verwonderen, dat de toevoerdraadjes of het dunne condensatorbekleedsel doorbranden.

Een grote papiercondensator dient steeds over een weerstand te worden ontladen!

§ 13. Enige verschijnselen bij niet-ideale isolatie

a. Er kan doorslag ontstaan door de lucht van de ene elektrode naar de andere. Dit wordt voorkomen door het diëlektricum voldoende buiten de elektroden te laten uitsteken (zie *a* in fig. V-6). De daardoor grotere luchtweg verkleint de kans op doorslag. In de meeste gevallen kiest men de doorslagspanning een zeker (veilig) percentage boven de bedrijfsspanning. In enkele gevallen komen spanningsstoten in het bedrijf voor, aanzienlijk hoger dan de bedrijfsspanning. De luchtweg moet dan, met het oog daarop, groter worden gekozen, b.v. in de vorm van een rand (zie fig. V-7).

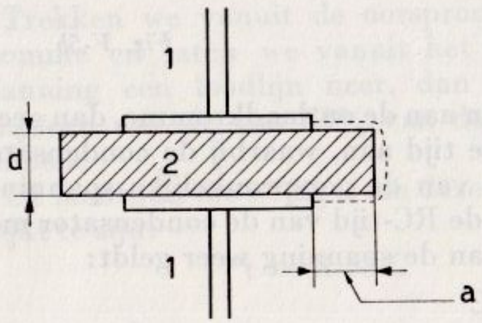


Fig. V-6

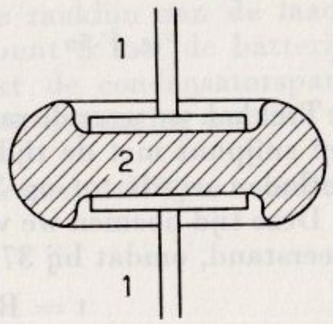


Fig. V-7

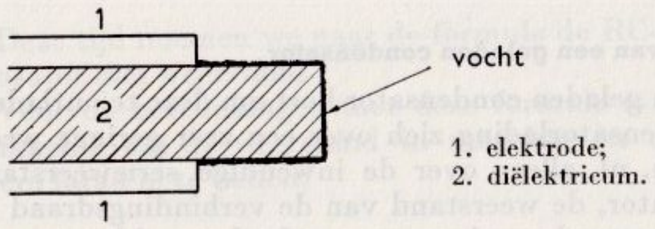


Fig. V-8

b. Verschillende isolerende stoffen, o.a. glas, trekken water aan uit de omringende lucht. De oppervlakte is dan omgeven door een dun huidje water. Van het oppervlak lossen moleculen op in het water, waarna zij in ionen uiteenvallen. Dit betekent, dat het huidje half-geleidend wordt, waardoor een lek- of kruipstroom ontstaat (zie fig. V-8). De lekstroom kan worden verkleind door de kruipweg te vergroten.

De lekstroom is te voorkomen door het vooraf grondig gedroogde oppervlak van de lucht af te sluiten. Middelen om een waterfilm te voorkomen zijn o.a.:

een laagje waterafstotende (goed isolerende) was,
een laagje waterdichte lak,
een omhullend waterdicht doosje.

Opgaven

1. Waaruit bestaat een condensator?
2. Geef het verband aan tussen de lading en de klemspanning van een condensator.
3. Wat verstaat men onder de capaciteit van een condensator?
4. Geef in het kort aan welke elektrische verschijnselen zich in een condensator voordoen na aansluiting op een wisselspanning.
5. Enige condensatoren worden parallel geschakeld. Hoe groot is de capaciteit?
6. Enige condensatoren worden in serie geschakeld. Hoe groot is de capaciteit?
7. Tussen de platen van een luchtcondensator wordt een dielektricum geplaatst met een constante van 4. Geef aan wat er gebeurt.
8. Een condensator wordt aangesloten op een frequentie zodanig, dat $Z = 10\,000$ ohm. Voor de verhouding tg δ wordt dan 10^{-4} gemeten. De capaciteit is 10^{-10} F. Bereken de frequentie en de parallelverliesweerstand R_p van de condensator.
9. Van een condensator meet men een serieverliesweerstand $R_s = 100$ ohm en een capaciteit van 10^{-10} F. De waarde van $Z_C = 10\,000$ ohm. Bereken tg δ.
   Hoeveel zal in de vraagstukken 8 en 9 tg δ bedragen voor 1 592 Hz?
10. Bewijs, dat voor een serieschakeling van een verliesvrije condensator C en een ohmse weerstand R_s geldt: tg $\delta = R_s \times \omega C$.
    Idem voor een parallelschakeling van een verliesvrije condensator en een ohmse weerstand R_p geldt: tg $\delta = \dfrac{1}{R_p \omega C}$.

Vertel in het kort iets van de volgende onderwerpen:

11. Het doorslagverschijnsel.
12. Het voorkomen van lekstromen over het oppervlak van isolerende stoffen.
13. De invloed van de temperatuur op de capaciteitswaarde van een condensator.

Herhalings-opgaven

(Raadpleeg zonodig deel I der V.E.V.-handleiding)

1. Wat is de oorzaak van verplaatsing van elektriciteit? Welke eenheid gebruiken we daarvoor?
2. Geef in een voorbeeld aan, waarom er arbeid nodig is om elektriciteit te verplaatsen. Hoe groot is de arbeid welke vrijkomt bij het terugstromen van de elektriciteit?
3. Vertel iets van een elektrische stroom. Wat verstaan we onder een stroom?
4. Een lading van 1 coulomb wordt in één seconde verplaatst door een bepaalde geleider; hoe groot is de stroomsterkte?
5. Vertel iets van elektrische spanning.
6. Met een gelijkstroomdynamo wordt een accubatterij op twee manieren in serie geschakeld. De spanning van de dynamo bedraagt 60 V en van de accu 55 V. Welke spanningen kunnen we meten op de twee in serie geschakelde spanningsbronnen?
7. Een stroomketen, waarin een spoel is opgenomen, is onderbroken door een schakelaar. Tussen de schakelaarcontacten staat een gelijkspanning van 220 V. Vertel wat er gebeurt vóór en ná het contactmaken van de schakelaar. De spoel bevat 1 000 windingen, de weerstand is 110 ohm.
8. Een geringe positieve elektrische lading wordt op een kleine zeepbel gebracht. De zeepbel geraakt tussen twee tegengesteld elektrisch geladen lichamen. Wat kan er gebeuren?

HOOFDSTUK VI

ELEKTRISCHE GELEIDING DOOR GASSEN

§ 1. Stroomdoorgang in een gas

Wordt in een gas een aantal atomen gesplitst in elektronen en ionen, dan bevindt zich in het gas een aantal elektrisch *geladen deeltjes*. Deze doen weer mee aan de voortdurende beweging der gasdeeltjes. In het gas worden nu twee bolvormige geleiders geplaatst, b.v. op 25 cm afstand van elkaar. Deze worden tegengesteld geladen. Hierdoor ontstaat een elektrostatisch

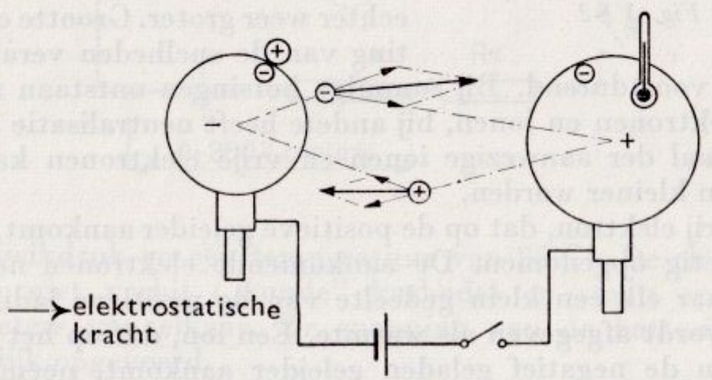


Fig. VI-1

veld. Op elke elektrische lading in een elektrostatisch veld worden krachten uitgeoefend. Dit geldt dus ook voor elk elektron of ion, dat zich in het veld bevindt (zie fig. VI-1). Bij een zwak veld zijn de krachten gering, bij een sterk veld groot. We zorgen voor een elektrisch veld, dat voor ons doel geschikt is: De krachten op de in het veld aanwezige vrije elektronen brengen deze in beweging naar de positieve geleider toe.

De krachten op de ionen daarentegen veroorzaken een beweging naar de negatieve geleider toe. Deze bewegingen worden gestoord door vele botsingen tussen de bewegende geladen deeltjes en de kris en kras door de ruimte bewegende atomen en moleculen. Zolang „de weg vrij is", beweegt een geladen deeltje zich in de richting van de betrokken geleider. Na elke botsing

is de richting door de toevallige omstandigheden bepaald. Onder invloed van het veld herneemt het deeltje de beweging naar de geleider (zie fig. VI-2.) Tijdens de botsing in het gas gaat een gedeelte van het arbeidsvermogen van beweging (A.v.B.) over op het geraakte atoom. Bij een elastische botsing minder dan 1%. Bij een niet-elastische botsing een groot gedeelte van het A.v.B. Dit gedeelte verhoogt dan de inwendige energie van het getroffen atoom (aanslag) of veroorzaakt ionisatie. Tengevolge van de botsing worden de snelheden van de vrije elektronen en ionen kleiner. Onder invloed van het veld worden de snelheden echter weer groter. Grootte en richting van de snelheden veranderen daarbij voortdurend. Bij sommige botsingen ontstaan nieuwe vrije elektronen en ionen, bij andere heeft neutralisatie plaats. Het totaal der aanwezige ionen en vrije elektronen kan dus groter en kleiner worden.

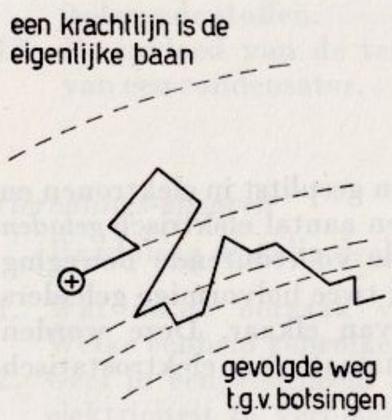


Fig. VI-2

Elk vrij elektron, dat op de positieve geleider aankomt, wordt daar gretig opgenomen. De aankomende elektronen neutraliseren daar elk een klein gedeelte van de positieve lading. De arbeid wordt afgegeven als warmte. Een ion, dat op het oppervlak van de negatief geladen geleider aankomt, neemt daar b.v. een elektron van het teveel aan negatieve lading op. Het ion wordt neutraal atoom. Daarna verdwijnt het ongehinderd in de ruimte. De geïoniseerde toestand van het gas maakt dus de ontlading mogelijk. Sluiten we de beide geleiders aan op een spanningsbron, dan zal deze de geleiders weer laden. Er ontstaat dan een stroomketen, waarvan het gas, voorkomende in het elektrostatische veld, deel uitmaakt. Dit gedeelte van de keten noemen we een *gasontlading*. De beide geladen geleiders, welke de ladingen aan het gas overdragen, noemen we de *elektroden*.

Belangrijke punten uit het voorgaande zijn:

1e Zonder aanwezigheid van vrije elektronen en ionen zijn geen gasontladingen mogelijk.

2e Het veld tussen de elektroden is de oorzaak van de verplaatsing van ionen en elektronen.

3e Op die plaatsen (in de gasontlading), waar ionen weer in atomen overgaan, komt de ionisatie-energie weer vrij.

§ 2. Verschijnselen bij gasontlading (lage druk)

In fig. VI-3 is een opstelling aangegeven om het gedrag van een ontladingsbuis na te kunnen gaan. Om enkele cijfers betreffende stroom en spanning te kunnen geven, is uitgegaan van een bepaald geval, nl. een buis gevuld met neongas van ongeveer

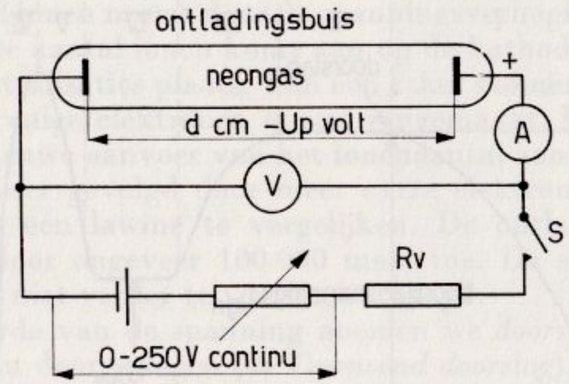


Fig. VI-3

2 cm kwikdruk en een temperatuur van 25 C°. De elektroden worden niet verhit („koude" kathode) en staan op enkele centimeters van elkaar. De spanning van de batterij wordt geleidelijk opgevoerd.

De stroom die danoptreedt, is in fig. VI-4 grafisch weergegeven als functie van de buisspanning.

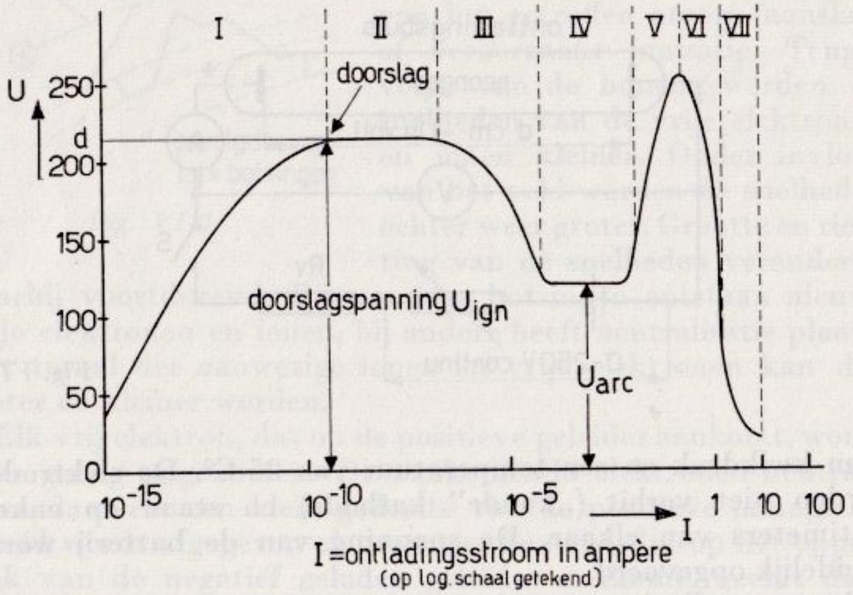
Hierbij onderscheiden we verschillende etappen, welke in de volgende paragrafen worden behandeld.

§ 3. Donkere ontlading

Zodra er een spanning van ongeveer 10 V tussen de elektroden staat, begint er een zéér klein stroompje te lopen van ca 10^{-18} A. (Hierbij bedenke men, dat de lading van 1 elektron $1{,}6 \times 10^{-19}$ coulomb bedraagt.) Dit ontstaat omdat er altijd wel enige gasmoleculen geïoniseerd zijn.

Bij ongeveer 50 V treedt tengevolge van de botsingen hier en daar aanslag en ionisatie op. Op de aanslag volgt de lichtuitstraling. Deze is echter met het oog nog niet waar te nemen. De door de ionisatie vrijgekomen elektronen en ionen spelen op hun

beurt mee in het ontladingsproces. Deze nieuwe vrije elektronen zorgen óók voor nieuwe ionisaties. De ionen zijn enige duizenden malen zwaarder dan een elektron. Zij dragen dezelfde lading als een elektron, d.w.z. zij ondervinden een gelijke kracht. Door hun zwaarte zijn zij moeilijk op gang te brengen. De snelheden van elektronen en ionen verhouden zich ongeveer als 100 : 1. De ontladingsstroom is **nu** ongeveer 10^{-14} A. In fig. VI-4 is dit grafisch voorgesteld.



I. donkere ontlading; II. doorslag; III. Townsend-ontlading; IV. normaal glimlicht; V. abnormaal glimlicht; VI. overgang naar boogontlading; VII. boogontlading.

U_{ign} = Ontsteekspanning (ignition = ontsteking)
U_{arc} = Boogspanning (arc = boog)

Fig. VI-4

Van 100 tot 200 V neemt de snelheid der elektronen sterk toe met als gevolg sterke toeneming van ionisatie en ontladingsstroom. Een elektron, dat in de buurt van de kathode ontstaat, kan nu zelfs meermalen ionisatie veroorzaken. De stroom is nu b.v. 10^{-12} A.

Voor een bepaalde waarde van de spanning vinden we steeds

weer vrijwel dezelfde stroom. We noemen deze toestand de *donkere ontlading*.

Voor de praktijk is deze stroom nog zó laag, dat we de buis nog steeds als een isolator kunnen beschouwen.

§ 4. De doorslag

Iets boven de 200 V ontstaat voor neon plotseling een stijging van de stroom tot 10^{-7} A. Deze komt als volgt tot stand.

Het aantal ionen neemt door de spanningsverhoging nog meer toe. Dit grote aantal ionen komt aan op de kathode. Daar vinden vele neutralisaties plaats. Van een zeker moment af worden er af en toe enige elektronen *te veel* vrijgemaakt. Deze veroorzaken een nieuwe aanvoer van het ionenaantal aan de kathode. Dit wordt weer gevolgd door meer extra elektronen. De aangroei is met een lawine te vergelijken. De ontladingsstroom neemt daardoor ongeveer 100 000 maal toe. De spanning behoeft hierbij niet verder te worden verhoogd.

Deze waarde van de spanning noemen we *doorslagspanning*. Het gas is nu doorgeslagen (*de Townsend doorslag*), het kan nu geen isolator meer genoemd worden. De manier, waarop de doorslag tot stand komt, noemt men *de glimlichtontlading*.

Na de doorslag neemt de weerstand van het gas nog steeds af. De stroom neemt nog steeds toe, terwijl de benodigde brandspanning lager wordt.

De overblijvende spanning wordt gebruikt om de ontladingsstroom door de weerstand R_V te sturen. Tussen de elektroden straalt het gas nu duidelijk zichtbaar rood licht uit. De kleur is kenmerkend voor neon. De stroom stijgt tot ongeveer 1 mA; daarbij is de spanning aan de elektroden 120 V. De ontlading verloopt nu als volgt. De ionen bewegen naar de kathode onder invloed van het elektrische veld. Daar worden tijdens de neutralisatie voortdurend extra elektronen vrij gemaakt. Deze vliegen naar de anode en ioniseren op hun weg de nieuwe ionen. Deze zorgen weer voor nieuwe elektronen enz. Daarnaast komt in het gas aanslag voor, gevolgd door uitstraling van licht en warmte. Samenvattende: Na de doorslag daalt de weerstand van het gas nog steeds, de stroom stijgt tot ongeveer 1 mA. Daarbij is de benodigde spanning belangrijk lager dan de doorslagspanning. Het gas straalt licht uit (zie fig. VI-5).

We voeren de stroom nu op van 1 tot ongeveer 10 mA. Voor deze stroomsterkten is slechts een spanningsverhoging nodig

van enkele procenten. De lichtuitstraling trekt zich daarbij samen aan de kathode. De verdere ruimte is donker. Het licht heeft de vorm van een laagje. Dit laagje noemt men *het negatieve glimlicht*. Beneden de 10 mA is de kathode gedeeltelijk bedekt. Dit noemt men het *normale glimlicht* (zie fig. VI-6). De wijze,

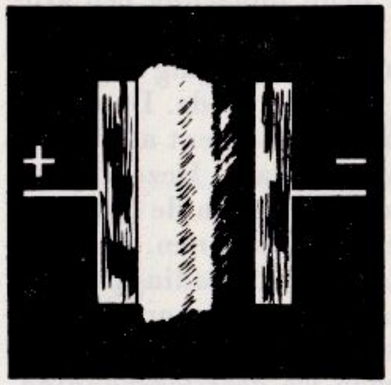


Fig. VI-5

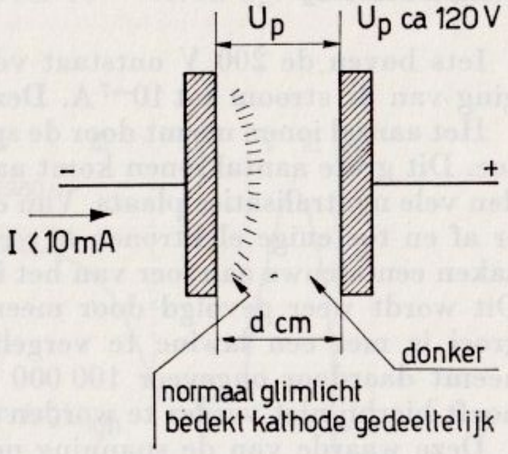


Fig. VI-6

waarop nu in beginsel de ontlading plaats vindt, is gelijk gebleven. Zodra de kathode geheel met glimlicht is bedekt, kanmen het aantal extra elektronen niet verder op de boven beschreven wijze vergroten. Dit is het gebied, waarin de stabilisatorbuizen werken.

§ 5. Het gebied van het abnormale glimlicht

Opvoeren van de ontladingsstroom is echter mogelijk door de spanning te verhogen. De ionen krijgen daardoor meer snelheid en *bombarderen* de kathode. Dit bombardement veroorzaakt *secundaire emissie*. De secundaire elektronen vergroten het aantal ionisaties in het gas en de ontladingsstroom. Het anode-oppervlak kan daarbij klein zijn. Deze glimlichtontlading is mogelijk tot een stroom van ongeveer 100 mA bij ongeveer 250 V (zie fig. VI-7). Er vindt hierbij een aanmerkelijke warmte-ontwikkeling plaats.

In dit gebied werken de glimlichtstarters voor TL-buizen.

§ 6. Overgang naar de boogontlading

Voeren we de stroom nu verder op, dan wordt de kathode door het bombardement verhit. Het verhitte metaal zal van een zekere temperatuur af thermische elektronen gaan afgeven. De stroom neemt dan zeer sterk toe. De benodigde span-

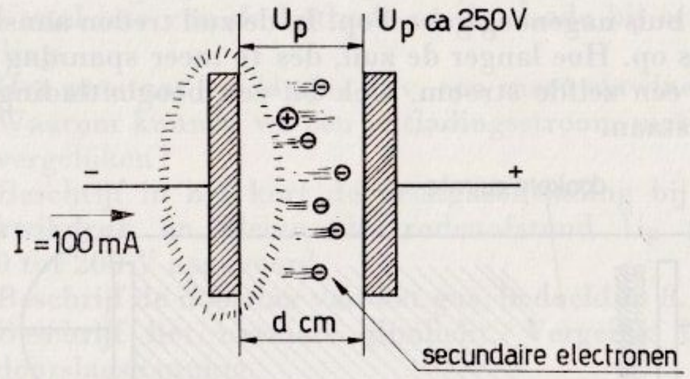


Fig. VI-7

ning daalt snel. Deze bedraagt nu ca 25 V, dit is ongeveer gelijk aan de ionisatiespanning. De ontlading is nu overgegaan in een *boogontlading*. De stroom kan nu een waarde van tientallen ampère aannemen. De stroom wordt beperkt door de uitwendige weerstand of de stroom, welke de spanningsbron kan leveren. De gehele gasvulling geeft nu licht.

§ 7. Laagspanningsboogontlading

Bij *hoge* temperatuur van de kathode of ook bij een *speciale kathode* ontstaat een sterke thermische elektronenemissie. Daarbij kan de benodigde boogspanning zelfs belangrijk kleiner zijn dan de ionisatiespanning van het gas. Dit noemt men de *laagspanningsboog* (zie fig. VI-8).

Dit gebied is van belang voor de lichtgevende gasontladingsbuizen, zoals b.v. de TL-buizen.

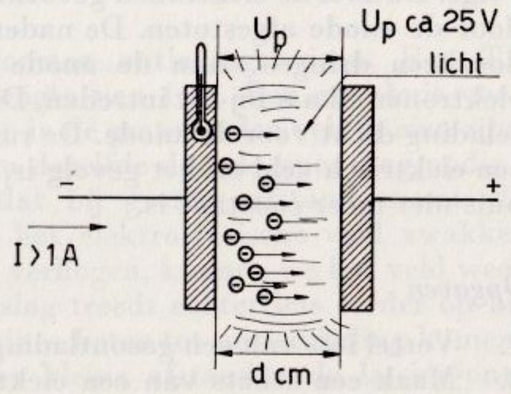


Fig. VI-8

§ 8. Zuilontlading

Hier volgt nog een kleine uitbreiding van de glim- en

boogontlading. De anode bevond zich tot nu toe op enkele cm afstand van de kathode. Deze afstand wordt nu vergroot. Aanvankelijk volgt slechts een vergroting van de *donkere ruimte*. Na enkele cm verschuiving ontstaat er een lichtlaagje aan de anode. Dit groeit bij verdere vergroting van de afstand aan tot een lange lichtgevende kolom (zie fig. VI-9).Deze kolom wordt *anodezuil* genoemd en men spreekt van een *zuilontlading*. De lichtende zuil vult de buis nagenoeg geheel op. In de zuil treden aanslagen en ionisaties op. Hoe langer de zuil, des te meer spanning is er nodig voor een zelfde stroom. Ook bij een boogontlading kan een zuil ontstaan.

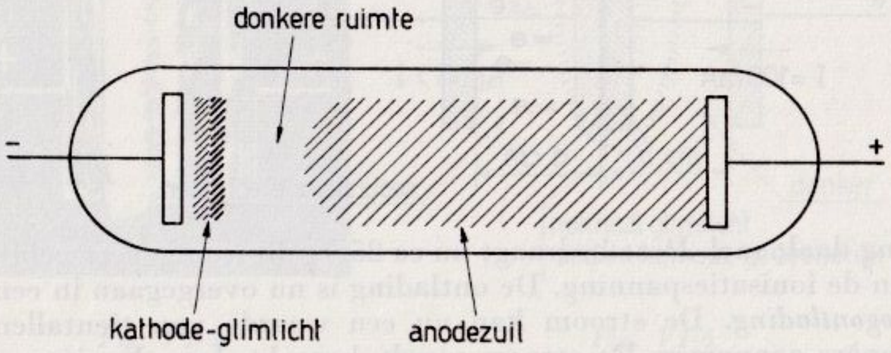


Fig. VI-9

In de buis is het elektrische veld nu niet meer homogeen. Er komen zeer veel geladen deeltjes in voor. Deze zijn niet gelijkmatig over de ontlading verdeeld. Bij de kathode, vooral als deze geheel met glimlicht bedekt is, is er een teveel aan ionen en een tekort aan elektronen. De ionen vormen voor de kathode een positieve ruimtelading. Dicht bij de anode is de toestand als volgt: De door de elektronen gevormde ionen worden daar direct door de anode afgestoten. De naderende elektronen moeten er doorheen dringen. Aan de anode gekomen „verdringen" de elektronen elkaar bij het intreden. Dit houdt in: een zekere ruimtelading dicht voor de anode. De ruimteladingen geven zelf ook een elektrisch veld en het gevolg is, dat de veldsterkte langs de buis niet meer constant is.

Opgaven

1. Vertel iets van een gasontlading.
2. Maak een schets van een elektrostatisch veld tussen twee geladen geleiders. Teken op verschillende plaatsen in het veld een elektron en een ion. Geef de elektrostatische krachten in het veld aan.
3. Vertel iets van de botsingen der geladen deeltjes in een elektrostatisch veld. Maak een schetsje en geef de snelheid met pijlen aan.
4. Waarom kan een geneutraliseerd atoom weer ongehinderd de lucht- of gasruimte ingaan?
5. Vertel iets van de kathode en de anode bij een gasontlading.
6. Hoe ontstaat een lawine, b.v. een sneeuwlawine?
7. Waarom kunnen we een ontladingsstroom met een lawine vergelijken?
8. Beschrijf in het kort de neongasontlading bij enkele cm kwikdruk en kleine elektrodenafstand. U_p wordt van 0 tot 200 V opgevoerd.
9. Beschrijf de doorslag van het gas, bedoeld in 8.
10. Beschrijf het normale glimlicht. Vergelijk U_p met de doorslagspanning.
11. Geef een korte beschrijving van de boogontlading.
12. Beschrijf de ontlading met anodezuil.
13. Van een ontladingsbuis heeft de kathode een 10 maal groter oppervlak dan de anode. De stroom bij de glimontlading is 10 mA. Hoe groot zal de stroom zijn indien de anode als kathode wordt gebruikt? De spanning blijft gelijk.

§ 9. Omstandigheden, die van invloed zijn op de doorslagspanning

a. De afmetingen

We bezien eens twee soorten ontladingsbuizen. Een TL verlichtingsbuis heeft een lengte van 1 m. Een neonbuis voor reclameverlichting, zoals b.v. in de grote steden vele te zien zijn, een lengte van ca 3 m. Is nu dezelfde doorslagspanning nodig? Het antwoord hierop is, dat bij grotere afstand tussen de elektroden voor gelijke U_p het elektrostatische veld zwakker wordt. Door de spanning te verhogen, kunnen we het veld weer even sterk maken. De doorslag treedt echter iets eerder op bij grote afstand omdat de lawines beter tot ontwikkeling komen. Omgekeerd wordt voor zeer kleine afstanden de lawine-ontwikkeling beperkt. De doorslagspanning stijgt dan weer.

b. De druk

Een ander probleem is de inwendige druk. Halveren we de druk b.v., dan wil dat zeggen, dat er tweemaal minder atomen in dezelfde ruimte aanwezig zijn. De onderlinge afstanden zijn nu gemiddeld 2 maal groter geworden. Het aantal botsingen over een zekere tijd gerekend zal veel geringer zijn. De vrije elektronen vinden de weg naar de anode minder versperd. Om over de langere weg zonder botsing een zekere snelheid te verkrijgen, is bij lage druk een zwakker veld nodig dan bij hoge druk. M.a.w.: voor lage druk zal de doorslagspanning lager liggen en omgekeerd. Bij zeer lage drukken is echter de toestand veranderd. Het aantal atomen in een zekere ruimte, b.v. 1 cm^3, is nu laag. De vrije weg van het elektron is groot. Het zonder botsen verkrijgen van voldoende snelheid is geen probleem. Echter is de *kans* om direct daarna een atoom te raken en te ioniseren nu kleiner. De doorslag zal pas optreden bij hogere spanning.

c. Gassoort

Verder is gebleken, dat voor elke soort gas of gasmengsel de aanslag- en ionisatiespanning en daarmee ook de doorslagspanning verschillend zijn.

d. Elektrische ladingen op de glaswand

In de ontladingsbuis zullen de kris en kras door elkaar bewegende atomen de wand raken. Dit geldt ook voor een gedeelte van de vrije elektronen en ionen. De wand zal de elektronen opnemen en deze gaan dus voor de ionisatie verloren. Op de wand ontstaan tengevolge van de opgenomen elektronen elektrische ladingen. Het veld, dat daardoor ontstaat, beïnvloedt in het algemeen het met opzet aangebrachte veld der elektroden. Bij een nauwe buis is de invloed van de oppervlakte groter dan bij een wijde buis, omdat bij de nauwe buis de verhouding tussen oppervlak en inhoud veel groter is. Bij een nauwe buis zal dus in het algemeen een hogere spanning nodig zijn voor de doorslag. Het extra veld tengevolge van de *wandladingen* kan worden bestreden door aan de binnen- of buitenkant van de buis een halfgeleidende laag aan te brengen. Voor elektronenbuizen gebruikt men wel *grafietlagen*.

Ook het materiaal van de elektroden is van betekenis voor de

doorslagspanning. De kathode moet nl. elektronen afgeven om de lawine tot stand te kunnen brengen en aan de gang te kunnen houden. Dit zal beïnvloed worden door de uittreespanning van het materiaal. Een kathode-oppervlak, bedekt met bariumoxyde, vergemakkelijkt het uittreden van elektronen. Overigens kunnen onzuiverheden, b.v. zuurstof en oxydevorming, de uittreding bemoeilijken. Een verhoging van de doorslagspanning is het gevolg. Bij de fabricage worden deze onzuiverheden meestal grondig verwijderd.

Opgaven

Vertel in het kort iets omtrent:

14. De doorslag in een gas; wat is het kenmerk van de doorslag?
15. De afhankelijkheid van de doorslagspanning van de elektrodenafstand.
16. De afhankelijkheid van de doorslagspanning en de druk.

Vertel in verband met invloeden op de doorslagspanning in het kort iets omtrent:

17. De invloed van de buiswand.
18. De invloed van het elektrodenmateriaal.

§ 10. De vorm van de elektroden

Bij de besproken gasontladingen was het elektrostatische veld niet altijd homogeen. Als een veld niet homogeen is, zal het veld op de ene plaats anders zijn dan op een andere. De gasontladingsvorm zal daardoor ook enigszins worden beïnvloed. Een voorbeeld hiervan is de invloed van de *ruimtelading* op het veld en de ontladingsvorm bij de zuilontlading. Naast de vlakke elektroden zijn de belangrijkste vormen van elektroden:

grote bollen: deze vertonen een vrijwel gelijke werking als vlakke platen;
kleine bollen: op een afstand ongeveer gelijk aan 10 maal de bolstraal is het veld vrijwel homogeen; dichtbij de bol vertoont het veld meer de werking van spitsen;
spitsen: deze vertonen een bijzondere werking.

De spits loopt uit in een punt. Deze vertoont het veld van een puntlading. Hier lopen de krachtlijnen niet evenwijdig. De krachtlijnen naderen elkaar meer naarmate de afstand tot de

spits kleiner wordt. Dit houdt in, dat bij kleinere afstand de veldsterkte steeds groter wordt en het grootst is aan de spits. Omgekeerd wordt het veld zwakker naarmate de afstand groter wordt.

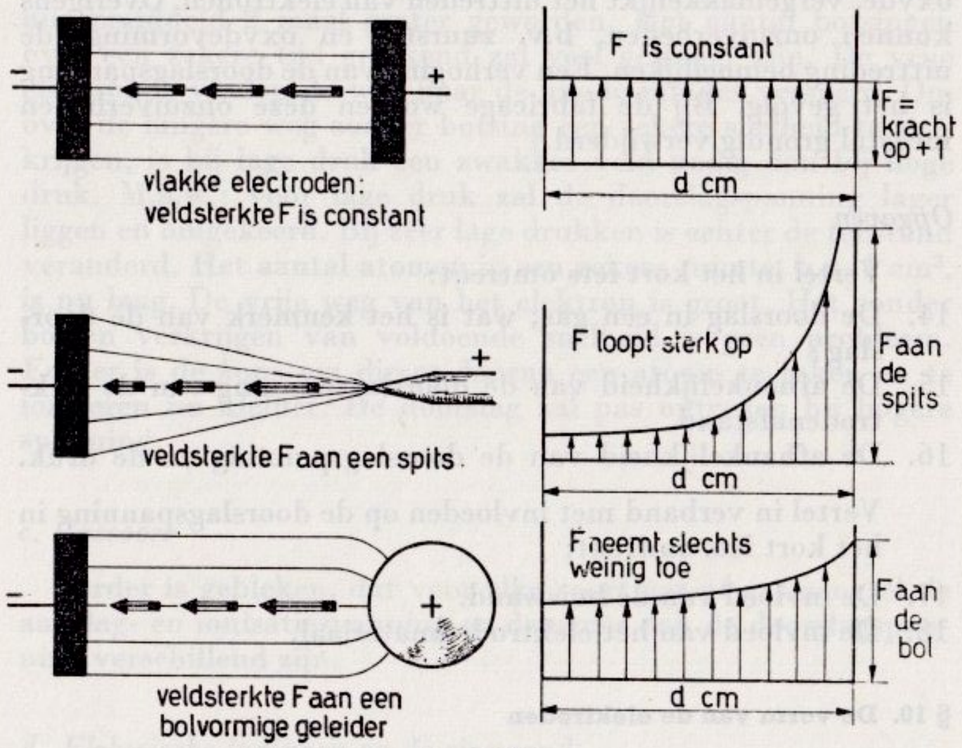


Fig. VI-10

Hoe groot is de veldsterkte F aan een spits? Dit hangt af van de spanning op de elektroden (U_p) en de afstand tussen deze (d) en daarnaast van de „spitsheid". De ervaring leert dat de veldsterkte wel 10 maal groter kan zijn dan U_p/d. De elektrostatische kracht aan een spits is dan ook verrassend hoog. Voor gasdeeltjes betekent dit aan een negatieve spits: de positieve ionen worden sterk aangetrokken. Door het ionenbombardement worden elektronen vrijgemaakt, welke sterk worden afgestoten. Op hun baan ioniseren zij atomen; deze ionen trekt de spits weer aan enz. Dit betekent een sterk verlies van lading. Aan een positieve spits: vrije elektronen uit de gasruimte sterk aangetrokken onder ionisatie en aanslag. Zowel bij een positieve als bij een negatieve spits treedt in de nabijheid van de punt een lichtverschijnsel op. Aan een overigens vlakke elektrode kan een spits letterlijk „de doorslag geven". Onder

invloed van dergelijke sterke velden kunnen elektronen uit het metaal worden getrokken. De aanwezigheid van positieve ionen of van een hoge temperatuur is daarbij niet vereist. Dit verschijnsel noemt men „koude emissie". We komen hierop terug bij elektrische ontladingen in het vacuum. Een spits kan dienen om de benodigde doorslagspanning min of meer te verlagen. Overigens vormen spitsen steeds een bedreiging tot doorslag op plaatsen waar deze ongewenst is. Dit wordt voorkomen door het aanbrengen van ronde afwerkingen aan elektroden of geleiders (bolvorm). Ook wordt het opzettelijk bedekken van puntige geleiders met een beschermkap toegepast.

Veldsterkten van 10^7 V/cm kunnen aan scherpe spitsen voorkomen.

Opgave

19. Vertel (in verband met invloeden op de doorslagspanning) in het kort iets omtrent de invloed van een spits.

§ 11. Doorslag van de lucht

Lucht is een gasmengsel. Het ontstaan van de doorslag in lucht geschiedt bij hoge drukken of grote elektrodenafstanden op andere wijze als in neon. Dit blijkt eigenlijk al uit de vonkvorming. Als nl. de elektronenlawine ongeveer halfweg de luchtspleet is gekomen, verandert de wijze van uitbreiding. In fig. VI-11 is de vonkvorming tussen evenwijdige platen aanschouwelijk voorgesteld. Er ontstaat tenslotte in zeer korte tijd (10^{-7} seconde) een geleidend kanaal van de anode naar de kathode.

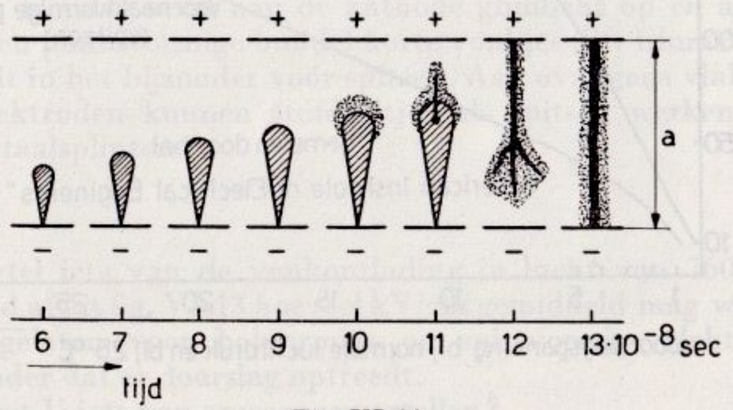


Fig. VI-11

Geschiedt de ontlading tussen geladen bollen of platen, dan worden deze ontladen, waarbij U_p daalt. Het gevolg is dat de ontlading afbreekt. Voor het geval U_p weer de oorspronkelijke waarde krijgt, treedt opnieuw doorslag op (vonkenreeks). Bij geringe weerstand in de toevoerleidingen of wanneer de spanningsbron voldoende vermogen kan leveren, ontstaat *uit de vonk een boog*.

De vonk zelf is zeer grillig gevormd en verandert van ogenblik tot ogenblik (zie fig. VI-12). Daarbij ontstaat een knetterend geluid. Bij een sterke ontladingsstroom wordt de lichtuitstraling feller en het geluid gaat over in scherpe knallen, t.g.v. de sterke verhitting en plotselinge uitzetting van de lucht ter plaatse van de doorslag.

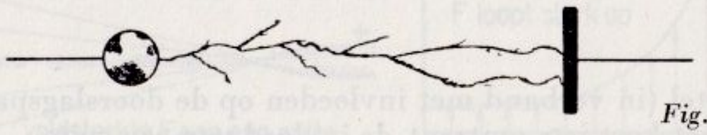


Fig. VI-12

De doorslagspanning is ook hier weer afhankelijk van de *elektrodenafstand* en de *vorm* van de elektroden. In fig. VI-13 is het verband tussen benodigde doorslagspanning en elektrodenafstand aangegeven voor bollen en spitsen. Van een dergelijke

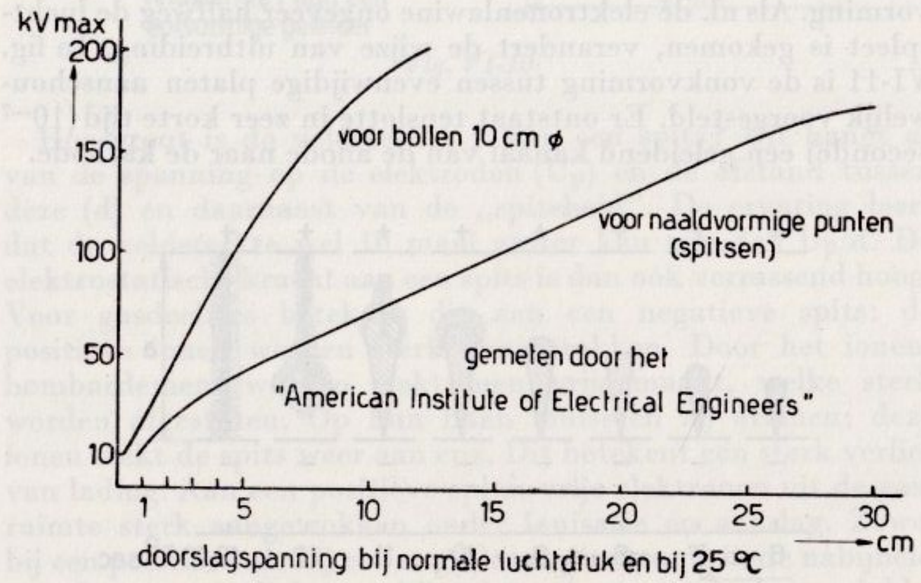


Fig. VI-13

grafiek wordt gebruik gemaakt om hoge spanningen te meten.

Bij het overslaan van de vonk ontstaat uit de zuurstof van de lucht een gas, genaamd ozon. De formule is O_3. Het is gekenmerkt door de eigenaardige reuk en sterk oxyderende werking.

§ 12. Onweer

Een bekend voorbeeld van een vonk- en boogontlading in de lucht is de bliksem. De vonkspanning bedraagt hier enige miljoenen volt, de stroom ongeveer 20 000 A. De vonklengte is in de regel enige duizenden meters (zie fig. VI-14). De ontladingsduur is ongeveer 40 miljoenste seconde.

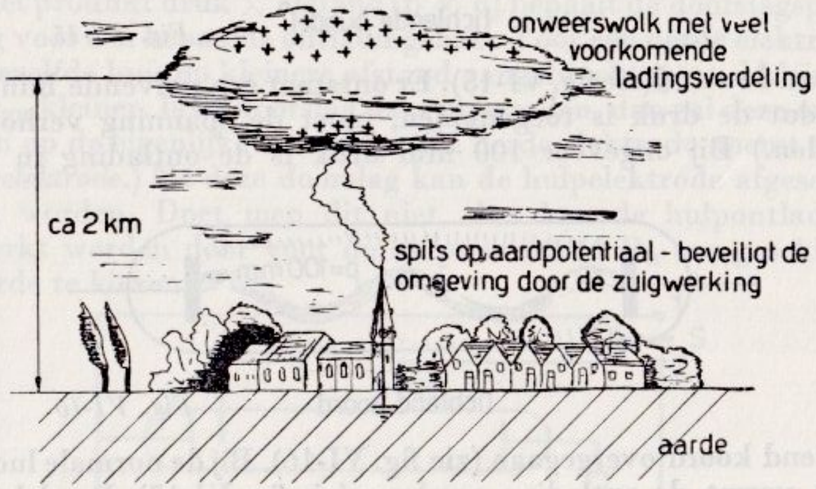


Fig. VI-14

Bij grote elektrodenafstanden (hoge spanningen) treedt soms vóór de doorslag eerst aan de kathode glimlicht op en aan de anode een pluimvormige bundel korte vonkjes (St. Elmusvuur). Dit geldt in het bijzonder voor spitsen. Aan overigens vlakke of bolle elektroden kunnen stofdeeltjes als spitsen werken, b.v. fijne metaalsplinters.

Opgaven

20. Vertel iets van de vonkontlading in lucht van 760 mm.
21. Leid af uit fig. VI-13 hoeveel kV/cm gemiddeld mag worden toegelaten voor bolvormige en spitsvormige elektroden zonder dat er doorslag optreedt.
22. Weet U iets van onweer te vertellen?

§ 13. De invloed van de druk op de ontlading

We gaan uit van een buis met een zuilontlading in verdunde lucht.

De druk bedraagt ongeveer 30 mm. Het kathodeglimlicht is blauw, van de zuil is het violet. Bij wat hogere druk vult het licht de gehele buis. Bij ongeveer 50 mm geraakt de ontlading

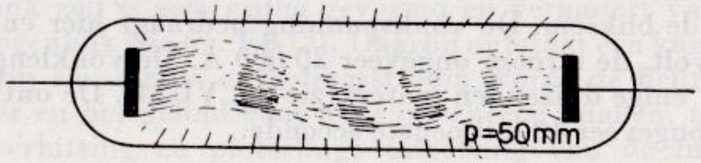


Fig. VI-15

los van de wand (zie fig. VI-15). Er ontstaat een golvende bundel. (Omdat de druk is toegenomen, moet de spanning verhoogd worden.) Bij ongeveer 100 mm druk is de ontlading in een

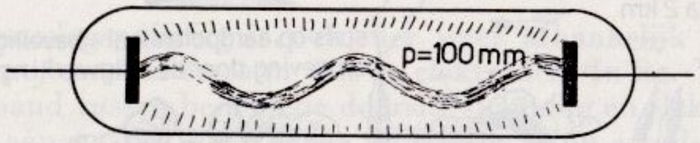


Fig. VI-16

lichtend koord overgegaan (zie fig. VI-16). Bij de normale luchtdruk vormt de ontlading een boog (zie fig. VI-17). De elektroden worden hierbij sterk verhit, evenals het gas. Het verhitte

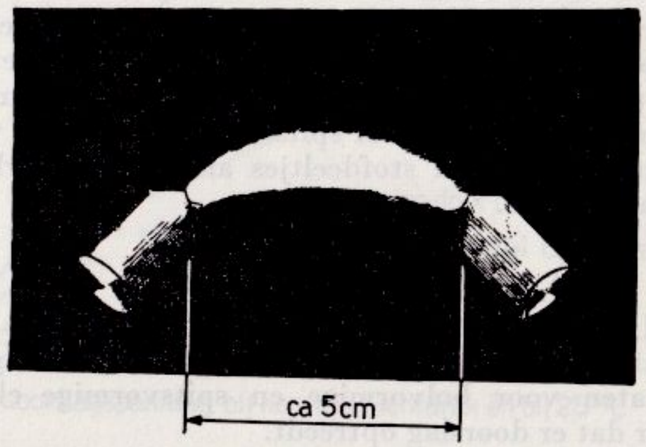


Fig. VI-17

gas vormt nu een boogvormig geleidend kanaal tussen de elektroden. Voor een elektrodenafstand van ongeveer 5 cm is de benodigde boogspanning ongeveer 40 V (zie fig. VI-17). De temperatuur van de boog is ongeveer 4000 °C. Bij koperelektroden geeft de boog een sterk groen licht, afkomstig van de aanslag van verdampte Cu-atomen. De stroom is ca. 50 A.

Een dergelijke lichtboog treedt op bij schakelaars, wanneer een grote stroomsterkte afgeschakeld wordt. Ook bij het koolspitsenlicht en het vlambooglassen maakt men gebruik van deze boogontlading (zie fig. VI-17).

§ 14. Gebruik van een derde elektrode

Het produkt druk × afstand (p × d) bepaalt de doorslagspanning voor een bepaalde ontladingsbuis. Voor een derde elektrode in dezelfde buis op kleinere afstand aangebracht (p × d kleiner) is U_{ign} kleiner. Is de doorslag daar ingetreden, dan zal deze overslaan op de eigenlijke elektrode. (De derde elektrode noemt men *hulpelektrode*.) Na deze doorslag kan de hulpelektrode afgeschakeld worden. Doet men dit niet, dan kan de hulpontlading beperkt worden door voor de hulpweerstand R_h een geschikte waarde te kiezen.

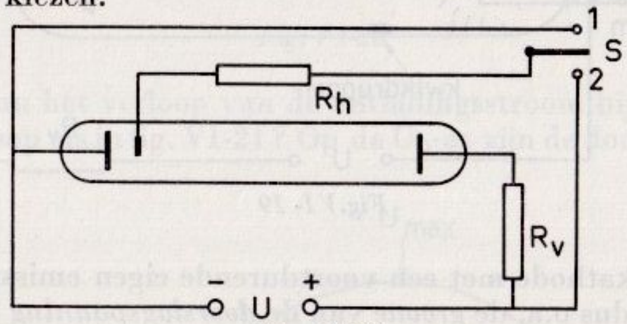


Fig. VI-18

Omgekeerd kan een op potentiaal nul gehouden hulpelektrode de doorslagspanning sterk verhogen. We zien dit in fig. VI-18. Als de schakelaar S op 1 staat, blijft de ontsteking naar de anode uit; de doorslagspanning is dan veel hoger. In stand 2 krijgt de hulpanode spanning: hulpontlading ontstaat en leidt de hoofdontlading in.

Door middel van hulpelektroden zijn vele schakelingen mogelijk. Ook kan men bij het inschakelen van de buis tijdelijk de spanning verhogen totdat het gas is doorgeslagen. De ontlading gaat daarna verder op de bedrijfsspanning.

Een dergelijke hulpelektrode vindt toepassing in de thyratrons, ignitrons, triggerbuizen, flitslampen e.d.

§ 15. Thermische elektronenemissie

In het voorgaande kwamen we tot de volgende conclusies:

1e De doorslag van het gas vangt aan bij de aanwezigheid van vrije elektronen in het elektrostatische veld.

2e De *spanning* moet zo hoog zijn, dat een voldoende toeneming van de ionisatie ontstaat. Deze toeneming is te vergelijken met een lawine.

3e De ontstane ionen bombarderen de kathode en maken er secundaire elektronen vrij. De emissie is echter beperkt.

4e De vije elektronen zorgen voor nieuwe ionisaties enz.

5e Wensen we een grotere stroom, dan moet het ionenbombardement worden versterkt door de *aangelegde spanning* te verhogen.

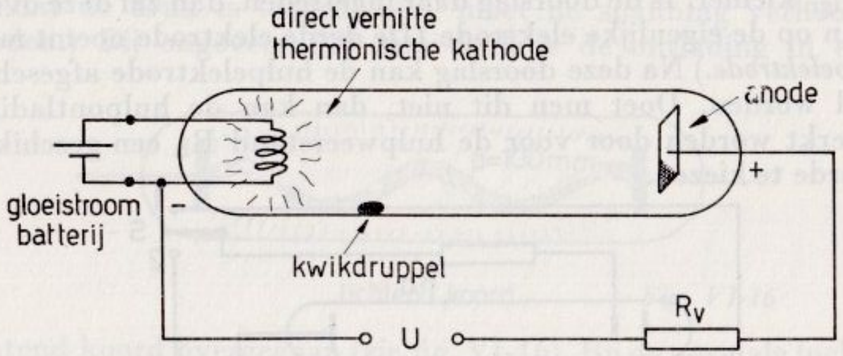


Fig. VI- 19

Bij een kathode met een voortdurende eigen emissie (zie fig. VI-19) zal dus o.a. de *grootte* van de *doorslagspanning belangrijk lager* kunnen zijn (zie fig. VI-20). Voor dit doel worden de thermische oxydekathode (meestal direct verhit) en de kwikkathode gebruikt in verschillende vormen. De thermische kathode vindt toepassing voor ontladingsbuizen van 0,1 tot ongeveer 50 A. Bekende voorbeelden zijn kwikdampgelijkrichters en TL-buizen. De kwikkathode in de vorm van een kwikplas, waarop de boog staat, wordt bij zeer grote gelijkrichters tot enige duizenden ampère toegepast.

§ 16. Gasontladingen bij wisselstroom

Binnen een honderdduizendste seconde na het inschakelen van de (gelijk)spanning komt de doorslag tot stand. In aansluiting daarop b.v. de glimontlading. In 10^{-5} sec wordt dus de hiervoor benodigde ionisatietoestand opgebouwd. We verlagen nu de spanning tot de ontlading uitdooft of schakelen de spanning af. De vraag is nu na hoeveel tijd het gas weer in niet-geleidende toestand is teruggekeerd. Hiervoor heeft men een tijd gemeten tussen 10^{-3} en 10^{-4} sec. In die tijd zijn de ionen en vrije elektronen grotendeels in het gas en aan de buiswand geneutraliseerd.

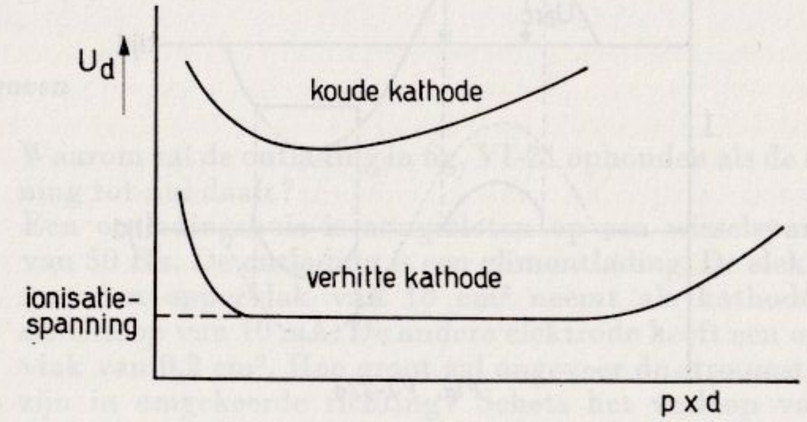


Fig. VI-20

Hoe is nu het verloop van de ontladingsstroom bij een spanningsverloop als in fig. VI-21? Op de U_p-as zijn de doorslagspan-

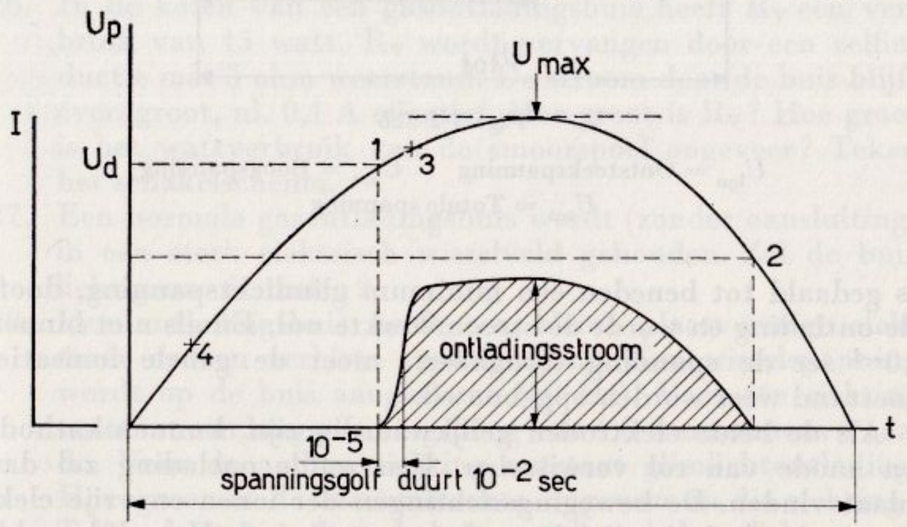


Fig. VI-21

1. tijdstip, waarop de doorslag begint; 2. tijdstip, waarop de ontlading dooft; 3. U_p is kleiner dan U_{max}; 4. U_p is veel kleiner dan U_{max}.

ning en de doofspanning voor de glimontlading getekend. Zodra nu de spanning op de buis hoger is dan het punt 1 aangeeft, komt de doorslag tot stand. Afhankelijk van R_v gaat de ontlading over op de glimontlading. De spanning loopt verder op, daarna af en daarbij ook de ontladingsstroom. Als de spanning

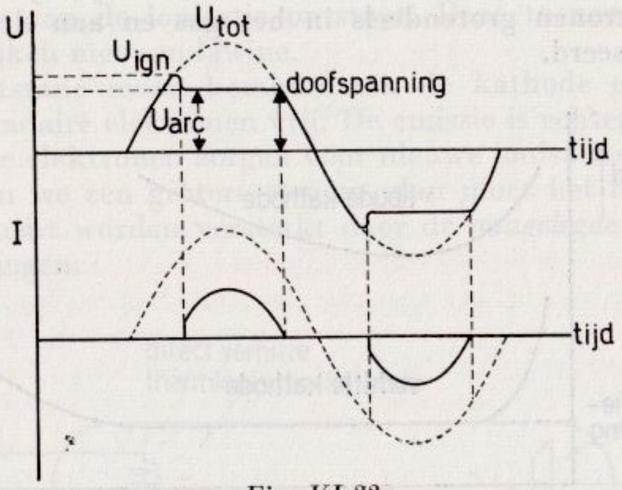


Fig. VI-22a

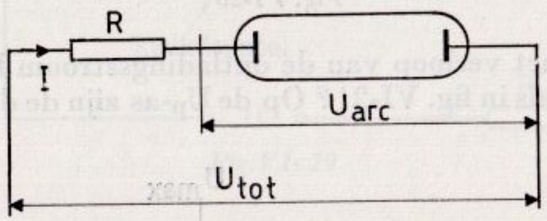


Fig. VI-22b

U_{ign} = Ontsteekspanning U_{arc} = Boogspanning
U_{tot} = Totale spanning

is gedaald tot beneden een minimum glimlichtspanning, dooft de ontlading en wordt de stroomsterkte nul. En als niet binnen 10^{-4} sec de spanning terugkeert, moet de gehele ionisatietoestand weer worden opgebouwd.

Als de beide elektroden gelijkwaardig zijn, kunnen kathode en anode van rol verwisselen. Een zelfde ontlading zal dan plaatsvinden. De bewegingsrichtingen der ionen en vrije elektronen in de buis zijn dan echter omgekeerd. Hetzelfde geldt ook voor een wisselspanning van 50 Hz. Daarbij zal de stroom een verloop hebben als in fig. VI-22. Tijdens het omkeren van de

spanning zal de ontlading dus ophouden. Voor spanningen met frequenties van ongeveer 10^5 Hz volgen de doorslagen elkaar zo snel op, dat de ionen en vrije elektronen nog gedeeltelijk zijn overgebleven. Hierdoor ontstaat een verlaging van de doorslagspanning. Op te merken valt echter, dat steeds de maximum spanning *maatgevend* is voor de eventuele doorslag en niet de effectieve waarde. Bij wisselspanning kan in plaats van een weerstand ook een zelfinductie of een condensator voor de stroombeperking worden gebruikt.

Opgaven

23. Waarom zal de ontlading in fig. VI-21 ophouden als de spanning tot nul daalt?
24. Een ontladingsbuis is aangesloten op een wisselspanning van 50 Hz. De ontlading is een glimontlading. De elektrode met een oppervlak van 10 cm² neemt als kathode een stroom op van 10 mA. De andere elektrode heeft een oppervlak van 0,2 cm². Hoe groot zal ongeveer de stroomsterkte zijn in omgekeerde richting? Schets het verloop van de ontladingsstroom. Teken in dezelfde grafische voorstelling de gemiddelde stroomsterkte.
25. Waarom zal de maximum spanning maatgevend zijn voor de doorslag en niet de effectieve waarde?
26. In de keten van een gasontladingsbuis heeft R_v een verbruik van 15 watt. R_v wordt vervangen door een zelfinductie met 5 ohm weerstand. De stroom door de buis blijft even groot, nl. 0,1 A effectief. Hoe groot is R_v? Hoe groot is het wattverbruik van de smoorspoel ongeveer? Teken het schakelschema.
27. Een normale gasontladingsbuis wordt (zonder aansluiting) in een sterk elektrisch wisselveld gehouden. Zal de buis licht gaan uitstralen?
28. Een ontladingsbuis heeft een kleine plaatvormige elektrode en een verhitte oxydekathode. Een wisselspanning wordt op de buis aangesloten (50 Hz). Voor één richting ontstaat een laagspanningsboog van 1,5 A maximum waarde. Voor de andere richting ontstaat glimlichtontlading. Hoe groot is de stroomsterkte ongeveer in die richting? Teken de stroom door de buis over 2 perioden. Teken ongeveer de gemiddelde stroomsterkte. Verklaar de werking van de buis. Valt er wat op te merken?

HOOFDSTUK VII

ELEKTRONEN-EMISSIE

§ 1. Statische elektriciteit

Een staaf glas wordt gewreven of geslagen met een lapje zijde. Het wrijven of slaan kost arbeid. Het glas wordt dan positief elektrisch geladen, de zijde negatief.

Deze wrijving van glas met zijde is slechts een voorbeeld van het ontstaan der wrijvingselektriciteit. Deze treedt op als twee verschillende vaste stoffen tegen elkaar worden gewreven. Tijdens de wrijvende aanraking wordt een aantal elektronen van de ene stof overgebracht op de andere.

Bij goede isolatie blijft de lading op de gewreven plaats. Bij geleiders verspreidt de lading zich over het gehele oppervlak.

De verklaring voor het verschijnsel der wrijvingselektriciteit is voor ons doel van minder belang. Deze wordt daarom in dit boek weggelaten.

Men ontdekte het verschijnsel van de wrijvingselektriciteit aan barnsteen. (Barnsteen is door hoge ouderdom verharde boomhars.) Later ontdekte men, dat er twee *verschillende ladingstoestanden* bestonden. Deze vertoonden een aan elkaar tegengestelde werking. Om dit aan te geven noemde men de ene soort lading *positieve lading*, de andere soort *negatieve lading*.

Oorspronkelijk meende men te moeten aannemen, dat slechts de positieve lading verplaatsbaar was. Sinds de ontdekkingen van Crookes weet men dat ook de negatieve lading te verplaatsen is.

Opgaven

1. Vertel iets van de verschijnselen der wrijvingselektriciteit
2. Wat verstaat U onder elektrisch geladen?
3. Wat verstaat U onder een goede isolator?
4. Wat verstaat U onder een geleider?
5. Wat gebeurt er als een geladen geleider met aarde wordt verbonden?
6. Noem enige eenvoudige proeven met wrijving van vaste stoffen tegen elkaar. Beschrijf drie proeven, door U zelf genomen.

7. Welke elektrische verschijnselen behandelt de elektrostatica?
8. Wat verstaat U onder de elektrostatische veldsterkte?
9. Wat is de betekenis van een krachtlijn?
10. Vertel iets van het elektrostatische veld tussen twee, tegengesteld geladen, vlakke metalen platen. De luchtspleet is klein.
11. Schets het verloop der krachtlijnen tussen twee tegengesteld geladen lichamen. Het ene lichaam is een ronde metalen staaf, 1 cm dik. Het andere lichaam is een ronde metalen bus, die om de staaf is geschoven. De luchtspleet is naar alle zijden even groot, en wel 0,5 cm.

§ 2. Het bombarderen van vaste stoffen met elektronen

Stel U voor, dat we beschikken over vrije elektronen. We zorgen er nu voor, dat zij een grote snelheid hebben en dat zij een vaste stof op een bepaalde plaats treffen.

Voor de *niet-geleiders* valt dan het volgende op te merken. De elektronen *dringen min of meer in de stof binnen* en worden daar opgenomen door atomen. Dit wil zeggen, dat de vaste stof op die plaats negatief elektrisch geladen wordt (fig. VII-1). Voorts,

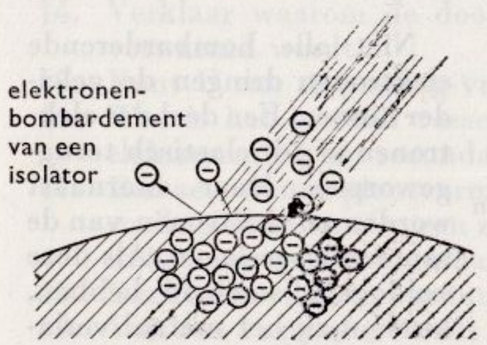


Fig. VII-1

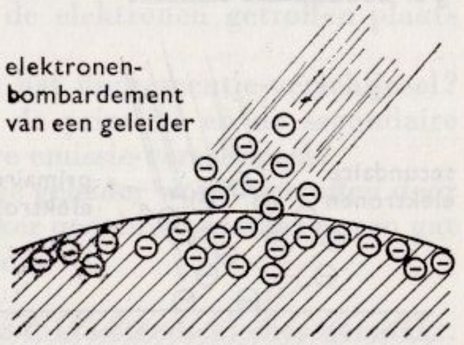


Fig. VII-2

dat de lading op die plaats blijft. Door de hoge weerstand kan de lading zich moeilijk verdelen en is moeilijk te neutraliseren. Ook ontstaat er *warmte-ontwikkeling*, doordat bij de afremming van de snelheid tijdens de indringing arbeidsvermogen vrij komt.

Bij sommige vaste stoffen, zoals zinksilicaat, wordt de arbeid der elektronen gebruikt om de vaste stof licht te doen uitstralen. Deze uitstraling kan zeer kort duren, b.v. een duizendste sec.

Er zijn echter ook stoffen, die langer oplichten na het bombardement, b.v. een halve seconde. Het oplichten wil niet zeggen, dat de stof gaat gloeien. Het is te vergelijken met het oplichten van de z.g. radium-wijzerplaat van uurwerken. Het verschijnsel van het oplichten wordt in de techniek veelvuldig toegepast. Van stoffen, die oplichten, zegt men dat ze *fluoresceren*.

Wat gebeurt er als een geleider met elektronen gebombardeerd wordt? (Zie fig. VII-2.)

Ook hier treedt oplading en verwarming op. Stel, dat we een arbeid A hebben gebruikt om de elektronen te versnellen en dat de afremming van alle elektronen volledig is. Dan zou er dus een arbeidsvermogen A in het metaal terecht zijn gekomen als warmte. Dit blijkt niet altijd geheel waar te zijn. Soms wordt ongeveer een honderdste van de arbeid, soms meer, voor andere verschijnselen gebruikt.

Een der verschijnselen is het optreden van de röntgenstralen. Het is een soort lichtverschijnsel, *dat ons oog niet kan zien*.

De röntgen-stralen zijn ook voor de techniek en de medische wetenschap zeer belangrijk. Het is mogelijk om er mee door dikke ijzeren platen te „schijnen".

§ 3. Secundaire emissie

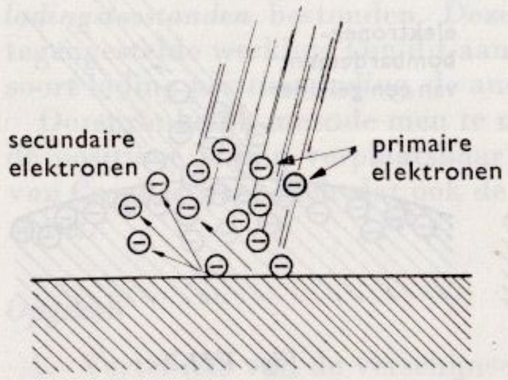


Fig. VII-3

Niet alle bombarderende elektronen dringen de geleider binnen. Een deel der elektronen wordt elastisch teruggeworpen. Maar daarnaast worden er elektronen van de atomen losgeslagen. Als deze voldoende snelheid hebben, kunnen zij het metaal verlaten. Ook hier spreekt men van *emissie*, maar nu van *elektronenemissie*.

De bombarderende elektronen noemt men de *primaire*, de losgeslagen, uit het metaal komende elektronen de *secundaire* elektronen (zie fig. VII-3).

Aan deze soort emissie heeft men de naam *secundaire emissie* gegeven. (Ook bij een bombardement met ionen treedt elektronenemissie op.) Hoe kunnen we nu merken, dat er inderdaad secundaire elektronenemissie bestaat?

Dit is waar te nemen door het aantal van het metaal terugkerende elektronen te vergelijken met het aantal bombarderende elektronen. Onder voor de secundaire emissie gunstige omstandigheden is het aantal secundaire elektronen ca 10 × groter. In sommige gevallen is de secundaire emissie een zeer ongewenst verschijnsel. In andere wordt er met goed gevolg gebruik van gemaakt.

De hierboven beschreven verschijnselen zijn alle van groot belang voor de goede werking van elektronenbuizen.

Om misverstand te voorkomen zij vermeld, dat bij de boven beschreven verschijnselen is aangenomen, dat de bombarderende elektronen volstrekt ongehinderd door de proefruimte kunnen vliegen. Dit betekent, dat er vrijwel geen gasmoleculen of -atomen in aanwezig mogen zijn. Deze zouden te veel botsingen veroorzaken. Een dergelijke ruimte noemt men een luchtledige of geëvacueerde ruimte (vacuum).

Opgaven

12. Vertel iets van het bombarderen van vaste stoffen met elektronen.
13. Leg uit, dat de bombarderende elektronen bij een isolator op de gebombardeerde plaats een lading vormen. Waarom zal deze lading zich over een geleider verdelen?
14. Verklaar waarom de door de elektronen getroffen plaats verwarmd wordt.
15. Kent U een toepassing van het fluorescentie-verschijnsel?
16. Wat is het verschil tussen de primaire en de secundaire elektronen bij het secundaire emissie-verschijnsel?
17. Een zeer dunne plaatvormige geleider wordt getroffen door snelle elektronen. Op een zeker ogenblik ontstaat er een gat in het oppervlak. Verklaar dit.
18. Vertel iets van een vacuum.
19. Van een vaste stof wordt de dikte steeds kleiner gemaakt. De stof wordt beschoten met elektronen. Wat zal er op een zeker ogenblik gebeuren?

§ 4. Het foto-elektrisch effect

Foto-emissie

Wanneer licht op een metalen plaat valt, kunnen uit die plaat elektronen vrijgemaakt worden, waardoor een elektrische stroom ontstaat. De energie van het licht maakt elektronen uit de metaalatomen los. Sommige elektronen krijgen daarbij een

voldoende snelheid om uit het metaaloppervlak te treden. Dit verschijnsel noemt men het „*foto-elektrisch effect*" (zie fig. VII-4).

Enkele stoffen vertonen dit verschijnsel in relatief sterke mate, zoals b.v. caesium, selenium, germanium e.d.

Men maakt van dit foto-elektrisch effect gebruik in de z.g. fotobuizen en foto-elektrische cellen (fotocellen) voor:

a. het in- en uitschakelen van de straatverlichting,
b. het aftasten van het geluidsspoor bij de sprekende film,
c. het tellen van voorwerpen,
d. het regelen van machines,
e. het meten van licht,
f. het onderscheiden van kleuren enz.

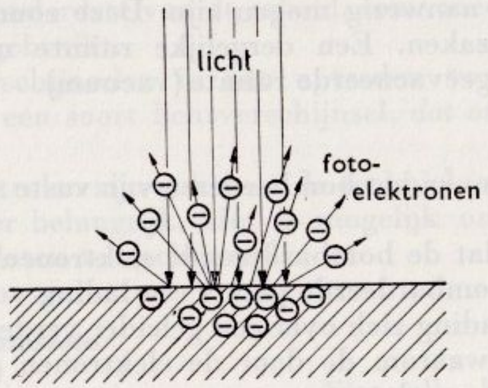


Fig. VII-4

Opgaven

20. Vertel iets van de toepassing van de foto-elektrische cel.
21. Vertel iets van het foto-elektrisch effect.
22. Een metalen plaat is in een vacuum opgesteld. De plaat wordt sterk positief geladen. Vervolgens laat men licht op de plaat vallen. Wat zal er met de lading gebeuren?

§ 5. Wanneer treden elektronen buiten de geleider?

Beschouwd wordt het geval, dat er noch te veel noch te weinig elektronen in de geleider aanwezig zijn. Deze is dus neutraal. In de geleider vinden onder invloed van onderlinge botsingen grillige bewegingen plaats van vrije elektronen. Deze geschieden in hoofdzaak in de ruimten tussen het ionenrooster.

We volgen nu de weg van de elektronen, welke op verschillende plaatsen naar de oppervlakte van de geleider schieten.

Zullen deze het oppervlak verlaten en in de ruimte terecht komen?

Voor het geval er geen bijzondere krachten optreden, zullen zij tengevolge van de traagheid in hun beweging volharden.

We weten echter, dat de geleider *positief* elektrisch wordt geladen zodra er elektronen aan worden onttrokken. Er ontstaat dan een elektrostatisch veld. De (negatieve) elektronen zullen onder invloed daarvan afgeremd, en weer naar de geleider teruggetrokken worden.

Tot nu toe zien we twee invloeden werken op de elektronen, die het metaaloppervlak verlaten:

1e het arbeidsvermogen van de elektronen; dit maakt het mogelijk, dat er arbeid wordt *geleverd;*
2e de elektrostatische krachten van de positief elektrisch geladen geleider; de beweging tegen deze kracht in *kost* arbeid.

We beschouwen nu het geval, dat de arbeid, die de elektronen kunnen leveren, te *klein* is om uit de tweede invloed, die van het elektrische veld, te geraken. Op het ogenblik, dat het oppervlak wordt verlaten, zullen deze elektronen sterk worden afgeremd, even tot rust komen en terugkeren. Daarna weer, tengevolge van nieuwe botsingen, snelheid krijgen in andere richtingen en in het ionenrooster verdwijnen. Dit zal gebeuren op vele plaatsen van de oppervlakte. De oorzaak hiervan is een voortdurende elektronenbeweging. Dit betekent echter, dat er juist even buiten het positieve oppervlak van de geleider een *laagje elektronen* aanwezig moet zijn.

Weliswaar zullen er telkens elektronen uit verdwijnen, maar de lege plaatsen worden weer aangevuld. Het laagje zal dus voortdurend weer andere elektronen bevatten. Het ligt vermoedelijk tussen 10^{-8} en 10^{-9} cm afstand van de oppervlakte af. De positieve laag en de negatieve laag samen noemt men een elektrische *dubbellaag*. Tussen deze beide lagen bestaat een elektrostatisch veld.

Wat is de invloed van deze elektrische dubbellaag? De aankomende elektronen worden nu *afgeremd*, zoals reeds beschreven, door aantrekkingskrachten van de positieve ionen en bovendien door de *afstotende* kracht van de elektronenlaag (fig. VII-5).

Wanneer kan een elektron door deze laag heendringen? Dit is het geval, indien het arbeidsvermogen, hetwelk het elektron kan afstaan, groter is dan de arbeid, nodig om de beide krachten te overwinnen. De grootte van deze krachten hangt af van de

soort atomen, waaruit de geleider is opgebouwd. De grootte van de arbeid zal daar dus eveneens van afhangen.

Wanneer de elektronen door deze laag heen schieten, zegt men, dat zij *uittreden;* de grootte van de arbeid, nodig om een geleider te kunnen verlaten, wordt genoemd *uittree-arbeid*. Gewoonlijk is het arbeidsvermogen van de elektronen hiervoor niet groot genoeg. Dit is echter sterk afhankelijk van de temperatuur.

Fig. VII-5

Opgaven

23. Vertel iets van het gedrag van vrije elektronen in een geleider.
24. Noem de drie invloeden, welke werken op een vrij elektron, dat naar de buitenzijde van een geleider beweegt.
25. Verklaar waarom het arbeid kost om een elektron van een positieve lading af te bewegen.
26. Zal de uittree-arbeid voor alle soorten geleiders even groot zijn? Waarom niet?
27. Hoe zoudt U het uittreden van elektronen kunnen bevorderen?

§ 6. Emissie van elektronen door verhitting (thermische emissie)

In het voorgaande werd dit vraagstuk in beginsel besproken. Het antwoord op bovenstaande vraag luidt: Een vrij elektron, dat in beweging is, kan arbeid *afstaan*.

Deze arbeid is nodig om een elektron uit de geleider te doen treden door de elektrische dubbellaag heen.

Willen we elektronen doen uittreden, dan bestaat deze mogelijkheid door de geleider te verhitten totdat de uittree-arbeid

voldoende is om de tegenwerkende krachten in de dubbellaag te overwinnen (fig. VII-5). Door de verhitting krijgen de elektronen een grotere snelheid en daardoor ook een groter arbeidsvermogen (van beweging).

Er vindt dan „emissie" plaats. Deze soort emissie noemen we thermische elektronenemissie. D.w.z. emissie door warmtetoevoer.

Emissie kan ook plaats vinden door:

a. stootionisatie zie blz. 12
b. secundaire emissie zie blz. 72
c. foto-emissie zie blz. 73

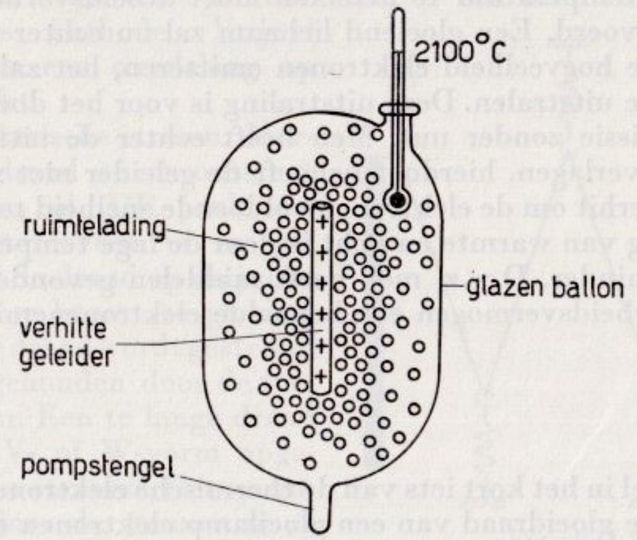


Fig. VII-6

Zodra nu de in vacuum geplaatste geleider voldoende wordt verhit, begint de emissie. De uittredende elektronen vormen een zwerm deeltjes om de verhitte geleider. Dit noemen we een elektronenwolk. Deze wolk is negatief geladen en zweeft in de ruimte. De lading van deze wolk noemt men de ruimtelading. Deze negatieve ruimtelading zal de later aankomende elektronen afstoten. Wanneer we van buiten af door de wolk heen op de verhitte geleider afgaan, zal de wolk steeds dichter worden (zie fig. VII-6). De wolk vult de beschikbare ruimte op. De geleider echter wordt tengevolge van de emissie meer en meer positief elektrisch geladen en oefent een terugtrekkende kracht uit op de uittredende elektronen. Op den duur zullen slechts enkele van de snelste elektronen nog in de elektronenwolk kunnen binnendringen. De overige keren terug naar de geleider.

De ruimtelading gedraagt zich als een werkelijke negatieve elektrische lading.

De „afremming" door de dubbellaag en daarmede de grootte van de uittree-arbeid is voor de verschillende geleiders niet even groot. Om een bepaalde arbeid te kunnen afstaan, is er een bepaalde snelheid van de elektronen nodig.

Om deze snelheden voor een voldoend aantal elektronen te bereiken, moet de geleider tot een hoge temperatuur worden verhit.

Zo is voor wolfraam nodig een temperatuur van ongeveer 2100 °C. De geleider is dan witgloeiend, zoals in gloeilampen. Om deze temperatuur te bereiken moet arbeidsvermogen worden toegevoerd. Een gloeiend lichaam zal nu echter niet alleen een zekere hoeveelheid elektronen emitteren, het zal ook licht en warmte uitstralen. Deze uitstraling is voor het doel der elektronenemissie zonder nut. Men heeft echter de uittree-arbeid weten te verlagen, hierdoor behoeft de geleider niet zo sterk te worden verhit om de elektronen voldoende snelheid te geven. De uitstraling van warmte en licht is door de lage temperatuur belangrijk minder. D.w.z. men heeft middelen gevonden om met minder arbeidsvermogen een bepaalde elektronenemissie te bereiken.

Opgaven

28. Vertel in het kort iets van de thermische elektronen-emissie.
29. Zal de gloeidraad van een gloeilamp elektronen emitteren? Waar blijven de elektronen?
30. In een gloeilamp wordt een gat gestoten. Wat zal er met de gloeiende draad gebeuren?
31. Wat is het verschil in doel van het gloeilichaam in een gloeilamp en in een emissielichaam? In welk opzicht komen zij overeen?

§ 7. Opbouw van een voor elektronen-emissie geschikte geleider

Bepaalde metalen en metaaloxyden werden het geschiktst bevonden als emissielichamen. Deze bevinding hangt samen met het arbeidsvermogen, nodig om een bepaalde elektronenemissie te bereiken. We omschrijven dit eerst op een wijze zoals gebruikelijk is. De geëmitteerde elektronenhoeveelheid per seconde vormt als het ware een elektrische stroom. De sterkte van deze stroom wordt meestal in mA aangegeven.

Een vierkante cm metaaloppervlak levert een bepaalde emissie bij een bepaalde temperatuur. Wolfraam b.v. bij 2100 °C 5 mA.

De tegenwoordige emissielichamen bestaan uit wolfraam, koper of nikkellegeringen. Op deze legeringen wordt een dun laagje *bariumoxyde* gemengd met *strontiumoxyde* aangebracht.

§ 8. Verhitten van de kathode

Het spreekt vanzelf, dat in een elektronisch toestel een elektrische verhitting van de kathode wordt gekozen. Een wolfraamdraad, ongeveer 0,05 mm dik, of een dun bandje doet dienst als kathode. Vrijwel steeds is er een oxydelaag op aangebracht.

Een elektrische stroom doorloopt de draad en er ontstaat warmte in, nl. I^2R joule/sec. De warmtetoevoer is zo gekozen, dat de draad op de juiste temperatuur begint te gloeien. Een rechte draad wordt gesteund en recht gehouden door de toevoerdraden. Een te lange draad wordt in V- of W-vorm opgehangen aan steunen. Het warmteverlies door de steunen is zo gering mogelijk gehouden (fig. VII-7). Deze wijze van verhitting noemen we *directe verhitting*. Als spanningsbronnen komen in aanmerking accumulatoren, droge elementen, gelijkstroommachines met lage spanning en soms wisselstroom.

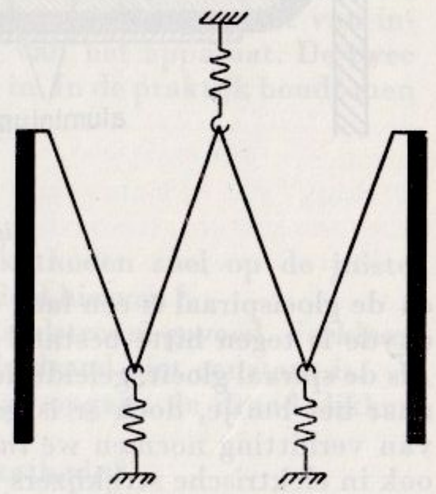


Fig. VII-7

Deze kathoden zijn in enkele tiende seconden op temperatuur. Zij koelen echter ook weer snel af. Bij gebruik van wisselstroom of veranderlijke stroom is de stroom van ogenblik tot ogenblik groter en kleiner. De warmte-ontwikkeling in, en de temperatuur van de draad dus eveneens. De veranderde temperatuur zal eveneens een van ogenblik tot ogenblik veranderende elektronenemissie tot gevolg hebben. Dit is voor sommige toepassingen ontoelaatbaar.

In die gevallen maakt men gebruik van een indirect verhitte kathode.

Zoals reeds werd opgemerkt, mag daarbij de elektronen-

emissie niet merkbaar veranderen. Dit is bereikt door de volgende wijze van opbouw. De emissielaag is aangebracht op een nikkelen of een koperen buisje. Het buisje is inwendig voorzien van een gloeispiraal of -bandje (zie fig. VII-8). Tussen het buisje

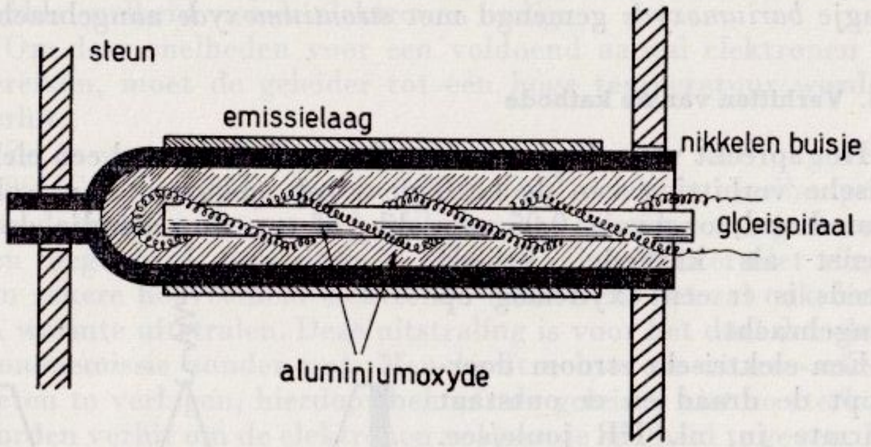


Fig. VII-8

en de gloeispiraal is een laag *aluminiumoxyde* aangebracht. Dit oxyde is tegen hitte bestand en vormt een elektrische isolatie. Als de spiraal gloeit, geleidt de aluminium-oxydelaag de warmte naar het buisje, doch er is geen elektrisch contact. Deze wijze van verhitting noemen we *indirecte verhitting*. Deze wordt o.a. ook in elektrische strijkijzers toegepast.

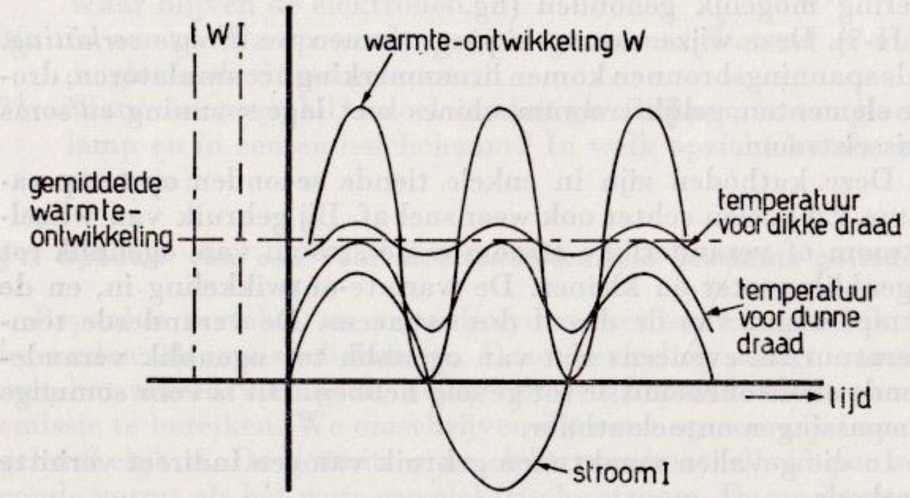


Fig. VII-9

Hoe is het nu te verklaren, dat de temperatuur en de emissie van het oppervlak nagenoeg constant zijn? (Zie fig. VII-9).

De dunne draad heeft een geringe warmtecapaciteit. Als de stroom tot nul daalt, zakt de temperatuur ook vrij snel tot nul. Als men een draad met een zeer grote warmtecapaciteit gebruikt, zal de temperatuur de eerste tijd nauwelijks iets dalen. Bij wisselstroom blijft de stroom niet nul, maar is bij 50 perioden per seconde na een honderdste seconde weer maximum.

Het warmteverlies wordt nu weer aangevuld enz. De oplossing lijkt dus een grote hoeveelheid warmte in de kathode op te zamelen. Deze verzameling kost echter veel tijd, de z.g. „opwarmtijd". Deze wenst men zo klein mogelijk te houden, omdat er anders te veel tijd verloren gaat tussen het moment van inschakelen en het normaal werken van het apparaat. De twee genoemde wensen gaan tegen elkaar in. In de praktijk houdt men met beide zo goed mogelijk rekening.

Opgaven

32. Waarom zijn direct verhitte kathoden snel op de juiste temperatuur? Wat is het voordeel hiervan?
33. Een dunne draad wordt met wisselstroom gevoed. Verklaar waarom de temperatuur van de draad niet constant is.
34. Wat gebeurt er als in de vorige opgave de draad dikker wordt gemaakt?
35. Wat betekent: direct verhitte kathode?
36. Vertel iets van de opbouw van de indirect verhitte kathode.

§ 9. Elektrische geleiding door het luchtledige

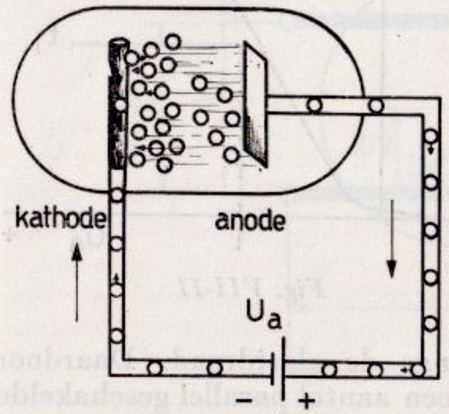


Fig. VII-10

Zoals we in § 6 van dit hoofdstuk zagen, ontstaat om een verhitte kathode een elektronenwolk, de ruimtelading.

Er zijn langzaam en snel bewegende elektronen bij. In de evenwichtstoestand neemt het aantal elektronen in de ruimtelading (gemiddeld) niet meer toe. Schakelen we nu een bepaalde anodespanning U_a in, dan worden er uit de ruimtelading elektronen naar de positieve anode

getrokken en aldaar opgenomen. De spanningsbron werkt als een elektronenzuig- en perspomp. De aangetrokken elektronen worden via de spanningsbron naar de kathode getransporteerd (zie fig. VII-10, waar een twee-elektrodenbuis of een diode getekend is).

Het tekort aan elektronen in de kathode, ontstaan door de emissie, wordt zodoende weer aangevuld. Niet de gehele ruimtelading wordt door de anode aangetrokken. Enkele elektronen, welke voldoende snelheid hebben, kunnen door de ruimtelading heen dringen. De overige worden naar de kathode teruggezonden.

We zien hieruit, dat een gedeelte van de elektronen geen, of juist tegenwerkende krachten ondervindt, zodat, tegen de ververwachting in, niet de gehele ruimtelading naar de anode wordt getrokken. Er zal bij een bepaalde anodespanning voor een gegeven buis en kathodetemperatuur een bepaalde stroom ontstaan. De stroomsterkte wordt dan begrensd door de „tegenwerking" van de ruimtelading. Wel zal bij een hogere anodespanning een grotere stroomsterkte ontstaan, doordat het elektrische veld sterker wordt. Maken we de anodespanning steeds hoger, dan zal voor een bepaalde waarde van U_a de stroom niet meer toenemen. Dit noemen we de *verzadigingsstroom*. Daarbij wordt dan de gehele emissie van de kathode naar de anode afgezogen. In fig. VII-11 zien we de grafische voorstelling van de anodestroom. Deze stijgt bij hogere anodespanning. Bij een kathodetemperatuur t_1 wordt voor een anodespanning $U_a = 1$ de verzadigingsstroom bereikt. Voor $U_a = 0$ bereiken toch enkele snelle elektronen de anode; dit is het gebied van de aanloopstroom, dat bij $U_a = -1{,}3$ V begint. Vergroten we de emissie door de temperatuur van de kathode tot t_2 te verhogen, dan vinden we een grotere verzadigingsstroom.

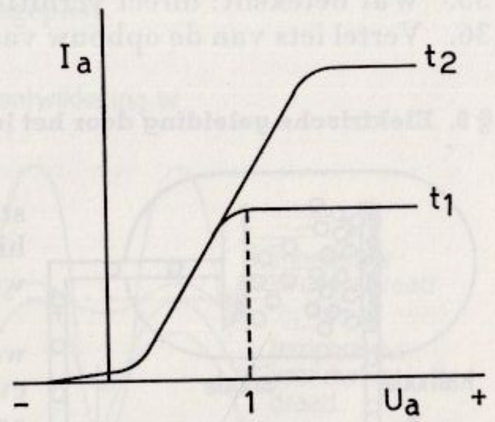


Fig. VII-11

De hoge gloeispanning bij direct verhitte kathoden veroorzaakt een afnemende U_a langs de gloeidraad. Daardoor gedraagt de buis zich a.h.w. als een aantal parallel geschakelde kleinere buizen met verschillende anodespanningen (fig. VII-13).

Bij 1 is het potentiaalverschil groter dan bij 2 enz. Een gevolg is, dat de gloeidraad (schijnbaar) minder elektronen afstaat dan is te verwachten voor een gegeven anodespanning. Een ander gevolg is, dat voor eventuele lage anodespanningen een gedeelte

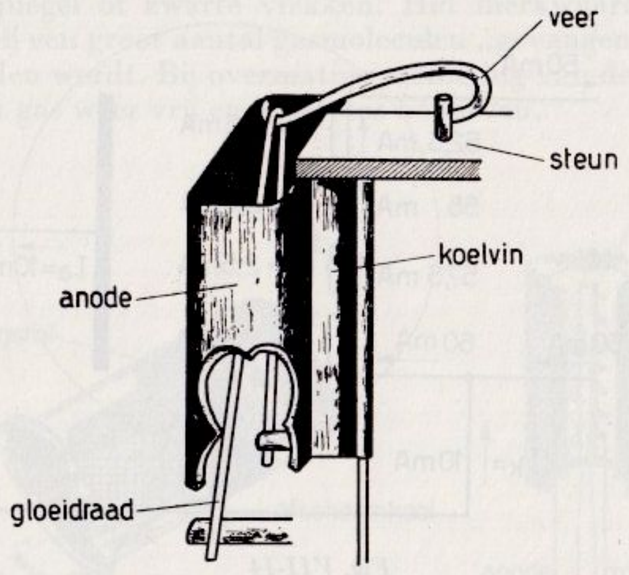


Fig. VII-12

van de kathode geen emissie levert. (Verklaar dit.) Een lage spanning U_f is dus gewenst voor direct verhitte kathoden.

De temperatuur van de direct verhitte draad is niet overal gelijk. Naast de gloeistroom loopt ook de emissiestroom door de

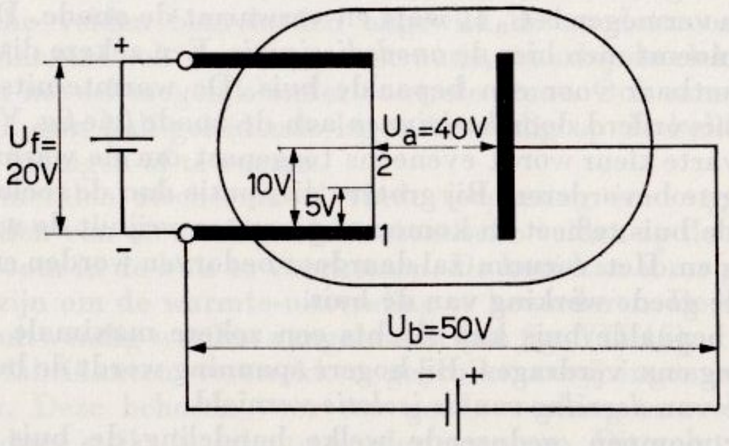


Fig. VII-13

draad (zie fig. VII-14). Het verschil in stroom zal een verschil in temperatuur en emissie veroorzaken van punt tot punt. De ondersteuning van de kathode zal eveneens, door het warmteverlies op die plaatsen, een lagere temperatuur doen ontstaan.

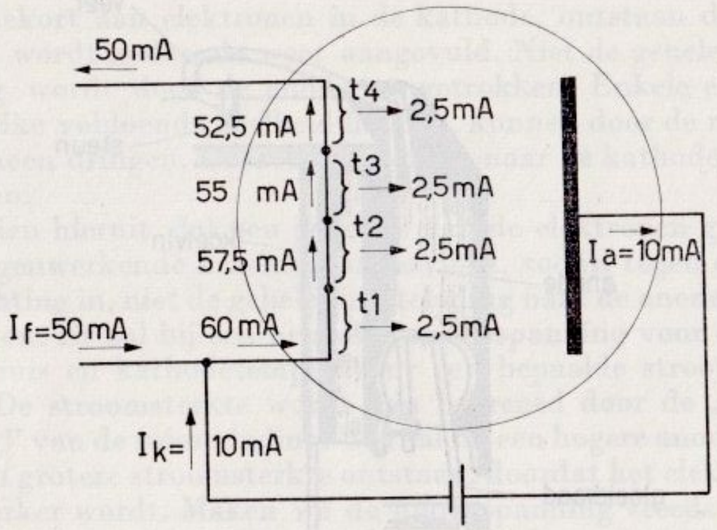


Fig. VII-14

De afstand en daarmee het veld tussen de anode en de kathode is niet overal gelijk (zie fig. VII-12). Dit beïnvloedt het verloop van de karakteristiek.

Enkele snelle elektronen geraken op de anode, ook al is $U_b = 0$. Dit noemt men het verschijnsel van de *aanloopstroom* (zie fig. VII-11).

De energie der elektronen komt vrij aan de anode. Het betrokken vermogen is $U_a I_a$ watt en verwarmt de anode. Dit vermogen noemt men hier de *anodedissipatie*. Een zekere dissipatie is toelaatbaar voor een bepaalde buis. De warmte-uitstraling wordt bevorderd door *koelvinnen* aan de anode (zie fig. VII-12). Een zwarte kleur wordt eveneens toegepast om de warmte-uitstraling te bevorderen. Bij grotere dissipatie dan de toelaatbare wordt de buis te heet en komen er gasresten vrij uit de wand en elektroden. Het vacuum zal daardoor bedorven worden en daarmede de goede werking van de buis.

Een bepaalde buis kan slechts een zekere maximale anodespanning enz. verdragen. Bij hogere spanning wordt de buis tengevolge van *doorslag van de isolatie* vernield.

Door pompen, gedurende welke handeling de buis verhit wordt, kan een zekere hoge mate van luchtverdunning worden

bereikt en dan wordt de buis dichtgesmolten. Dit kan nog geen hoogvacuum worden genoemd. Door inductieve verhitting wordt een stukje metaal (Ba of Mg) verdampt in de ballon (de z.g. getter). De metaaldamp condenseert op de ballonwand als een spiegel of zwarte vlekken. Het merkwaardige is nu, dat daarbij een groot aantal gasmoleculen „gevangen genomen" en gebonden wordt. Bij overmatige verhitting van de buis komt echter het gas weer vrij en is de buis bedorven.

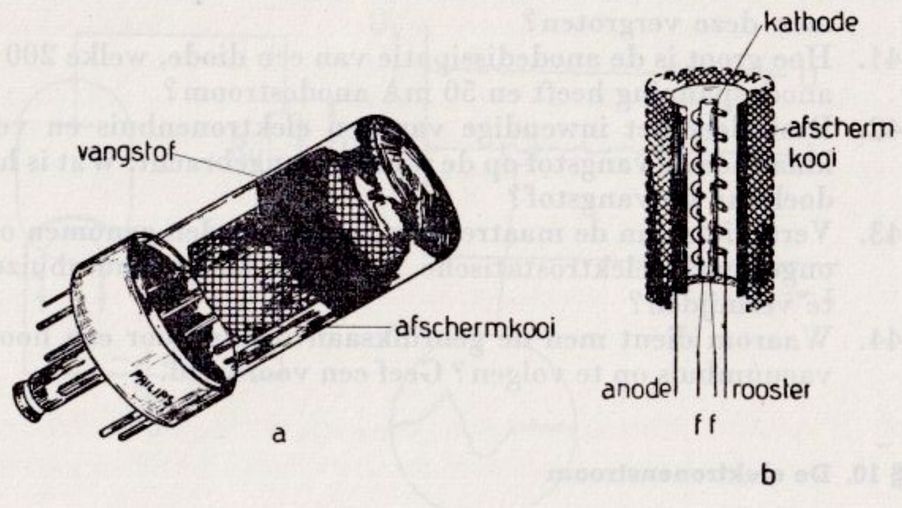


Fig. VII-15

Zoals reeds aangegeven kunnen op isolatiedelen elektrische ladingen worden verzameld. De daardoor ontstaande elektrostatische velden beïnvloeden ongewild de anodestroom. Men zorgt daarom ook voor een constructie, waarbij de elektronenstroom zoveel mogelijk onder controle staat. Ook maakt men gebruik van half-geleidende lagen inwendig op de ballonwand om de ladingen af te voeren.

De metalen afschermkooi vindt toepassing om ongewenste invloeden van uitwendige elektrostatische velden op de elektronenstroom in de buis te voorkomen. De kooi kan soms geperforeerd zijn om de warmte-uitstraling te bevorderen. De kooi kan in- of uitwendig worden aangebracht (zie fig. VII-15).

De fabrikanten verstrekken gebruiksaanwijzingen voor de buizen. Deze behoren voor een goede werking en voldoende levensduur strikt in acht te worden genomen. Dit volgt gedeeltelijk al uit het voorgaande.

Opgaven

37. Verklaar het ontstaan van een stroom in een keten, bestaande uit een batterij en een diode. Wat gebeurt er als men de aansluitingen op de batterij verwisselt?
38. Wat verstaan we onder de ruimtelading en waardoor ontstaat deze?
39. Wat verstaan we onder de verzadigingsstroom en hoe kunnen we deze stroom groter maken?
40. Vertel iets van de toelaatbare anodedissipatie. Hoe kan men deze vergroten?
41. Hoe groot is de anodedissipatie van een diode, welke 200 V anodespanning heeft en 50 mA anodestroom?
42. Bestudeer het inwendige van een elektronenbuis en verklaar hoe de vangstof op de wand is aangebracht. Wat is het doel van de vangstof?
43. Vertel iets van de maatregelen, welke worden genomen om ongewenste elektrostatische velden in hoogvacuumbuizen te vermijden?
44. Waarom dient men de gebruiksaanwijzing voor een hoogvacuumbuis op te volgen? Geef een voorbeeld.

§ 10. De elektronenstroom

Het uittreden van de elektronen uit de kathode kan men geen volkomen regelmatig verschijnsel noemen. De elektronen verlaten nl. het ionenrooster onregelmatig. We kunnen hierbij denken aan een busje met knikkers, waarin zich gaten bevinden waardoor telkens een knikker naar buiten kan als we het busje schudden. De emissie en daarmede de ontladingsstroom veranderen dus van ogenblik tot ogenblik iets.

Nu bestaat de stroom in een diode uit een grote hoeveelheid bewegende elektronen. Telkens als een elektron op de anode aankomt, is een gedeelte van de stroom in de vorm van een hoeveelheid lading, groot e coulomb, geleverd (zie fig. VII-10). Het aantal elektronenladingen is weliswaar zeer groot, maar de stroom bestaat toch uit kleine porties en is dus niet volkomen gelijkmatig. Op te merken valt nog, dat er wel veel elektronen tegelijk of bijna tegelijk op de anode aankomen. De hoeveelheid elektronen per seconde, dat is de stroomsterkte, zal echter tengevolge van allerlei toevallige omstandigheden, onderlinge botsingen e.d., niet volkomen constant zijn (zie fig. VII-16).

Het gevolg van deze beide effecten is, dat de stroomdoorgang

min of meer onregelmatig zal geschieden. Het is alsof telkens een lading hagelkorrels de anode treft. Men noemt dit het *hageleffect*. Is er een ruimtelading aanwezig, dan remt deze de emissiefluctuaties gedeeltelijk af, doordat de elektronen er tijdelijk in worden bewaard.

Het resultaat van het voorgaande is een fluctuerende stroom in de uitwendige keten. Bevindt zich een weerstand of impedantie in de uitwendige keten, dan zal de spanning hieraan niet

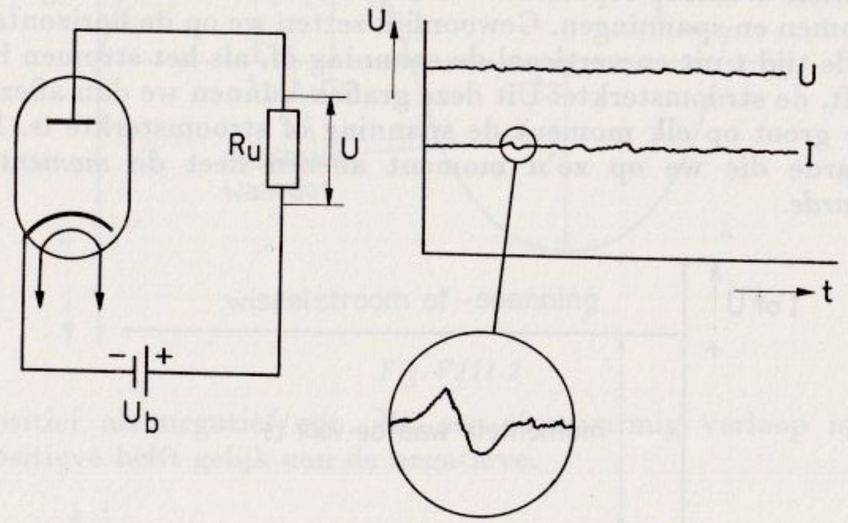


Fig. VII-16

volkomen constant zijn. Ondanks het feit dus, dat een constante anodespanning wordt geleverd, b.v. door een batterij, zal toch de ontladingsstroom kleine variaties vertonen (zie fig. VII-16). De gevolgen van dit belangrijke verschijnsel worden later besproken. Het ruisen van radio-ontvangtoestellen en versterkers wordt o.a. hierdoor veroorzaakt.

Opgave

45. Vertel iets van het hageleffect.

HOOFDSTUK VIII

AFVLAKINRICHTINGEN

§ 1. Stromen en spanningen

Omdat we hierbij veel met grafische voorstellingen zullen moeten werken, repeteren we nog even de voorstelling van stromen en spanningen. Gewoonlijk zetten we op de horizontale as de tijd t uit en verticaal de spanning of, als het stromen betreft, de stroomsterkte. Uit deze grafiek kunnen we dan aflezen hoe groot op elk moment de spanning of stroomsterkte is. De waarde die we op zo'n moment aflezen heet de *momentele waarde*.

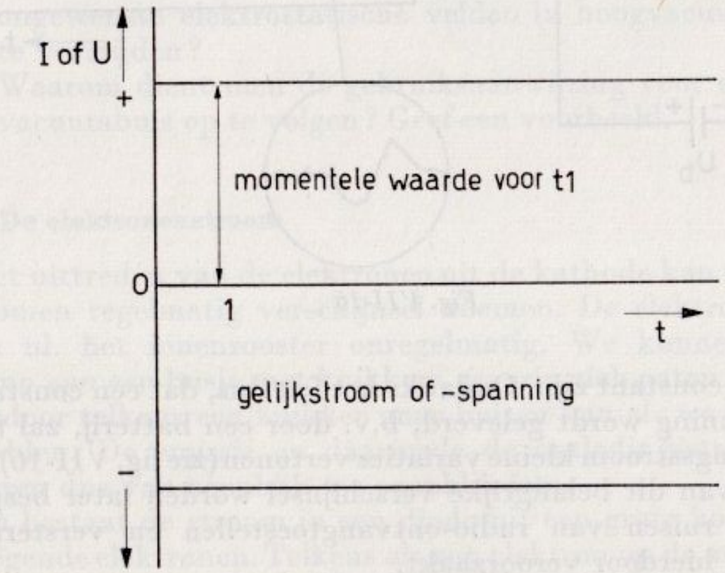


Fig. VII-1

Voor zuivere gelijkstroom of -spanning is de momentele waarde steeds dezelfde en is de grafische voorstelling een rechte lijn evenwijdig aan de tijd-as (fig. VIII-1).

De momentele waarde kan òf positief òf negatief zijn.

Voor onvervormde wisselstroom of -spanning wordt de grafische voorstelling een sinuslijn, die zich slingert om de tijd-as. De momentele waarde verandert regelmatig en wordt beurtelings positief en negatief (fig. VIII-2).

Behalve de momentele waarde kunnen we ook een *maximale waarde* aflezen. De minimale waarde wordt niet speciaal genoemd, maar is steeds nul. De maximale waarde kan zowel

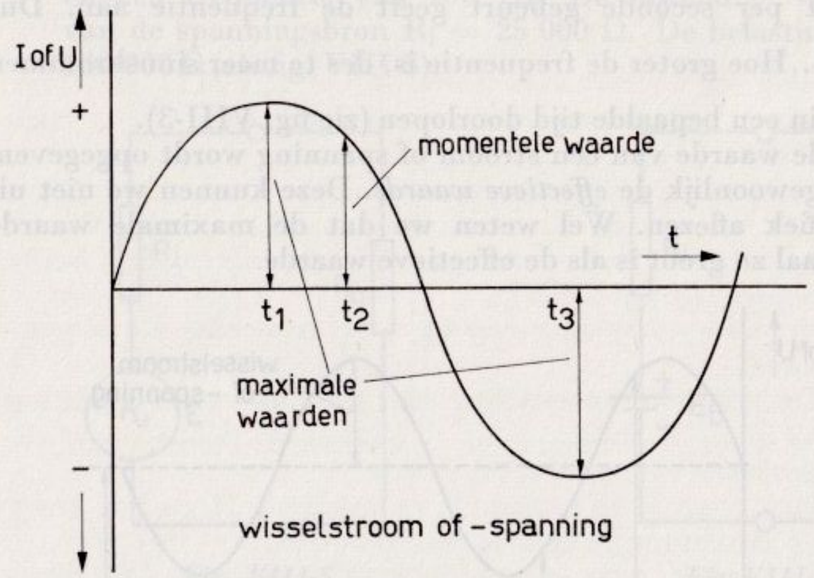


Fig. VIII-2

positief als negatief zijn. Bij een sinusvormig verloop is de positieve helft gelijk aan de negatieve.

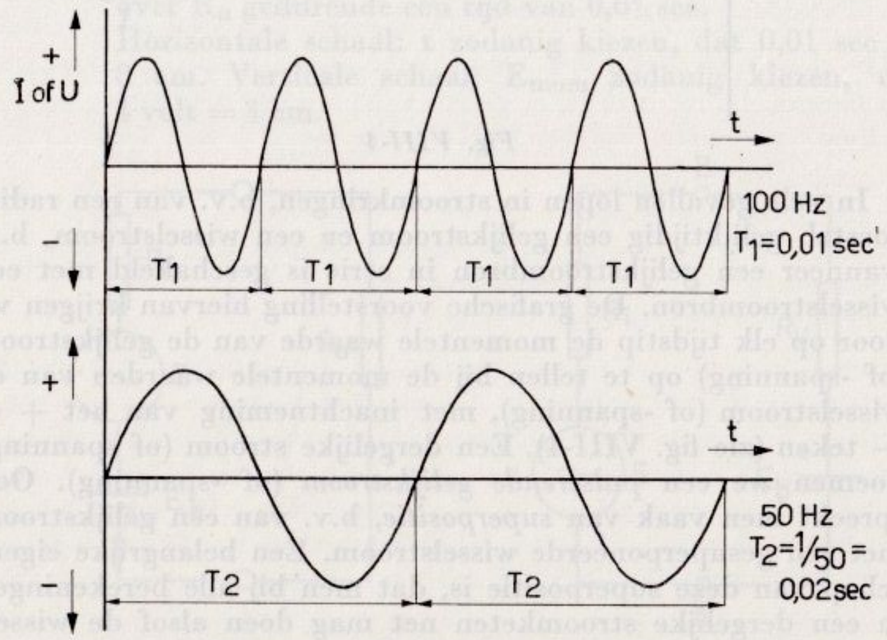


Fig. VIII-3

Uit de grafiek is tevens de frequentie f van de wisselspanning (of -stroom) af te lezen. Telkens als een volledige sinuskromme is doorlopen, is een zekere tijd T verstreken. Het aantal malen dat dit per seconde gebeurt geeft de frequentie aan. Dus $f = \frac{1}{T}$. Hoe groter de frequentie is, des te meer sinuskrommen zijn er in een bepaalde tijd doorlopen (zie fig. VIII-3).

Als de waarde van een stroom of spanning wordt opgegeven, is dat gewoonlijk de *effectieve waarde*. Deze kunnen we niet uit de grafiek aflezen. Wel weten we dat de maximale waarde $\sqrt{2}$ maal zo groot is als de effectieve waarde.

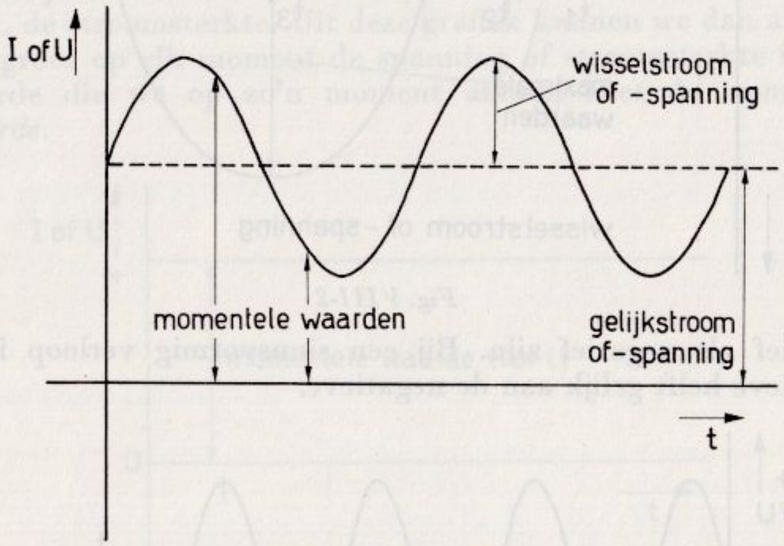


Fig. VIII-4

In vele gevallen lopen in stroomkringen, b.v. van een radiotoestel, gelijktijdig een gelijkstroom en een wisselstroom, b.v. wanneer een gelijkstroombron in serie is geschakeld met een wisselstroombron. De grafische voorstelling hiervan krijgen we door op elk tijdstip de momentele waarde van de gelijkstroom (of -spanning) op te tellen bij de momentele waarden van de wisselstroom (of -spanning), met inachtneming van het + of — teken (zie fig. VIII-4). Een dergelijke stroom (of spanning) noemen we een *pulserende gelijkstroom* (of -spanning). Ook spreekt men vaak van *superpositie*, b.v. van een gelijkstroom met een gesuperponeerde wisselstroom. Een belangrijke eigenschap van deze superpositie is, dat men bij alle berekeningen in een dergelijke stroomketen net mag doen alsof de wisselstroom en de gelijkstroom afzonderlijk optreden.

Opgaven

1. Een wisselspanningsbron heeft een E.M.K. van 7 volt (eff.) en een frequentie van 400 Hz. De inwendige weerstand van de spanningsbron $R_i = 25\,000\ \Omega$. De belasting $R_u = 100\,000\ \Omega$ (zie fig. VIII-5).

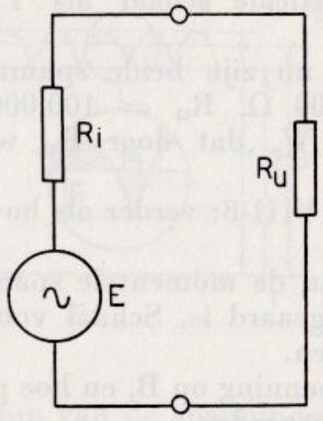


Fig. VIII-5

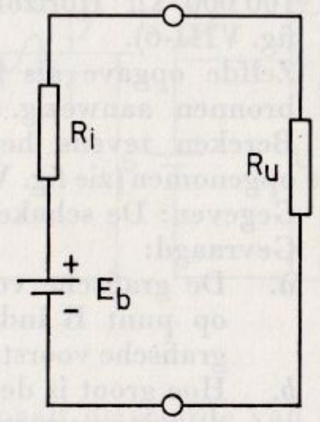


Fig. VIII-6

Gevraagd:

a. De grafische voorstelling van de momentele spanning over R_u gedurende een tijd van 0,01 sec.
Horizontale schaal: t zodanig kiezen, dat 0,01 sec = 8 cm. Verticale schaal: E_{mom} zodanig kiezen, dat 4 volt = 1 cm.

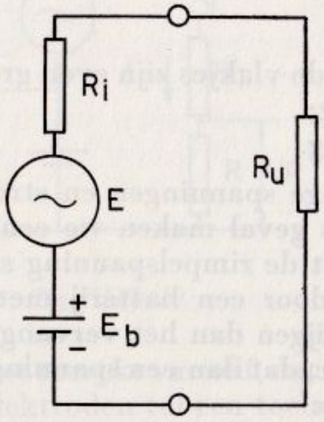


Fig. VIII-7

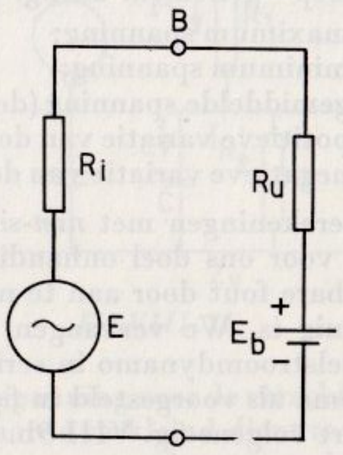


Fig. VIII-8

b. Doe hetzelfde voor de stroom. Horizontale schaal als bij *a*. Verticale schaal zodanig kiezen, dat I_{mom} bij 40 μA 1 cm is.

2. Zelfde opgave als 1 (a en b), indien E wordt vervangen door een gelijkstroombron, die in onbelaste toestand een spanning $E_b = 200$ volt heeft. $R_i = 25\,000\ \Omega$ en $R_u = 100\,000\ \Omega$. Horizontale en verticale schaal als 1 (zie fig. VIII-6).
3. Zelfde opgave als boven, maar nu zijn beide spanningsbronnen aanwezig. $R_i = 25\,000\ \Omega$, $R_u = 100\,000\ \Omega$. Bereken tevens het vermogen W, dat door R_u wordt opgenomen (zie fig. VIII-7).
4. Gegeven: De schakeling van fig. VIII-8; verder als boven. Gevraagd:
   a. De grafische voorstelling van de momentele spanning op punt B indien punt A geaard is. Schaal voor de grafische voorstelling als boven.
   b. Hoe groot is de maximale spanning op B, en hoe groot de minimum en gemiddelde waarde?
   c. Hoe groot moet de spanning E worden om de minimale waarde van de spanning op B juist nul te laten worden. Druk deze wisselspanning uit in eff. waarde.

§ 2. Afvlakking van de rimpelspanning

De door een gelijkstroomnet geleverde spanning vertoont een rimpel. In fig. VIII-8 is de rimpelspanning nog eens „onder de loep" genomen. In fig. VIII-9 zien we:

1. maximum spanning;
2. minimum spanning;
3. gemiddelde spanning (de gearceerde vlakjes zijn even groot);
4. positieve variatie van de spanning;
5. negatieve variatie van de spanning.

Berekeningen met *niet*-sinusvormige spanningen en stromen zijn voor ons doel onhandig. In ons geval maken we een toelaatbare fout door aan te nemen, dat de rimpelspanning sinusvormig is. We vervangen het net door een batterij met een wisselstroomdynamo in serie. We krijgen dan het vervangingsschema als voorgesteld in fig. VIII-9c, dat dan een spanning oplevert volgens fig. VIII-9b. Hierbij is:

6. constante gelijkspanning U_b, gelijk aan 3, geleverd door een batterij;

7. sinusvormige wisselspanning U (tijdsduur van een periode bedraagt T) wordt geleverd door een wisselstroomdynamo; de *effectieve* waarde van U komt overeen met die van de rimpelspanning in a.

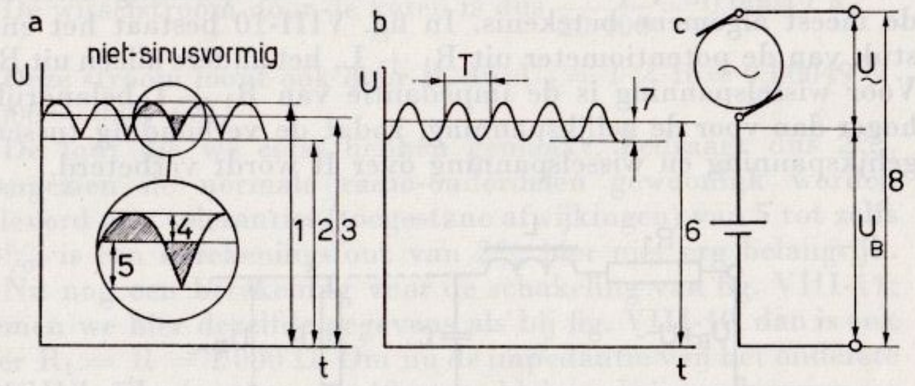


Fig. VIII-9

8. som van de spanningen U_b en U bepaalt de waarde van de stroom door een weerstand.

De stroom door deze weerstand, b.v. de gloeidraad van een D-buis, zal dus evenmin constant zijn, doch voortdurend veranderen. Dit betekent in de regel, dat er bij voeding van een D-buis uit een gelijkstroomnet *ontoelaatbare* anodewisselstromen zullen ontstaan (brom).

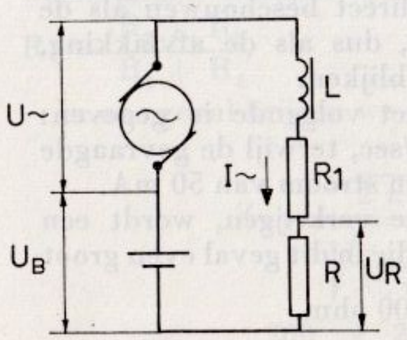


Fig. VIII-10

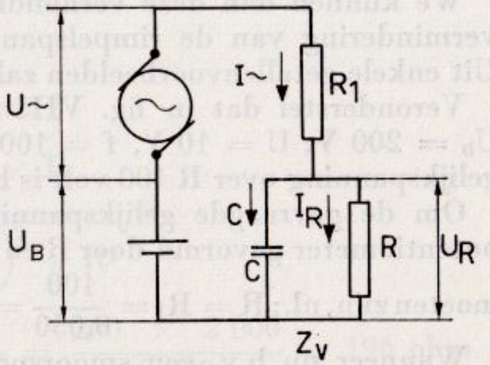


Fig. VIII-11

Het spreekt vanzelf, dat de rimpelspanning voor de verschillende elektroden tot een toelaatbare waarde verkleind dient te worden. We maken hiervoor gebruik van weerstanden en condensatoren (zie fig. VIII-11) of combinaties van smoorspoelen en con-

densatoren (zie fig. VIII-12). Dergelijke combinaties noemt men afvlakfilters.

In de regel berusten alle filters op het principe, dat er voor de wisselspanning een potentiometer wordt gevormd, waarbij we dan het begrip potentiometer nemen als spanningsdeler in de meest algemene betekenis. In fig. VIII-10 bestaat het ene stuk van de potentiometer uit $R_1 + L$, het andere alleen uit R. Voor wisselspanning is de impedantie van $R_1 + L$ belangrijk hoger dan voor de gelijkspanning, zodat de verhouding tussen gelijkspanning en wisselspanning over R wordt verbeterd.

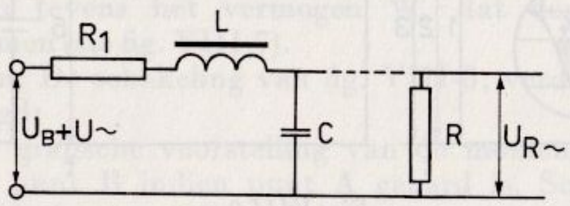


Fig. VIII-12

In fig .VIII-11 is de verhouding tussen de beide delen van de potentiometer verbeterd door van het onderste stuk, dat bestaat uit C en R, de impedantie voor wisselspanning kleiner te maken. Tenslotte zien we in fig. VIII-12 de combinatie van beide methoden.

De berekening van dergelijke filters is vrij eenvoudig, wanneer de verhouding van de impedantie van beide delen van de potentiometer groter is dan ongeveer 10.

We kunnen dan deze verhouding direct beschouwen als de vermindering van de rimpelspanning, dus als de afvlakking. Uit enkele getallenvoorbeelden zal dit blijken.

Veronderstel dat in fig. VIII-10 het volgende is gegeven: $U_b = 200$ V; $U = 10$ V, $f = 100$ per/sec, terwijl de gevraagde gelijkspanning over R 100 volt is bij een stroom van 50 mA.

Om de gevraagde gelijkspanning te verkrijgen, wordt een potentiometer gevormd door R en R_1, die in dit geval even groot moeten zijn, nl.: $R = R_1 = \frac{100}{0{,}050} = 2\,000$ ohm.

Wanneer nu b.v. een smoorspoel van 32 H wordt gekozen voor de afvlakking van de rimpelspanning, dan zal de impedantie van deze spoel zijn: $2\,\pi\,f\,L = 2\,\pi\,.\,100\,.\,32 =$ ca 20 000 ohm. Volgens ruwe schatting is deze afvlakking 10 $\times$, zodat $U_R = 1$ volt.
Doen we dit nauwkeuriger, dan moeten we eerst de impedantie bepalen van $R + R_1 + L$.

Deze is:

$$Z_{tot} = \sqrt{(R + R_1)^2 + (2\pi\,f\,L)^2} =$$

$$\sqrt{4\,000^2 + 20\,000^2} = \sqrt{416\,000\,000} = 20\,400 \text{ ohm.}$$

De wisselstroom door de keten is dus $\frac{10}{20\,400} = 0{,}00049$ A.

Deze stroom loopt ook door R, dus $U_R = I \times R = 0{,}00049 \times 2\,000 = 0{,}98$ volt.

De fout die we eerst hebben gemaakt, bedraagt dus 2%. Aangezien de normale radio-onderdelen gewoonlijk worden geleverd met toleranties (toegestane afwijkingen) van 5 tot zelfs 20%, is een berekeningsfout van 2% hier niet erg belangrijk.

Nu nog een berekening voor de schakeling van fig. VIII-11; nemen we hier dezelfde gegevens als bij fig. VIII-10, dan is ook hier $R_1 = R = 2\,000\ \Omega$. Om nu de impedantie van het onderste deel van de potentiometer 10 $\times$ zo klein te krijgen, kunnen we een condensator nemen van 8 μF. Want $Z_C = \frac{1}{2\pi fC} =$

$$\frac{1}{2\pi\,.\,100\,.\,8\,.\,10^{-6}} = \frac{10^6}{5\,024} = 199 = \text{ca. } 200 \text{ ohm.}$$

Willen we in dit geval de afvlakking zeer nauwkeurig berekenen, dan moeten we als volgt te werk gaan:

Eerst berekenen we de impedantie van de parallelschakeling van C en R. Dat is echter niet zo eenvoudig. Wanneer we twee weerstanden parallel schakelen, is de vervangingsweerstand $R_v = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2}$.

In ons geval krijgen we echter:

$$Z_v = \frac{\frac{1}{2\,\pi\,f\,C} \times R}{\sqrt{\left(\frac{1}{2\,\pi\,f\,C}\right)^2 + R^2}} =$$

$$\frac{200 \times 2\,000}{\sqrt{200^2 + 2\,000^2}} = \frac{200 \times 2\,000}{2\,040} = 196 \text{ ohm.}$$

Vervolgens moeten wij Z_v optellen bij R_1, maar omdat ook hier nog een faseverschuiving plaatsvindt, mogen we ook deze niet rechtstreeks optellen. We krijgen dan:

$Z_{tot} = \sqrt{R_1 + Z_v^2} = \sqrt{2\,000^2 + 196^2} = \sqrt{4\,000\,000 + 38\,416} = \sqrt{4\,038\,416} = 2\,009{,}5$ ohm. [1])

De rimpelspanning wordt dan $U_R \times \frac{Z_v}{Z_{tot}} = 10 \cdot \frac{196}{2\,009{,}5} =$ 0,975 volt.

De fout, die we met de ruwe berekening hebben gemaakt is dus ca 2½%.

Wordt de impedantie verhouding tussen Z_C en R of tussen Z_C en R_1 kleiner, dan wordt de fout groter. Is de verhouding 3 tot 4 maal, dan maakt men in het algemeen een fout van 10%.

Bij de schakeling volgens fig. VIII-12 is de situatie nog iets anders. Nemen we aan, dat voor R_1, R, L en C dezelfde waarden gelden als voor de schakelingen volgens fig. VIII-10 en 11, dan wordt de impedantie van het ene deel van de potentiometer bepaald door L (R_1 wordt verwaarloosd) en die van het andere deel door C (R wordt verwaarloosd). De verhouding van de impedantie is dan 20 000 op 200, zodat de rimpelspanning nu 100 × wordt verzwakt. De fout, die we nu nog maken (behalve de reeds genoemde verwaarlozingen), ontstaat omdat $Z_{tot} = 2\,\pi\,f\,L - \frac{1}{2\,\pi\,f\,C} = 20\,000 - 200 = 19\,800$ ohm, zodat $U_R = 10 . \frac{200}{19\,800} = 0{,}99$ volt. Het zeer nauwkeurig berekenen van deze gehele schakeling, zonder enige verwaarlozing, willen we niet aanbevelen, omdat de hierbij onvermijdelijke rekenfouten de theoretische nauwkeurigheid weer teniet zullen doen.

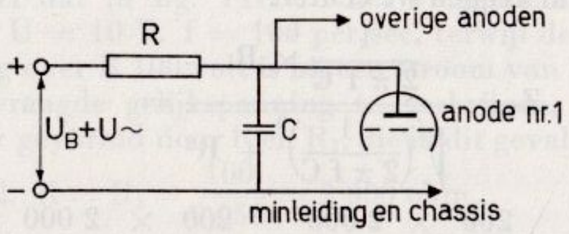


Fig. VIII-13

In fig. VIII-13 is een RC-schakeling voor anodevoeding weergegeven. De weerstand R verhoogt de inwendige weerstand van de spanningsbron, doch de condensator C doet deze invloed

[1]) Eigenlijk mogen we deze formule alleen toepassen als de fasehoek tussen R en Z_v precies 90° is. De afwijking is hier echter zo klein, dat deze nauwelijks te berekenen is.

teniet. Bij lage netspanning moet de waarde van R klein worden gehouden. Om in dit geval voldoende afvlakking te bereiken, dienen we grote filtercondensatoren te kiezen. Toepassen van elektrolytische condensatoren is dan wenselijk, omdat deze bij

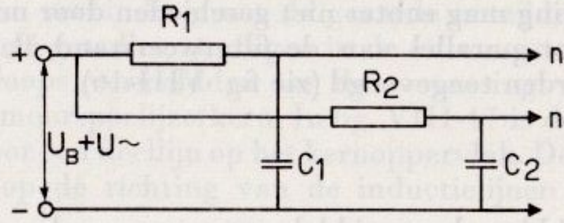


Fig. VIII-14

kleine afmetingen een grote capaciteit bezitten. In enkele gevallen biedt de schakeling van fig. VIII-14 voordelen.

Schakelen we 2 filters met elk een bepaalde afvlakking achter elkaar, dan is de afvlakking op het tweede filter ongeveer gelijk aan het produkt van beide waarden. Op het eerste filter is

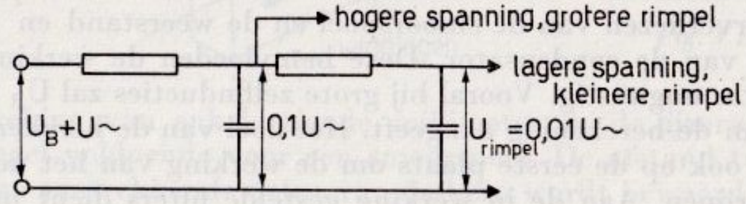


Fig. VIII-15

weliswaar de rimpelspanning hoger dan op het tweede, doch de gelijkspanning eveneens (zie fig. VIII-15). In bepaalde gevallen is deze hoge spanning, ondanks de grote rimpel, goed bruikbaar. Bij filters met een *grote* afvlakking wordt de rimpelspanning lager, als we deze schakeling toepassen met b.v. 2 × de halve

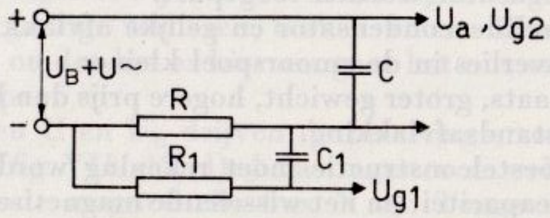


Fig. VIII 16

waarde van R en C. Het gelijkspanningsverlies is daarbij vrijwel even groot.

Wordt de weerstand R in de min-leiding geplaatst, dan kan het spanningsverlies in deze weerstand geheel of gedeeltelijk worden gebruikt voor de negatieve roosterspanning. De afvlakking van deze spanning mag echter niet geschieden door middel van een condensator parallel aan de filterweerstand R. Een extra filter moet worden toegevoegd (zie fig. VIII-16).

§ 3. Smoorspoelen

Omtrent de afvlakking door middel van smoorspoelen voerden we in § 2 enkele berekeningen uit. De werking van de smoorspoel ontstaat o.a. doordat voor gelijkstroom de weerstand belangrijk lager is dan voor wisselstroom.

Dit geldt in het bijzonder voor smoorspoelen met gelamelleerde ijzerkernen en luchtspleet, welke voor afvlakfilters worden gebruikt. De invloed van de luchtspleet wordt nog nader besproken.

Zoals we weten was de invloed van de weerstand R in fig. VIII-12 verwaarloosd. We verwaarloosden echter ook de nulcapaciteit en ijzerverliezen van de smoorspoel en de weerstand en zelfinductie van de condensator. Deze beïnvloeden de werking van het filter ongunstig. Vooral bij grote zelfinducties zal U_R groter zijn dan de berekening aangeeft. Het doel van de berekeningen is dan ook op de eerste plaats om de werking van het netfilter te begrijpen. Aan de in werking gestelde filters dient men de berekeningen te controleren.

We vermelden nog enkele *voor-* en *nadelen* van de smoorspoelschakeling.

a. Bij eenzelfde spannings- en energieverlies in r en een even grote condensator is de smoorspoelafvlakking beter dan de weerstandsafvlakking.

b. Bij eenzelfde spanningsverlies en gelijke afvlakking kan een kleinere condensator worden toegepast.

c. Bij eenzelfde condensator en gelijke afvlakking is het gelijkspanningsverlies in de smoorspoel kleiner.

d. Meer plaats, groter gewicht, hogere prijs dan bij toepassing van de weerstandsafvlakking.

e. In de toestelconstructie moet rekening worden gehouden met de eigen capaciteit en het wisselende magnetische strooiveld van de smoorspoel.

Andere schakelingen dan die van fig. VIII-12 komen voor. De voornaamste kunnen we afleiden uit fig. VIII-16 door een of meer malen de weerstand R met een smoorspoel aan te vullen. Schakelingen met in beide netleidingen een smoorspoel komen eveneens voor bij gelijkstroomnetvoeding. Omdat dan geen rechtstreekse verbinding met de geaarde netzijde bestaat, ontstaan in enkele gevallen storingen in de ontvangst.

Terloops vermeldden we de toepassing van de luchtspleet in de smoorspoelijzerkern. In fig. VIII-17 is deze spleet aangegeven door een deellijn op het kernoppervlak. De spleet wordt loodrecht op de richting van de inductielijnen aangebracht. Een

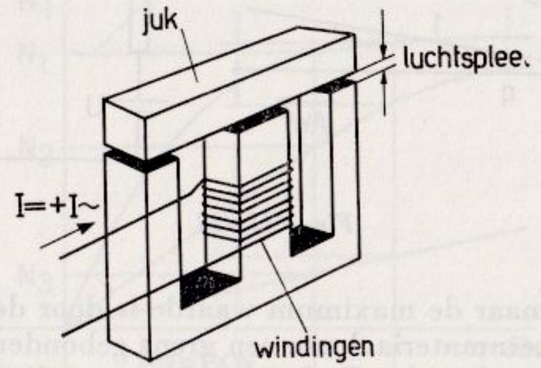


Fig. VIII-17

onderbreking van enkele tiende millimeter in de ijzerweg is in de regel voldoende voor een smoorspoel. De afstand tussen de elkaar aantrekkende delen van de kern wordt bewaard door de spleet op te vullen met niet-magnetisch, niet-geleidend materiaal, b.v. papier. De invloed van een luchtspleet op de toestand in een *ijzerkern* is tamelijk ingewikkeld. Deze toestand hangt af van de optredende ijzerverliezen. Deze verliezen beïnvloeden de grootte van de zelfinductie ongunstig. Bij het ontwerpen van een smoorspoel worden deze ijzerverliezen dan ook klein gemaakt. Dit wordt voornamelijk bereikt door een juiste keuze van het kernmateriaal en het lamelleren van de kern. Als we in het volgende bij onze beschouwingen uitgaan van een kern met zeer geringe verliezen, maken we een kleine fout. Dit is toelaatbaar, omdat het er hier om gaat het nut van de luchtspleet te begrijpen.

De spanningen U en U_R drijven de belastingsstroom door de smoorspoel (zie fig. VIII-12). De belastingsstroom wekt in de spoel een veranderende magnetische flux N op. Tengevolge van de wisselende flux ontstaat een E.M.K. van zelfinductie, welke

de spanning U tegenwerkt. Hoe groter de verandering van de flux, des te sterker de „smorende" werking van de spoel.

Als er ijzer in de spoel is aangebracht, wordt een belangrijke versterking van de flux verkregen.

Dit is te zien in fig. VIII-18. Horizontaal is het aantal ampèrewindingen van de spoel uitgezet, verticaal de flux (N) die hiervan het gevolg is. Door de ijzerkern neemt de flux veel sneller toe

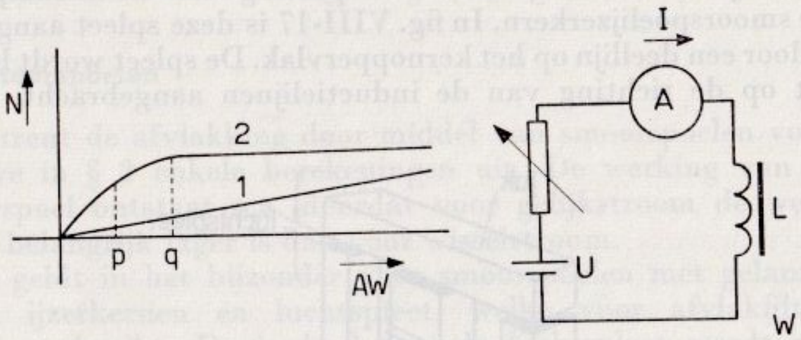


Fig. VIII-18

(kromme 2), maar de maximum waarde is door de eigenschappen van het kernmateriaal aan een grens gebonden. Deze grens is ongeveer bij q bereikt. De kern is dan verzadigd. Kromme 1 geldt als er geen ijzerkern is.

Nu gaan door de spoel een gelijkstroom en een wisselstroom ($I + I_R$ in fig. VIII-17, afkomstig van $U + U_R$). Door deze wisselstroom wordt de stroom telkens groter en weer kleiner. Hierdoor ontstaat dan weer een wisselende flux. In fig. VIII-19 zien we hoe door een zelfde wisselstroom een veel kleinere fluxverande-

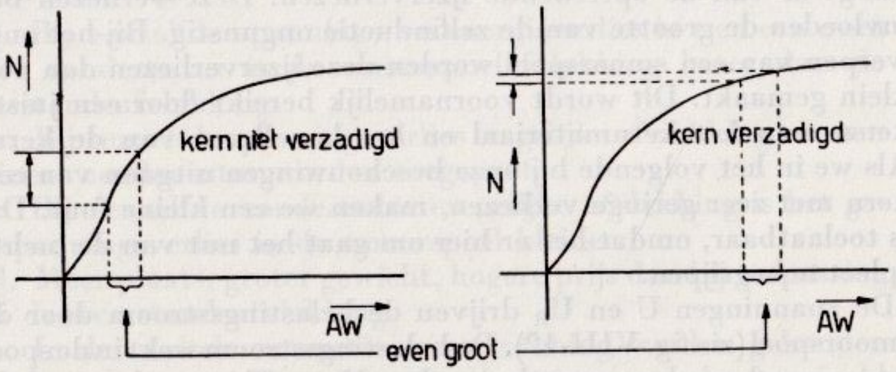


Fig. VIII-19

ring ontstaat, wanneer het aantal AW zo groot is, dat de kern verzadigd is. Door middel van de luchtspleet is het nu mogelijk de kromme ergens tussen 1 en 2 (fig. VIII-18) in te leggen, zodat zelfs bij een groot aantal AW de fluxverandering groot is. Dit is te zien in fig. VIII-20. Hiervoor geldt:

N_1: ijzerkern zonder luchtspleet. De kern is verzadigd, de fluxverandering is gering.

N_2: ijzerkern met juiste luchtspleet. De fluxverandering is groot.

N_3: ijzerkern met te grote luchtspleet. De fluxverandering is klein.

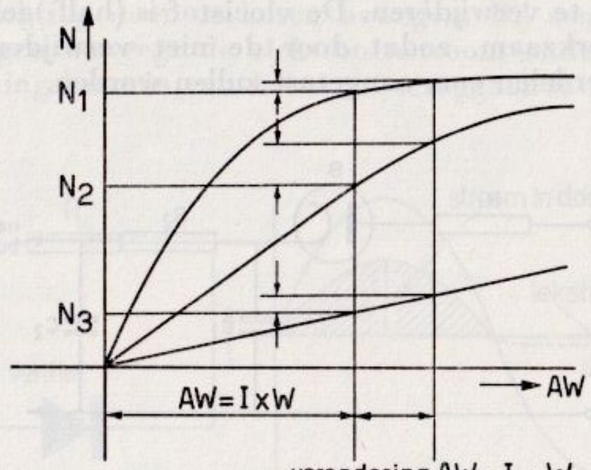


Fig. VIII-20

Hoe groter de fluxverandering, des te groter is de zelfinductie. Uit het bovenstaande volgt, dat een smoorspoel voor een bepaalde gemiddelde belastingsstroom wordt ontworpen en daarbij een bepaalde inductiewerking zal vertonen voor de rimpelstroom. Veranderingen aanbrengen in de luchtspleet, zonder controle met behulp van meetinstrumenten, is af te raden. Temeer, daar de grootte van de luchtspleet moeilijk is in te stellen en te meten. Soms is deze op het eerste gezicht in het geheel niet te zien.

§ 4. Beveiliging van elektrolytische filtercondensatoren

In het voorgaande werd aangetoond, dat het toepassen van elektrolytische condensatoren belangrijke voordelen biedt voor de afvlakking. Het gevaar bestaat echter, dat de toestelgebruiker de netsteker in omgekeerde zin in het stopcontact

steekt. Dat dan de gloeistroom in omgekeerde richting door de gloeidraadketen vloeit is geen bezwaar; de omgepoolde anodespanning is echter onbruikbaar, het toestel kan niet werken. Ontoelaatbaar is dit echter voor de elektrolytische afvlakcondensatoren. Voor een spanning tegengesteld aan de oorspronkelijke formeerspanning is de serieweerstand slechts enkele ohm, zodat er, zonder tegenmaatregelen, kortsluiting ontstaat.

Voor het geval de netveiligheid niet doorsmelt, wordt in de condensator C_1 een grote hoeveelheid warmte ontwikkeld, welke tot ontploffing kan leiden. Bij deze ontploffing wordt de inhoud van C_1 grotendeels door het toestel geslingerd en is daaruit zeer moeilijk te verwijderen. De vloeistof is (half-)geleidend en chemisch werkzaam, zodat door de niet verwijderde resten isolatie, onderdelen enz. aangetast zullen worden.

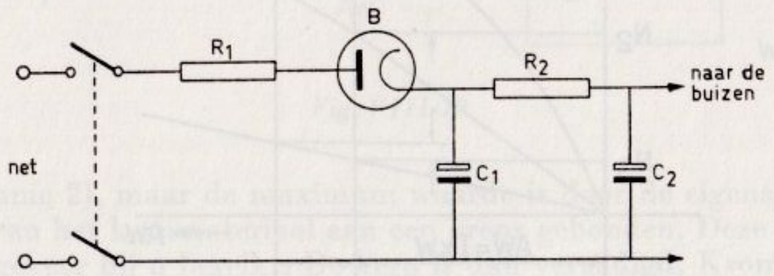


Fig. VIII-21

In het principeschema van fig. VIII-21 wordt ter beveiliging van de elektrolytische condensatoren als ventiel een gelijkrichtbuis gebruikt, n.l. B. Dit is een indirect verhitte hoogvacuümdiode. Om de normale anodestroom enz. voor de buizen door te laten is een anodespanning van enkele volts voldoende. Normaal wordt de positieve pool van het net via de weerstand R_1 met de anode van B verbonden. De spanning op de condensatoren C_1 en C_2 heeft dan de juiste richting. Wordt de minpool van het net met de anode B verbonden, dan laat de gelijkrichter geen stroom door. De condensatoren lopen nu geen gevaar beschadigd te worden.

HOOFDSTUK IX

VOEDING MET BEHULP VAN WISSELSTROOMBRONNEN

§ 1. Omzetting van wissel- in gelijkstroomenergie

Kenmerkend voor een gelijkstroom is, dat de elektronen zich in één richting door de keten bewegen. Bij een wisselstroom daarentegen beweegt de elektronenstroom onder invloed van de spanningsbron in een heen- en teruggaande richting.

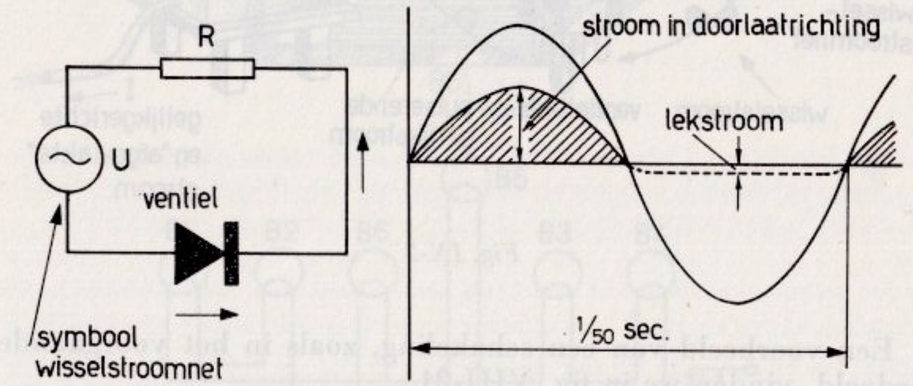


Fig. IX-1

Een mogelijkheid om wisselstroom om te zetten in gelijkstroom ligt in schakelingen met gelijkrichters. Deze laten de stroom slechts in één richting door (of althans in de andere richting vrijwel niet).

Wordt een keten, voorzien van een geschikte gelijkrichter, aangesloten op een wisselstroomnet, dan zal in deze keten een voortdurende reeks van stroomstoten ontstaan in gelijke richting. We zeggen dan, dat de wisselstroom „gelijkgericht" is door middel van een „gelijkrichter".

De gelijkgerichte, veranderende stroom is niet zonder meer bruikbaar voor de voeding van elektronenbuizen (fig. IX-1).

Hiertoe dienen de stoten eerst te worden afgevlakt. Dit ge-

schiedt in de eerste plaats door toepassing van een grote buffercondensator, welke de stoten als lading opzamelt (zie fig. IX-2).

Is de gelijkspanning op de condensator echter nog niet voldoende afgevlakt voor het beoogde doel, dan kan de rimpelspanning verder worden verkleind, door tussen de buffercondensator en de belasting een geschikt filter te plaatsen (zie voorgaande hoofdstuk).

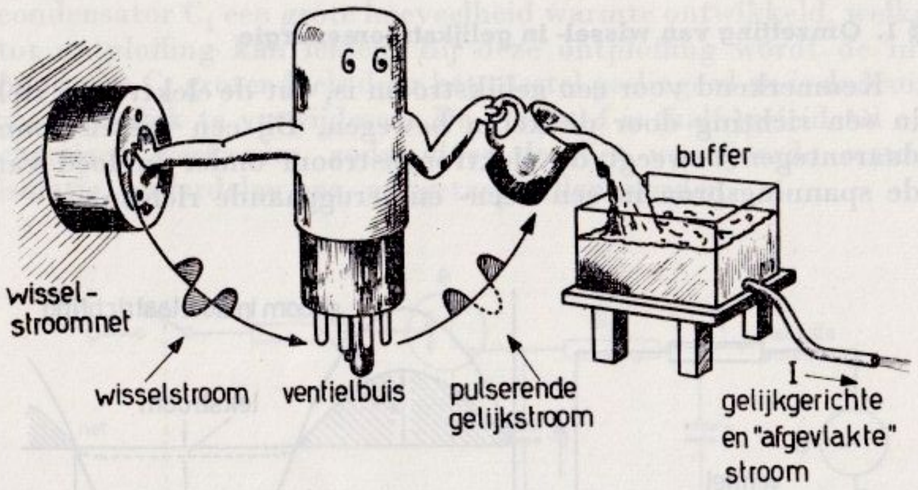


Fig. IX-2

Een voorbeeld van een schakeling, zoals in het voorgaande bedoeld, vinden we in fig. VIII-21.

Bij aansluiting van het voedingstoestel op het wisselstroomnet wordt C_1, de buffercondensator, via de ventielbuis B, opgeladen. R_2-C_2 vormt een afvlakfilter, die de rimpelspanning tot een toelaatbare waarde verkleint. Dergelijke gelijkrichters met filters noemen we „plaatspanningsapparaten" (afgekort: P.S.A.).

§ 2. Voeding met wisselstroom van indirect verhitte buizen

De gloeidraden worden in serie op het gelijk- of wisselstroomnet aangesloten.

De fabrikant moet in verband hiermede zorgen voor:

1e een voldoend hoge betrouwbare en constante isolatieweerstand tussen gloeidraad en kathode (en de uitwendige leidingen);

2e een voldoend hoge doorslagvastheid van de isolatie tussen gloeidraad en kathode. De grenswaarde hiervoor wordt door de fabrikant opgegeven. Voor wisselspanning geldt als grens de *maximum* waarde van de spanning U_{fk}.

De warmte-ontwikkeling van een wisselstroom in de gloeidraad is niet constant. Toch mag de kathode-emissie hierdoor niet worden beïnvloed. Dit wordt bereikt door toepassing van een kathode met een grote warmtecapaciteit.

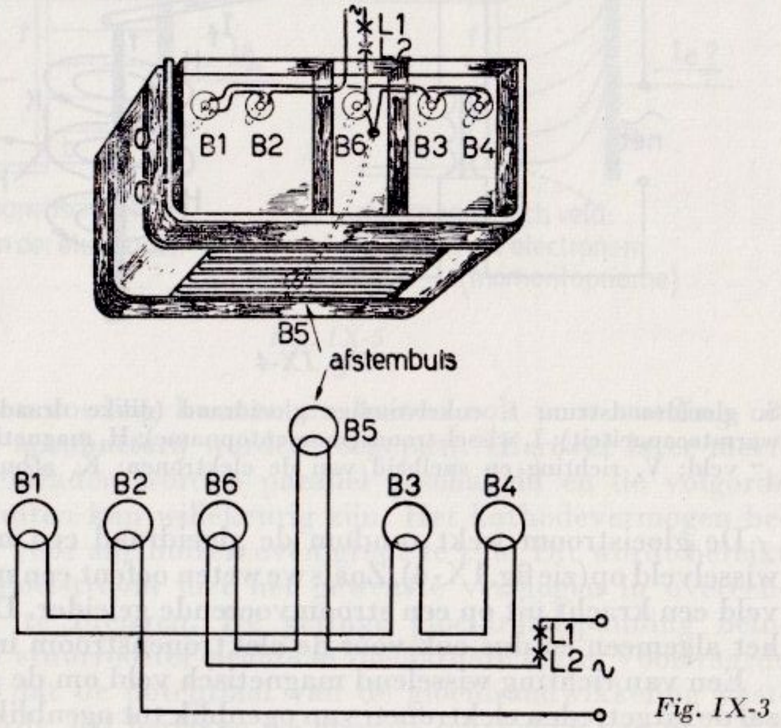


Fig. IX-3

De volgorde van de gloeidraden bij wisselstroomvoeding is, zoals we later zullen zien, van groot belang en de voorgeschreven volgorde dient te worden aangehouden. In fig. IX-3 zien we een voorbeeld van de montage van gloeidraadleidingen in een gelijkstroom/wisselstroomtoestel.

§ 3. Gloeidraadvoeding van indirect verhitte elektronenbuizen

Zoals was aangegeven dienen we voor een indirect verhitte elektronenbuis een kathode te kiezen met een voldoend grote warmtecapaciteit. Hiervoor kunnen we in beginsel een dikke draad gebruiken. Deze heeft een lage weerstand. De gloeidraad-

energie betrekken we uit het wisselstroomnet via een gloeistroomtransformator. De transformator wordt ondergebracht in het wisselstroomvoedingstoestel. De keuze van de grootte der gloeidraadspanning hangt samen met de invloed van het wisselend spanningsverschil tussen de gloeidraad en het stuurrooster. Door een lage gloeispanning te kiezen, beperken we de ongewenste besturing van de anodestroom.

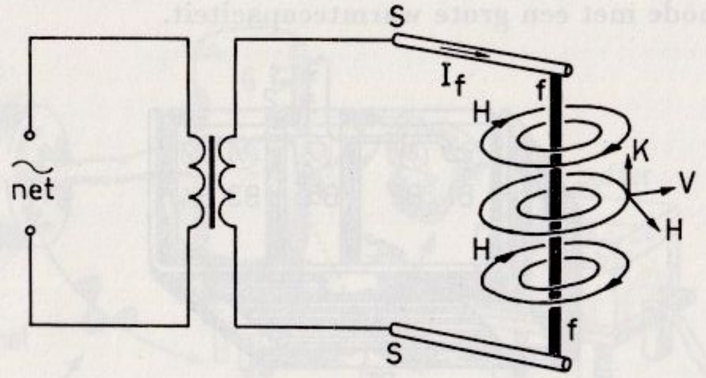


Fig. IX-4

S. gloeidraadsteun; f. enkelvoudige gloeidraad (dikke draad met grote warmtecapaciteit); I. wisselstroom (momentopname); H. magnetisch (wissel)-veld; V. richting en snelheid van de elektronen; K. afbuigkracht.

De gloeistroom wekt rondom de gloeidraad een magnetisch wisselveld op (zie fig. IX-4). Zoals we weten oefent een magnetisch veld een kracht uit op een stroomvoerende geleider. Dit geldt in het algemeen en dus ook voor de elektronenstroom in een buis.

Een van richting wisselend magnetisch veld om de gloeidraad zal de uitgetreden elektronen van ogenblik tot ogenblik van baan doen veranderen. Dit betekent, dat de aantallen op de anode aankomende elektronen (I_a) voortdurend ongewenst zullen fluctueren. Naarmate de gloeistroom groter is, zal deze beïnvloeding groter zijn (zie fig. IX-5).

Voor de meeste elektronenbuizen dienen we de direct verhitte kathodeconstructie te kiezen. Het kathodebuisje heeft overal dezelfde potentiaal en het spanningsverschil tussen rooster en kathode heeft nu één bepaalde waarde. Het magnetisch veld van de gloeidraad kan klein worden gemaakt. Dit bereiken we door de gloeistroom niet te groot te kiezen of de gloeidraad een nauwe lusvorm te geven. Het magnetisch veld van de lus is klein, omdat de velden van de heen- en teruggaande stromen elkaar vrijwel opheffen.

Lange gloeidraden worden een of tweemaal gespiraliseerd in het kathodebuisje opgeborgen. Het is echter soms tevens nodig om de gloeistroomtoevoerleidingen in en buiten de buizen eveneens dicht naast elkaar te leggen en te twisten. In de keuze van de grootte der gloeispanningen zijn we nu enigszins vrij. Voor de E-buizen is een spanning van 6,3 V gekozen. Behalve voor

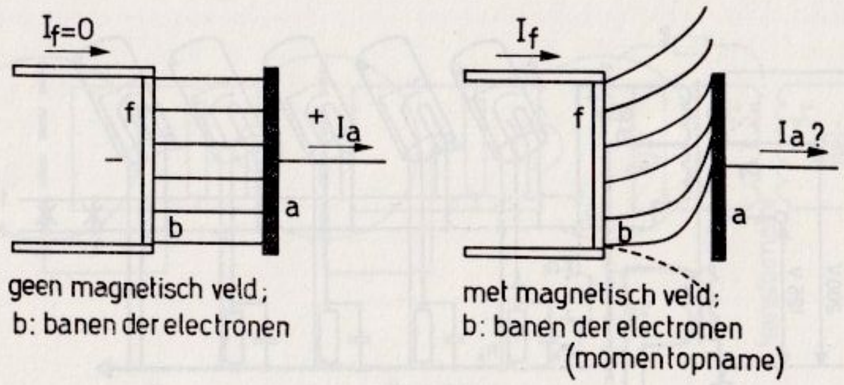


Fig. IX-5

wisselstroomvoeding kunnen de buizen ook voor voeding uit een 6,3 V accubatterij worden toegepast. Hierover later meer.

De gloeidraden worden parallel geschakeld en de volgorde van aansluiten kan willekeurig zijn. Het kathodevermogen behoeft niet voor alle buizen even groot te zijn. Dit wordt bereikt door de gloeistroom met het gewenste vermogen in overeenstemming te brengen. De geringe gloeidraadspanning beïnvloedt het stuurrooster slechts in toelaatbare mate. Voorwaarde is echter, dat de potentiaal van de gloeidraadwikkeling vastgelegd wordt. Dit bereiken we door de schakeling van fig. IX-6 toe te passen.

Hierin is:

Z_{fk}: impedantie tussen de gezamenlijke gloeidraden en kathoden;

Z : impedantie tussen de spoelen S_1 en S_2 van transformator T;

m : middenaftakking van S_2, is verbonden met de min- of kathodeleidingen.

De middenaftakking van de gloeidraadwikkeling is met de minleiding verbonden. Zonder deze verbinding kunnen S_2, de gloeistroomleiding en de gloeidraden een gedeelte van de netspanning aannemen via de potentiometerschakeling Z-Z_{fk}.

Door de verbinding m-n aan te brengen wordt Z_{fk} kortgesloten. Het spanningsverschil tussen g_1 en de leidingen 1 of 2 bedraagt nu hoogstens de halve gloeispanning. De invloed van de impedantie Z op de stuurroosters is nu uitgeschakeld.

Voor de gloeidraadvoeding van de gelijkrichtbuis is in dit geval een gescheiden wikkeling (S_3) aangebracht.

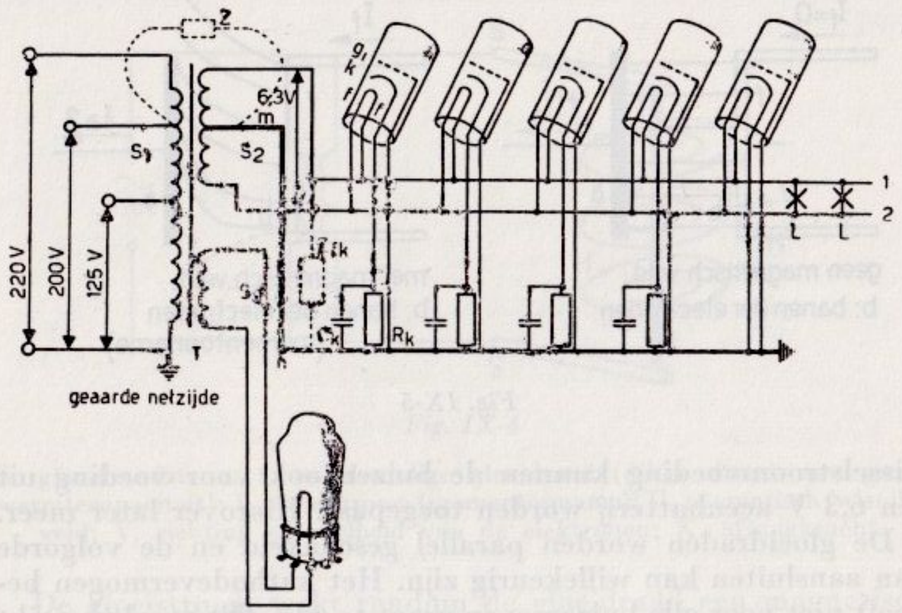


Fig. IX-6

In beginsel is het mogelijk om de gloeidraden van gelijkrichtbuizen op dezelfde wikkeling aan te sluiten als die der overige buizen. Hieraan zijn voor- en nadelen verbonden. In vele gevallen zijn de nadelen groter en wordt de gloeidraad van de gelijkrichtbuis op een gescheiden wikkeling S_3 aangesloten.

Deze is aangebracht op dezelfde voedingstransformator. De fabrikant kan nu de gloeispanning voor de gelijkrichtbuizen zo gunstig mogelijk kiezen.

Om bij de verschillende netspanningen de juiste gloeispanning te verkrijgen, wordt wel een carrouselschakelaar gebruikt. Hiermede wordt het aantal primaire wikkelingen met de te gebruiken netspanning in overeenstemming gebracht.

Alle secundaire spanningen behouden dan de juiste waarde.

De schaalverlichtingslampjes kunnen eveneens van de gloeistroomwikkeling af worden gevoed. De inschakelstroomstoot vloeit niet door de lampjes.

§ 4. Schakelingen voor de wisselstroomvoeding van direct verhitte buizen

De indirect verhitte kathodeconstructie is duurder dan de direct verhitte gloeidraadkathode. Waar toepassing van de duurdere kathode niet noodzakelijk is, gebruiken we een direct verhitte uitvoering.

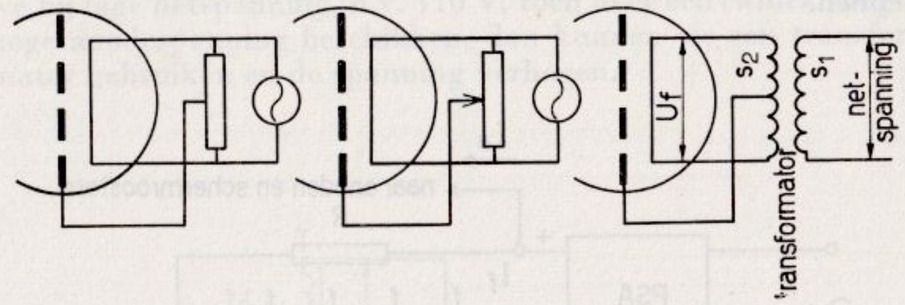


Fig. IX-7

We kiezen voor deze buizen een gloeidraadkathode met voldoende warmtecapaciteit. De gloeispanning dienen we met het oog op de wisselende rooster-gloeidraad-potentiaal laag te kiezen.

Aan de andere kant beïnvloedt het magnetische wisselveld rondom de gloeidraad de anodestroom.

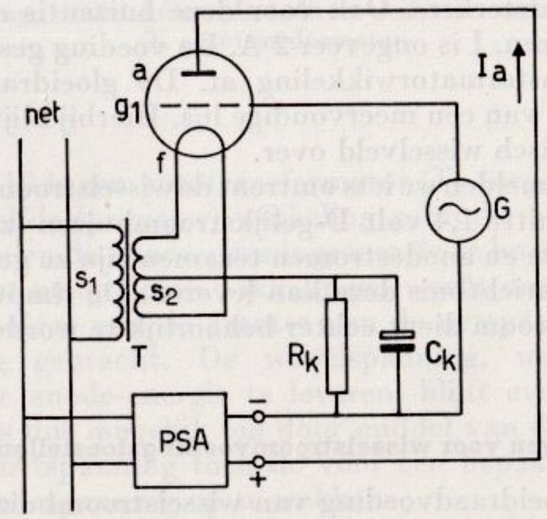


Fig. IX-8

In beginsel zullen we bij wisselstroomvoeding van dergelijke buizen een grotere beïnvloeding van de anodestroom vinden dan bij de indirect verhitte typen. Zij kunnen slechts toegepast worden, waar deze invloed toelaatbaar is. Een voorbeeld hiervan noemden we reeds, nl. de direct verhitte wisselstroomgelijkrichtbuizen. Ook voor deze buizen is een lage gloeispanning gewenst met het oog op een gelijkmatige belasting van de kathode. Zo kan b.v. een gelijkrichtbuis een gloeispanning van 4 V hebben.

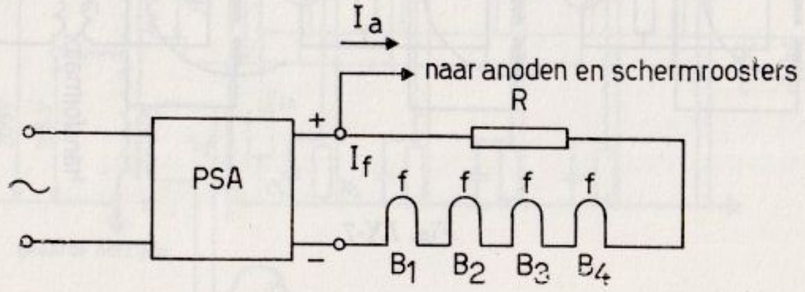


Fig. IX-9

R. serievoedingsweerstand; f. in serie geschakelde D-gloeidraden.

Andere voorbeelden vinden we in de eindversterkbuizen voor grote versterkers. Ook voor deze buizen is een spanning van 4 V gekozen. I is ongeveer 2 A. De voeding geschiedt direct van een transformatorwikkeling af. De gloeidraad heeft als regel de vorm van een meervoudige lus. Hierbij blijft slechts een zwak magnetisch wisselveld over.

Tot slot vermelden we iets omtrent de wisselstroomvoeding van de direct verhitte 1,4 volt D-gelijkstroombuizen (zie fig. IX-9). De gloeistroom en anodestromen tezamen zijn zo gering, dat een normale gelijkrichtbuis deze kan leveren. De rimpel van de gelijkgerichte stroom dient echter behoorlijk te worden afgevlakt.

§ 5. Schakelingen voor wisselstroomvoedingstoestellen

Voor de gloeidraadvoeding van wisselstroombuizen dient het voedingstoestel een transformator te bevatten. Om de anode- en

schermroosterspanningen op te wekken, kunnen we volstaan met de schakeling volgens fig. VIII-21. Hierbij worden de belasting, een ventiel en bijbehorende filters in serie op het net aangesloten. Bij toepassing van deze schakeling is de gelijkgerichte spanning ongeveer gelijk aan de maximum waarde van de netspanning (hierover later meer).

Zoals reeds eerder gezegd, is voor een krachtige radio-ontvangst een anodespanning van ongeveer 250 V nodig. Willen we bij lage netspanning, b.v. 110 V, toch over een (willekeurige) hoge anodespanning beschikken, dan kunnen we een transformator gebruiken en de spanning verhogen.

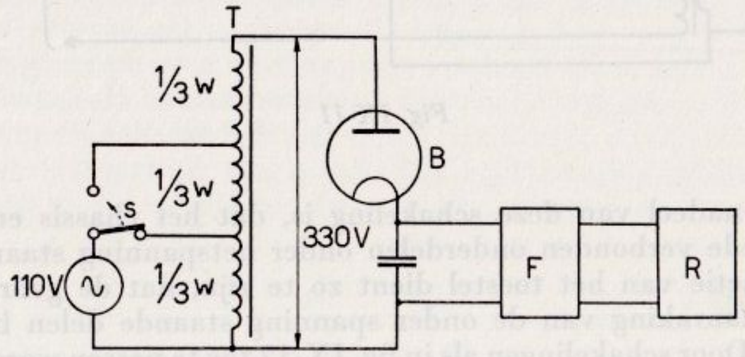


Fig. IX-10

R. belasting; F. afvlakfilter; B. indirect verhitte ventielbuis;
T. autotransformator.

In fig. IX-10 is een autotransformator (T) toegepast. Hierbij wordt een zelfde (primaire) wikkeling gebruikt om op het net aan te sluiten en de anodespanningsenergie te leveren. Het aantal op het net aangesloten wikkelingen wordt door middel van een omschakelaar met de grootte van de netspanning in overeenstemming gebracht. De wisselspanning, welke gebruikt wordt om de anode-energie te leveren, blijft even groot, b.v. 330 V. Het is dus mogelijk om door middel van de transformator bij lage netspanning toch de voor een bepaald doel meest gewenste anodespanning op te wekken.

Door op dezelfde kern nog twee gloeidraadwikkelingen aan te

brengen kunnen we de gloeistroomtransformator weglaten en komen tot de schakeling van fig. IX-11.

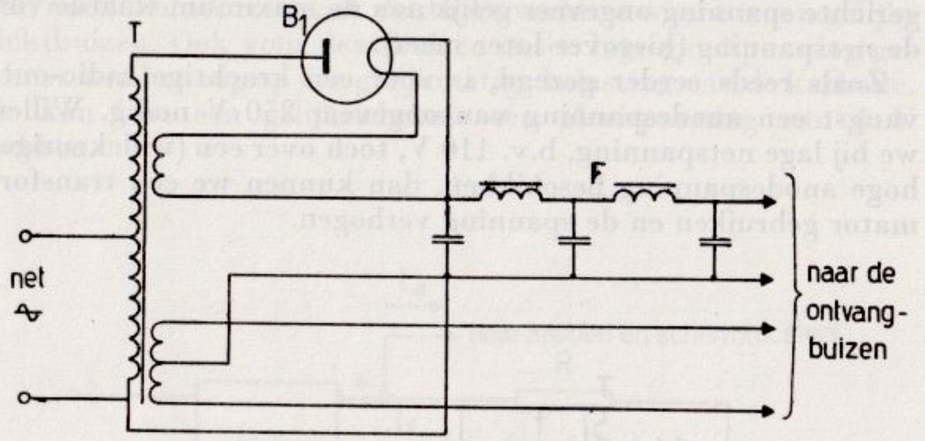


Fig. IX-11

Een nadeel van deze schakeling is, dat het chassis en alle daarmede verbonden onderdelen onder netspanning staan. De constructie van het toestel dient zo te zijn, dat de gebruiker tegen aanraking van de onder spanning staande delen beveiligd is. Door schakelingen als in fig. IX-12 toe te passen wordt deze moeilijkheid opgeheven. De transformator is echter wat duurder.

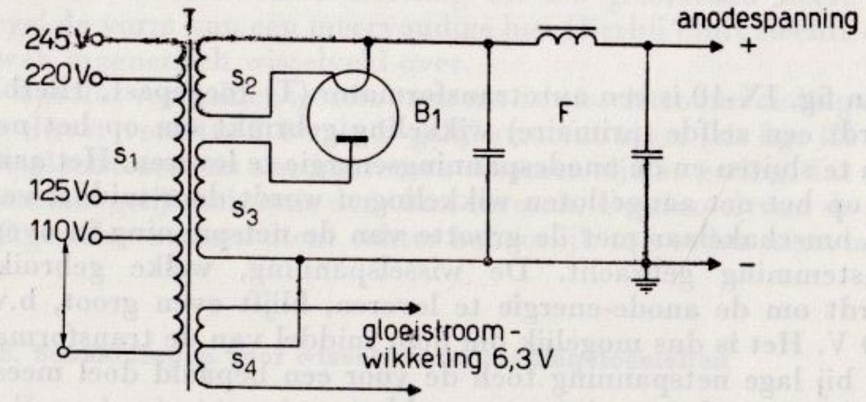


Fig. IX-12

Opgaven

1. Vergelijk in het kort de voeding door middel van accumulatoren en batterijen met voeding uit een wisselstroomnet.
2. Welke soorten buizen worden voor voeding met wisselstroom toegepast?
3. Vertel in het kort iets van de werking van een gelijkrichter.
4. Verklaar hoe door middel van een gelijkrichter gelijkgegerichte stromen ontstaan in een op wisselspanning aangesloten keten.
5. Verklaar in het kort de werking van een plaatspanningsapparaat.
6. In welke gevallen dient de gebruiker tegen aanraking van het chassis beveiligd te zijn?

HOOFDSTUK X

GELIJKRICHTERS

§ 1. Gelijkrichtschakelingen

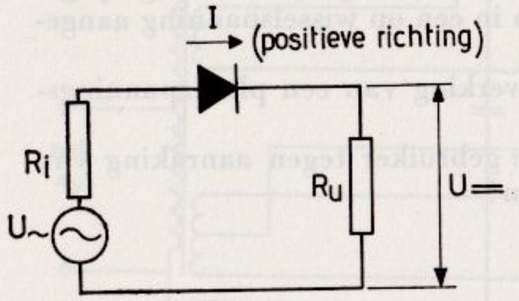


Fig. X-1

In fig. X-1 is de ohmse weerstand R_u de belasting. Het verloop van de stroom wordt evenals in het geval van fig. 3 hfdst. IX bepaald door de grootte van de spanning en de som van de weerstanden. De grootte en het verloop van de spanning op de weerstand R_u bepalen we met behulp van de grafische voorstelling volgens fig. X-2. Langs de horizontale asis de spanning U aangegeven, die de stroom I (verticaal) in de keten

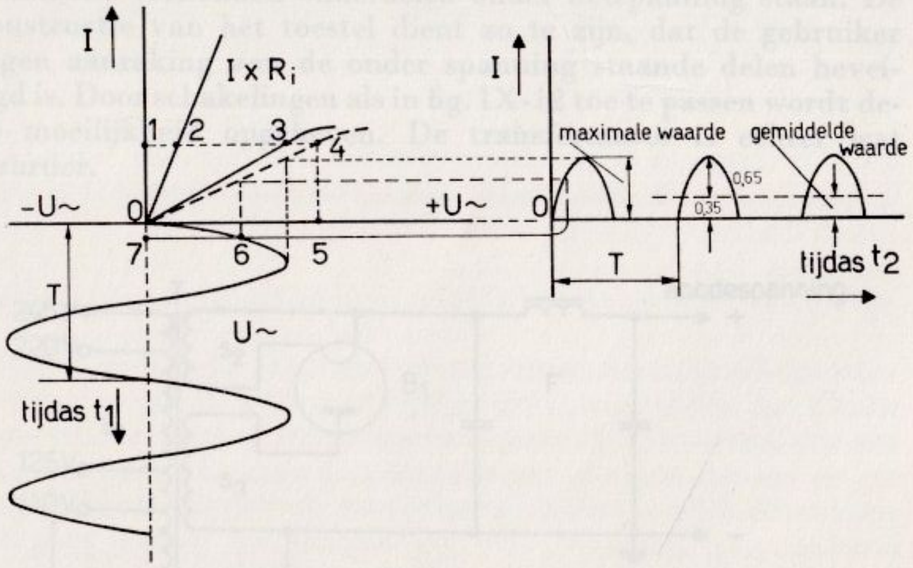


Fig. X-2

veroorzaakt. De kromme van —U via 0 naar punt 3 is de stroom-spanningskarakteristiek van de gelijkrichter. Als de weerstand R_i niet aanwezig was, zou deze karakteristiek op elk willekeurig moment het verband tussen U en I aangeven. Om echter de invloed van R_i in rekening te brengen, is de rechte lijn van 0 naar 2 getekend. Dit is a.h.w. de stroomspanningskarakteristiek van de weerstand. Wanneer de gelijkrichter niet aanwezig was, zou deze lijn het verband tussen U en I aangeven (althans voor de positieve spanningshelften).

De lijn van —U via 0 naar punt 4 geeft de gecombineerde karakteristiek. Wanneer we de horizontale lijn van 1 naar 4 volgen, dan zien we, dat, om een stroom ter grootte van 0—1 te veroorzaken, er voor de weerstand een spanning van 1—2 nodig is, en voor de gelijkrichter een spanning van 1—3. Totaal is er dan een spanning van 1—4 nodig. Van 1 tot 2 is even groot als van 3 tot 4. Doen we ditzelfde voor verschillende stroomwaarden, dan krijgen we de karakteristiek, die van 0 naar 4 loopt (stippellijn). Door nu voor elk moment voor een bepaalde spanningswaarde van U de stroom verticaal uit te zetten rechts van de karakteristiek (zie de constructie via punt 6 en 7) krijgen we een beeld van de stroom, die wordt doorgelaten. De stroom verloopt niet meer sinusvormig. De oorzaak hiervan is de eenzijdige stroomdoorlating van de gelijkrichter. Deze heeft tot gevolg, dat juist een helft van de sinus wordt „onderdrukt" (als er geen lekstroom is). Stroom en spanning nemen telkens toe tot een maximum waarde en zijn (in dit geval) gedurende een halve periode nul. Het aantal van deze stoten per seconde komt overeen met de frequentie van de spanning. Een dergelijk verloop noemen we pulserend en we spreken van een pulserende gelijkstroom of gelijkspanning.

Ook in fig. VIII-9 kunnen we een maximum en een minimum, een „gemiddelde waarde" en een „rimpelstroom" aangeven.

In tegenstelling met fig. VIII-9 zien we echter, dat deze waarden hier onderling sterk verschillen.

Voor het meten van de pulserende gelijkstroom kunnen we een draaispoelampèremeter gebruiken (zie deel I der V.E.V.-handleiding). *Deze wijst de gemiddelde waarde van de stroom aan.* Hieraan moeten we dus bij het aflezen denken. Om dan de maximum waarde te kunnen berekenen, dienen we de bovenbedoelde verhouding voor de gemeten stroom te kennen.

Naast de gemiddelde waarde van de stroom is de effectieve waarde van belang. Dit is, volgens afspraak, de waarde van de gelijkstroom, welke dezelfde hoeveelheid warmte opwekt in een weerstand als de wisselstroom. Voor een sinusvormige wisselstroom is de effectieve waarde gelijk aan de maximum

waarde: $\sqrt{2} = 0{,}707\ I_{max}$. Voor stromen met een ander verloop wijkt de effectieve waarde hiervan af.

De effectieve waarde van de stroom door weerstanden en wikkelingen bepaalt de afmetingen hiervan.

In fig. X-3 is een (ideale) *condensator* in de gelijkrichtschakeling opgenomen. Als gelijkrichter gebruiken we een geschikte hoogvacuumdiode. De gloeidraadvoeding is eenvoudigheidshalve uit de figuren weggelaten. Op het ogenblik, dat de anode positief is, sluiten we de schakelaar s. De condensator is nog ongeladen

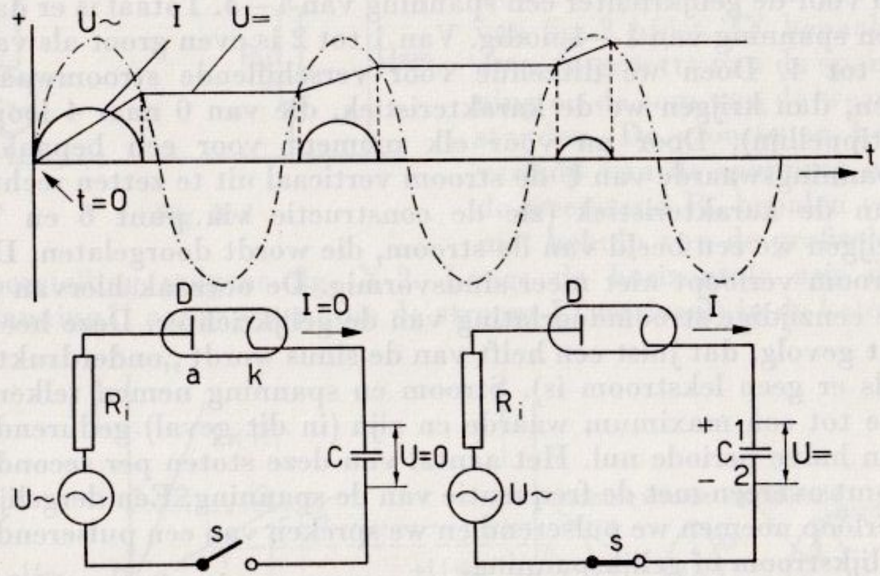


Fig. X-3

en de kathode emitteert elektronen. De anode trekt onder invloed van de positieve spanning U deze elektronen aan. Van de condensatorplaat 1 af stromen elektronen naar de, tengevolge van de emissie, positief geladen kathode. De door de anode aangetrokken elektronen stromen onder invloed van de spanning U naar de condensatorplaat 2. Dit gaat door zolang de anode positief is ten opzichte van de kathode. De grootte van de laadstroom wordt de eerste ogenblikken bepaald door de grootte van de spanning U en de totale weerstand van de keten. De condensator gedraagt zich nl. gedurende deze tijd alsof de platen doorverbonden waren. Naarmate de tijd voortschrijdt daalt de spanning U en neemt de stroom door de keten

af tot nul aan het einde van de positieve helft van de periode T. Het gevolg van de elektronenverplaatsing is echter, dat de condensator nu in geladen toestand verkeert en een zekere spanning heeft. De plaat 1 en de kathode hebben een positieve spanning. De grootte van deze spanning hangt af van de verplaatste lading en de grootte van de condensator.

De wisselspanning U keert nu van teken om en de anode wordt negatief. Gedurende deze negatieve helft van de periode kan de anode geen elektronen aantrekken, de buis is nu niet geleidend. De elektronen op plaat 2 kunnen niet afvloeien, m.a.w. de condensator blijft geladen.

Tussen anode en kathode zijn twee spanningen werkzaam, nl. de wisselspanningsbron U~ en de condensatorspanning U. Het gevolg hiervan is, dat als de spanning weer van teken omkeert, pas een stroom gaat vloeien als de positieve spanning U~ groter is dan de condensatorspanning U. Dan vloeit opnieuw een ladingsstroom naar de condensator totdat de spanning weer zover is gedaald, dat er geen potentiaalverschil meer bestaat tussen anode en kathode van de gelijkrichter. Intussen is ook de condensatorspanning gestegen door de tweede toegevoerde lading. Deze kan eveneens niet van de platen afvloeien. Gedurende elke volgende positieve periode van de spanning U~ zal zich hetzelfde verschijnsel herhalen. De spanning op de condensator zal echter steeds stijgen. Als gevolg daarvan zal het spanningsverschil tussen anode en kathode kleiner worden en de per keer overgebrachte lading dalen. Op zeker ogenblik zal zelfs de maximum positieve anodespanning niet meer voldoende zijn om een positief spanningsverschil tussen anode en kathode mogelijk te maken. Dit betekent, dat er geen ladingsstromen meer vloeien en de spanning U op de condensator gelijk blijft aan U_{max}.

§ 2. Spanningsverdubbeling

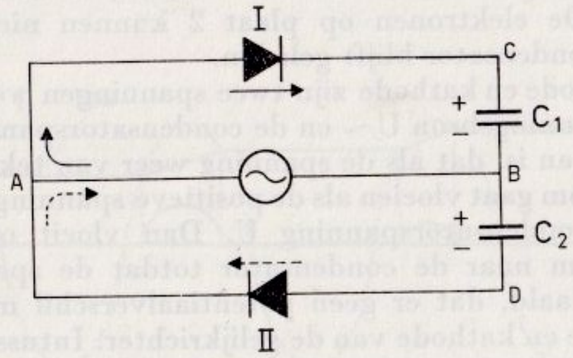
In vele gevallen is het wenselijk om over een gelijkspanning te beschikken, welke hoger (of lager) is dan de maximum wisselspanning van de spanningsbron.

Door middel van een transformator kan men op eenvoudige wijze de wisselspanningen die men voor dit doel nodig heeft verkrijgen.

Er is echter een andere oplossing mogelijk en wel door het toepassen van schakelingen voor z.g. spanningsverdubbeling, zoals in principe aangegeven in fig. X-4.

Gedurende de periodehelft waarin A positief is t.o.v. B wordt C_1 opgeladen via gelijkrichter I (getrokken pijl). In de volgende periodehelft waarin A negatief is t.o.v. B laat gelijkrichter I geen stroom door, doch nu gelijkrichter II en wel zo, dat C_2 volgens de aangegeven polariteit wordt geladen (gestippelde pijl).

Op deze wijze staan tussen de punten C en D de gelijkspanningen over C_1 en C_2 in serie. Worden de condensatoren



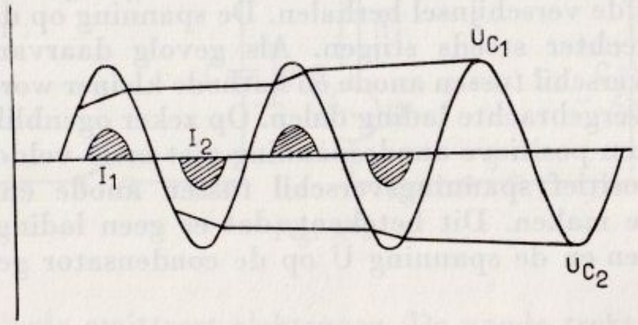


Fig. X-4

verder niet ontladen, dan is deze spanning juist $2\sqrt{2}$ maal de effectieve waarde van de wisselspanningsgenerator. De naam spanningsverdubbeling is ontstaan omdat de spanning over de condensatoren C_1 en C_2 in serie juist 2 maal de waarde is van die bij toepassing van één gelijkrichter in deze schakeling.

Vanzelfsprekend zal bij het aansluiten van een belastingsweerstand tussen de punten C en D de gelijkspanning dalen. De spanningsdaling is kleiner naarmate C_1 en C_2 groter worden (dan wordt meer lading verzameld in elke halve periode).

§ 3. Gelijkrichtschakeling met condensator en belastingsweerstand

Door middel van de schakeling volgens fig. X-3 bestudeerden we het verloop van de spanning op een condensator in een gelijkrichtschakeling. De gemaakte gevolgtrekkingen gelden echter uitsluitend voor een condensator, welke geen lekstroom heeft. Indien de condensator een lekstroom heeft of er een belastingsweerstand aan parallel is geschakeld, wordt in beginsel het stroomverloop enz. zoals aangegeven in fig. X-5. Het verschil in gedrag van deze schakeling met die van fig. X-3 is een gevolg van de stroom, welke (voortdurend) door een weerstand R_u

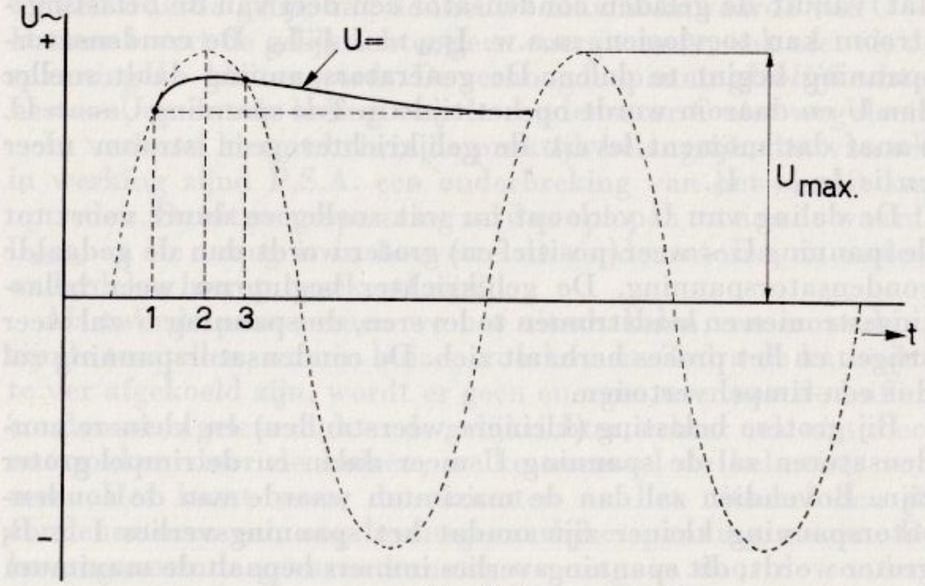


Fig. X-5

vloeit (zie fig. X-11). We weten nu nog niet precies wat er gebeurt. We kunnen echter vaststellen, dat als de gelijkrichter geen stroom aan de belasting levert, de condensator dit zal doen. Dit houdt in, dat de spanning U op de condensator en op de daaraan parallel geschakelde belasting niet constant is. We beschouwen eerst het geval, waarbij de belastingsstroom gering is.

Telkens wanneer de positieve spanning $U\sim$ van de generator groter wordt dan de (gedaalde) spanning U van de condensator, begint er een laadstroom I_c te vloeien (tijdstip 1). Tevens vloeit er een stroom, eveneens afkomstig van de gelijkrichter, door R_u (zie fig. X-11). Gedurende deze lading geldt: $I = I_c + I_{Ru}$. De spanning op de condensator stijgt daarbij. De lading duurt voort

zolang de spanning U∼ blijft stijgen. Op het ogenblik (2) dat de spanning U∼ haar maximumwaarde bereikt (en even daarna dus zal afnemen) is ook de spanning U op de condensator het hoogst. De lading van de condensator is nu beëindigd, $I_c = 0$, en de gelijkrichterstroom vloeit nu uitsluitend door de belasting. De spanning

$$U = U\sim - I \times R_u \quad \text{en} \quad I = \frac{U\sim}{R_i + R_u}.$$

Een ogenblik later echter begint de spanning U∼ lager te worden en kan de stroomsterkte I niet geheel meer worden geleverd. De spanning op de weerstand zal dus dalen, doch niet veel, omdat vanuit de geladen condensator een deel van de belastingsstroom kan toevloeien, m.a.w. $I_{Ru} = I + I_c$. De condensatorspanning begint te dalen. De generatorspanning daalt sneller dan U en daarom wordt op het tijdstip 3 de spanning $U\sim = U$. Vanaf dat moment levert de gelijkrichter geen stroom meer en is $I_{Ru} = I_c$.

De daling van U verloopt nu wat sneller en duurt voort tot de spanning U∼ weer (positief en) groter wordt dan de gedaalde condensatorspanning. De gelijkrichter begint nu weer belastingsstromen en laadstromen te leveren, de spanning U zal weer stijgen en het proces herhaalt zich. De condensatorspanning zal dus een rimpel vertonen.

Bij grotere belasting (kleinere weerstanden) en kleinere condensatoren zal de spanning U meer dalen en de rimpel groter zijn. Bovendien zal dan de maximum waarde van de condensatorspanning kleiner zijn omdat het spanningsverlies $I \times R_i$ groter wordt; dit spanningsverlies immers bepaalt de maximum waarde van U. Dit betekent o.m., dat van een plaatspanningsapparaat met variërende belasting de gemiddelde uitgangsspanning zal veranderen, d.w.z. hoge belastingsstroom gaat gepaard met lage uitgangsspanning. In sommige gevallen zijn deze variaties ontoelaatbaar.

We vragen ons nu af wat er met de waarde van de spanning U gebeurt als de effectieve waarde van de spanning U∼ verandert, b.v. door netspanningsvariaties. Deze vraag houdt o.m. verband met de in latere hoofdstukken nog te behandelen stof.

We nemen aan, dat de spanning eerst groter wordt, enige tijd constant blijft en daarna belangrijk kleiner wordt. Dit betekent, dat de spanning U eerst zal stijgen totdat er een nieuw evenwicht is ontstaan tussen de door de gelijkrichter geleverde

gelijkstroomimpulsen en de door de belasting onttrokken gelijkstroom. Indien we de spanning U∼ nu verlagen, geschiedt het volgende:

Aanvankelijk kan de gelijkrichter geen energie meer aan de condensator leveren. De condensatorspanning zal intussen tengevolge van de stroomlevering aan de belasting dalen, totdat U kleiner wordt dan de verlaagde U_{max}. Dan wordt er weer energie aan de condensator geleverd en stelt zich een nieuw evenwicht in bij een lagere waarde van de spanning U.

Een variatie van de netspanning voor de schakeling in fig. 11 is eveneens van belang in verband met later te behandelen stof. Als de spanning U∼ stijgt, zal de condensatorspanning oplopen tot een waarde gelijk aan de nieuwe maximumwaarde van U∼. Daarna levert de gelijkrichter geen energie meer, ook niet als de spanning U∼ kleiner wordt. De verhoogde spanning U *blijft* echter bestaan, omdat de lading van de condensator C niet wegvloeit.

In verband hiermede is in de praktijk belangrijk, dat van een in werking zijnd P.S.A. een onderbreking van het circuit kan optreden. De uitgangsspanning zal dan oplopen tot aan de waarde U_{max} en de vraag is in hoeverre de condensatoren en andere onderdelen hierop berekend zijn.

Als tweede punt nemen we het uitschakelen van in werking zijnde toestellen, waarin buizen voorkomen. Zodra de kathoden te ver afgekoeld zijn, wordt er geen energie meer aan de buffercondensator geleverd door de gelijkrichter, echter ook niet meer onttrokken door de buizen, welke normaal de belasting vormen. Het komt voor, dat minuten na het uitschakelen de condensatoren een nog levensgevaarlijke spanning voeren. De bovengenoemde gevaren kunnen we ontgaan door de condensator extra te belasten met een hoge weerstand of door de condensatoren door middel van een geleider met een niet te lage weerstand enige malen (diëlektrische nawerking) te ontladen.

§ 4. Dubbele gelijkrichting

In de voorgaande gelijkrichtschakelingen werd een condensator door middel van één gelijkrichter geladen tijdens de positieve helften.

Er zijn echter schakelingen, o.a. de Grätz- of brugschakeling, waarbij ook in de andere halve periode gelijkrichting optreedt.

De werking van deze schakeling kunnen we als volgt zien (zie fig. X-6): De eerste helft van de periode, als punt a positief is, wordt de condensator C via de gelijkrichters 1 en 3 geladen. De

gelijkrichters 2 en 4 mogen we even wegdenken, omdat zij zo geschakeld zijn, dat zij geen stroom doorlaten. De condensator krijgt een lading, welke door de pijlrichting is aangegeven (stroom in de richting van de getrokken pijlen).

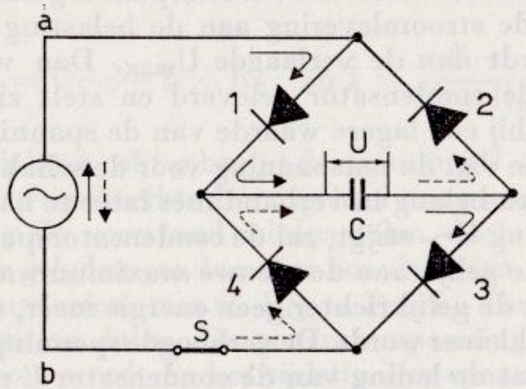


Fig. X-6

De tweede helft van de periode, als punt b positief is, wordt de condensator C via de gelijkrichters 2 en 4 geladen (stroom in de richting van de gestippelde pijlen). De lading van de condensator wordt vergroot. Thans mogen we de gelijkrichters 1 en 3 wegdenken, zij laten geen stroom door. Bij het begin van de volgende periode treden de gelijkrichters 1 en 3 weer in werking, daarna weer 2 en 4 enz. De gelijkrichters vertonen de werking van een automatische commutator.

Omdat gedurende de beide spanningshelften van een periode laadstromen vloeien, spreekt men van dubbele gelijkrichting. In tegenstelling hiermede spreekt men bij de voorgaande schakelingen met 1 gelijkrichter van enkele gelijkrichting.

Een andere schakeling is in fig. X-7 aangegeven. Hiervoor zijn 2 gelijkrichters en 2 transformatorwikkelingen nodig. De twee wikkelingen zijn zodanig verbonden, dat afwisselend de anoden

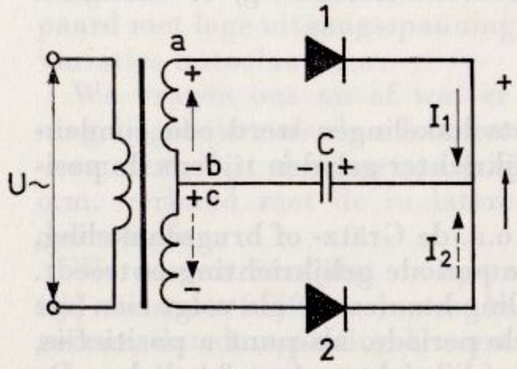


Fig. X-7

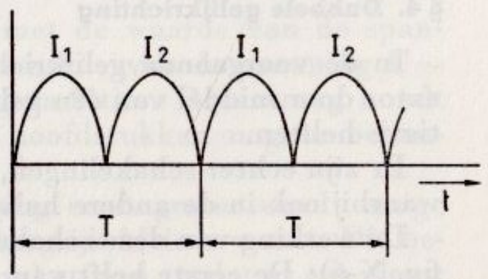


Fig. X-8

van gelijkrichter 1 en gelijkrichter 2 positief zijn. De werking van de schakeling kunnen we als volgt inzien: De eerste helft van de periode is punt a positief. De condensator wordt via gelijkrichter 1 met de laadstroom I_1 geladen. De anode van gelijkrichter 2 is negatief, zodat we deze gelijkrichter even mogen wegdenken. De condensator krijgt een lading, welke met een plus- en minteken is aangegeven (getrokken stroomrichting).

De tweede helft van de periode is punt d positief. Via gelijkrichter 2 vloeit een stroom I_2 naar de condensator. De lading van de condensator wordt vergroot. De gelijkrichter 1 laat geen stroom door, zodat we deze even mogen wegdenken. Bij de volgende

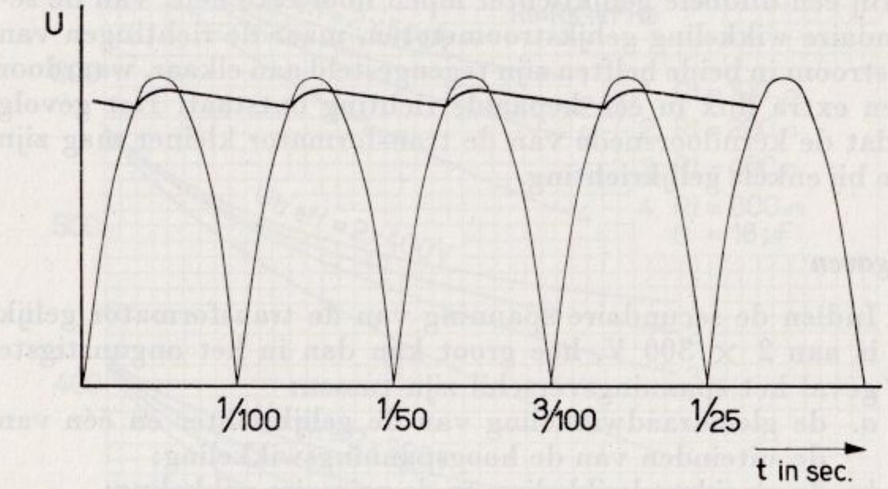


Fig. X-9

perioden laden beide gelijkrichters telkens afwisselend de condensator, d.w.z. in één periode vloeien er 2 laadstromen (zie fig. X-8). De beide spanningen op de gelijkrichters verschillen 180° in fase.

Deze dubbele gelijkrichter heeft belangrijke voordelen boven de enkele gelijkrichter. In de eerste plaats is de rimpelspanning lager en ten tweede is de frequentie het dubbele. In fig. X-9 is dit aangegeven. Deze figuur stelt het spanningsverloop voor op C. De rimpelspanning is bij dubbele gelijkrichting ongeveer de helft van die voor enkele gelijkrichting.

Dat de frequentie van de rimpelspanning 2 × de netfrequentie is (dus 100 Hz), is ook nog van voordeel voor het afvlakfilter, immers de impedantie van de condensatoren wordt kleiner naarmate de frequentie hoger is.

(Zie hiervoor ook de berekeningen in § 2, hfdst. VIII.)

Een ander voordeel van dubbele gelijkrichting houdt verband met de gelijkstroom, die door de secundaire wikkeling vloeit.

De stroomstoten, die de gelijkrichter doorlaat, gaan nl. ook door de transformatorwikkeling en omdat deze stroomstoten steeds dezelfde richting hebben, loopt er dus een gelijkstroom door de secundaire wikkeling van de transformator. Deze gelijkstroom veroorzaakt in de ijzerkern een zekere flux. De bedoeling is echter, dat de flux in de kern alleen veroorzaakt wordt door de wisselstroom. Door de aanwezigheid van een extra flux als gevolg van de gelijkstroom is er kans, dat de kern verzadigd raakt (zie fig. VIII-19).

Bij een dubbele gelijkrichter lopen door elke helft van de secundaire wikkeling gelijkstroomstoten, maar de richtingen van de stroom in beide helften zijn tegengesteld aan elkaar, waardoor geen extra flux in één bepaalde richting ontstaat. Het gevolg is dat de kerndoorsnede van de transformator kleiner mag zijn dan bij enkele gelijkrichting.

Opgaven

1. Indien de secundaire spanning van de transformator gelijk is aan 2 × 300 V, hoe groot kan dan in het ongunstigste geval het spanningsverschil zijn tussen:
   a. de gloeidraadwikkeling van de gelijkrichter en één van de uiteinden van de hoogspanningswikkeling;
   b. de gloeidraadwikkeling en de primaire wikkeling;
   c. de hoogspanningswikkeling en de primaire wikkeling;
   d. de spanning tussen gloeidraadwikkeling en kern.
   Hierbij wordt verondersteld, dat het midden van de hoogspanningswikkeling, evenals de kern, geaard is.
2. Wat gebeurt er als in een dubbele gelijkrichtschakeling de verbinding tussen de transformator en een van de anoden van de gelijkrichtbuis losraakt?
3. Wat is het gevolg van een sluiting tussen anode en kathode van de gelijkrichtbuis?

§ 5. Stroom-spanningskarakteristieken van een P.S.A.

In fig. X-10 zien we hoe de buizenfabrikanten gewoonlijk het verband aangeven tussen de verschillende grootheden, die bij een gelijkrichter van belang zijn.

Merkwaardig is dat de buizenfabrikant niet volstaat met de gegevens van de buis alléén te publiceren, maar dat hij er een

complete schakeling bij geeft. Dit is voor de gebruiker natuurlijk zeer gemakkelijk, vooral omdat de buis gewoonlijk in dezelfde

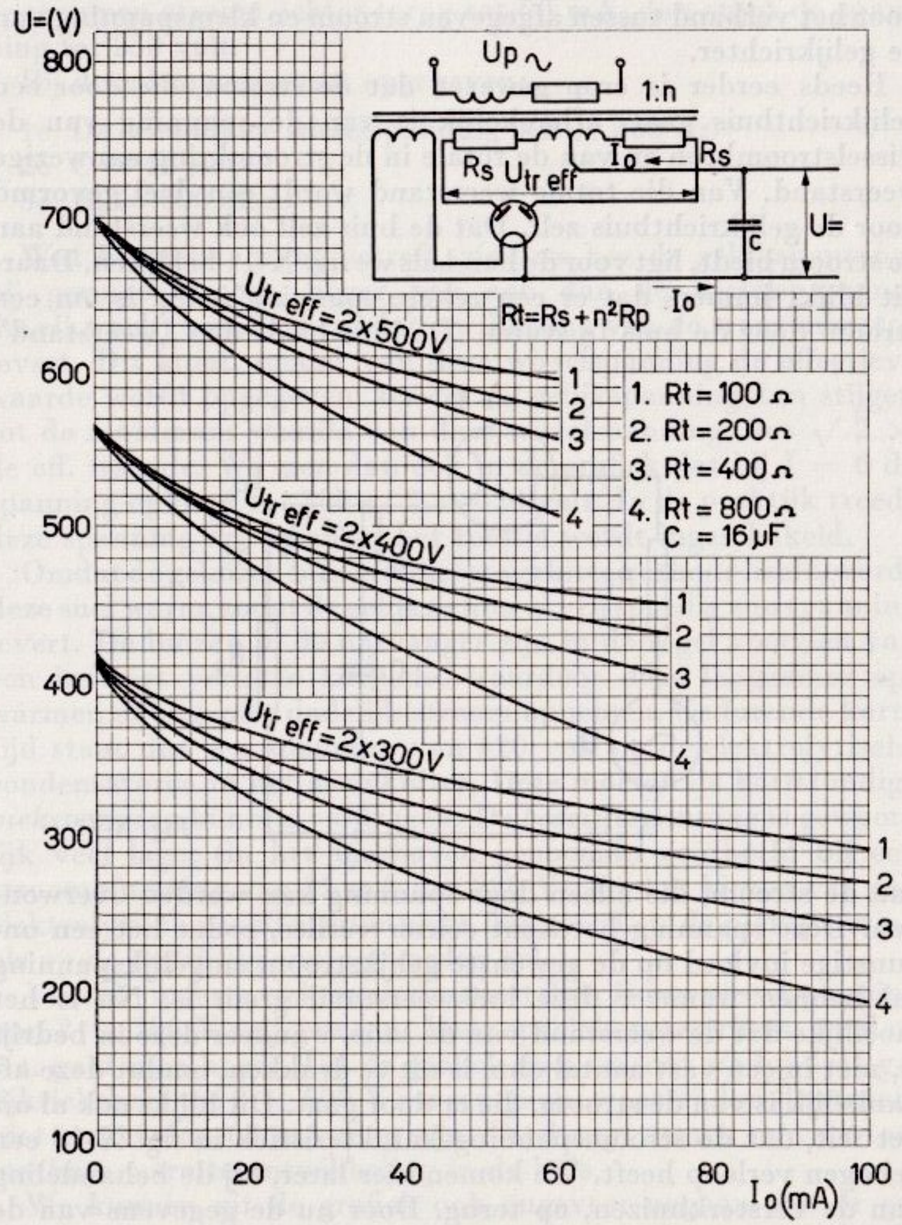


Fig. X-10

soort schakeling wordt gebruikt. Zouden alleen gegevens van de buis worden gepubliceerd, dan zou behalve de waarden van

de gloeispanning, gloeistroom, maximaal toelaatbare anodespanning en anodestroom ook de inwendige weerstand van de buis moeten worden opgegeven, daar deze zeer belangrijk is voor het verband tussen afgegeven stroom en klemspanning van de gelijkrichter.

Reeds eerder is erop gewezen dat de stroom, die door een gelijkrichtbuis gaat, afhankelijk is van de spanning van de wisselstroombron èn van de totale in de stroomkring aanwezige weerstand. Van die totale weerstand wordt een deel gevormd door de gelijkrichtbuis zelf. Dat de buis zelf ook weerstand aan de stroom biedt, ligt voor de hand als we fig. X-11 bekijken. Daaruit blijkt immers dat er een zekere spanning nodig is om een stroom door de buis te sturen. De buis biedt dus „weerstand"

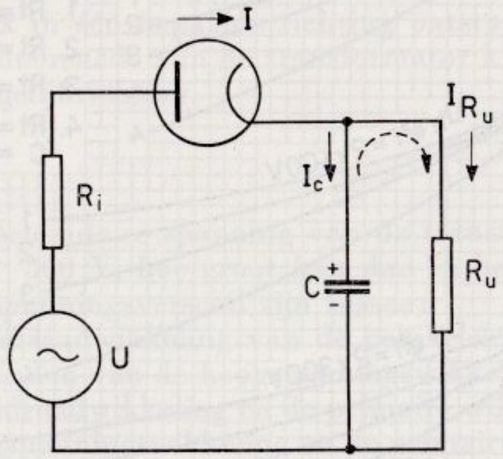


Fig. X-11

aan de stroom, die alleen door spanning kan worden overwonnen. Deze spanning betekent echter verlies, zodat het een ongunstige invloed op de gewenste gelijkstroom en gelijkspanning zal hebben wanneer deze buisweerstand groot is. Nu is het moeilijke dat de weerstand van de buis, wanneer deze in bedrijf is, niet in een vast aantal ohm is uit te drukken, omdat deze afhankelijk is van de stroom, die er door gaat. Dit blijkt ook al uit het feit, dat de stroomspanningskarakteristiek in fig. X-10 een gebogen verloop heeft. We komen hier later, bij de behandeling van de versterkbuizen, op terug. Door nu de gegevens van de buis vast te leggen, voor het geval deze in een bepaalde schakeling is opgenomen, behoeven we geen ingewikkelde berekeningen te maken en kunnen we ons dadelijk een beeld vormen van de prestaties van de buis in een bepaald geval.

Nemen we b.v. de onderste lijn uit fig. X-10, dan zien we hoe

groot de gelijkspanning wordt, wanneer een bepaalde stroom aan R_u wordt geleverd. Een vrij normale stroom voor een radiotoestel is 75 mA. De gelijkspanning U is dan 220 U. Loopt de opgenomen stroom echter terug tot 50 mA, dan stijgt de spanning tot 258 volt.

Bij deze kromme staat opgegeven:

1e De secundaire wisselspanning is 2×300 V;
2e $C = 16\ \mu F$;
3e $R_t = 800$ ohm.

Wat het eerste punt betreft, zien we hoe de gelijkspanning, bij geringe stroom, hoger kan zijn dan de wisselspanning, die elke helft van de secundaire wikkeling van de transformator levert. Dit komt, omdat van deze wisselspanning de effectieve waarde wordt opgegeven, terwijl de gelijkspanning kan stijgen tot de maximum waarde van deze wisselspanning, dus $\sqrt{2} \times$ de eff. waarde. We zien dan ook in de grafiek dat bij $I = 0$ de spanning oploopt tot $300\ \sqrt{2} = 420$ volt. In de praktijk treedt deze spanning op, wanneer het toestel wordt ingeschakeld.

Omdat de gekozen buis een direct verhitte kathode heeft, wordt deze snel warm, zodat de gelijkrichter al vrij spoedig zijn spanning levert. De buizen in de ontvanger zijn in de regel voorzien van een indirect verhitte kathode, waardoor deze langzamer opwarmen en nog niet dadelijk stroom opnemen. Gedurende korte tijd staat dus een spanning van 420 volt op de elektrolytische condensatoren in het afvlakfilter. Deze moeten de kortstondige *piekspanning* kunnen verdragen. De *bedrijfsspanning* is gewoonlijk veel lager (in het hierboven genoemde voorbeeld bij een stroomafneming van 75 mA dus 220 V). Bij het kiezen van een elektrolytische condensator moet dus zowel op de piekspanning als op de bedrijfsspanning worden gelet.

Voor de meeste elektronische toestellen is een wisselspanning van 2×300 V vrij gewoon. Voor speciale versterkers, zenders e.a. gaat men hoger. Uit de grafiek zien we, dat we bij deze gelijkrichtbuis tot 2×500 V mogen gaan, waarbij dan de stroom niet groter dan 60 mA mag zijn. Dit hangt samen met de toelaatbare warmte-ontwikkeling in de buis.

We kunnen uit de grafiek ook ongeveer nagaan wat er gebeurt wanneer de secundaire spanning een andere waarde heeft.

We werken dit eens uit voor een netspanning van 127 volt en een secundaire spanning van 2×300 volt. Bij normaal bedrijf is de stroom, die de buizen van het toestel opnemen, 50 mA, terwijl we verder aannemen, dat $C = 16\ \mu F$ en $R_t = 200$ ohm,

zodat we uit de bijbehorende kromme van fig. X-10 aflezen, dat hierbij de gelijkspanning 310 volt is.

Als de primaire spanning oploopt tot bijv. 165 V dan stijgt de secundaire transformatorspanning tot $\frac{165}{127} \times 300 = 390$ volt. Dit is bijna 400 volt, zodat we nu in de grafiek van fig. X-12 de overeenkomstige kromme voor 2×400 V kunnen nemen om na te gaan wat er gebeurt.

Als de stroom 50 mA zou blijven, dan zou deze de gelijkspanning doen stijgen tot circa 450 volt. Door deze hogere gelijkspanning gaat er echter ook meer stroom vloeien, waardoor de spanning weer zakt enz. We kunnen dus niet onmiddellijk zeggen hoe de stroom en de spanning zullen worden, maar moeten

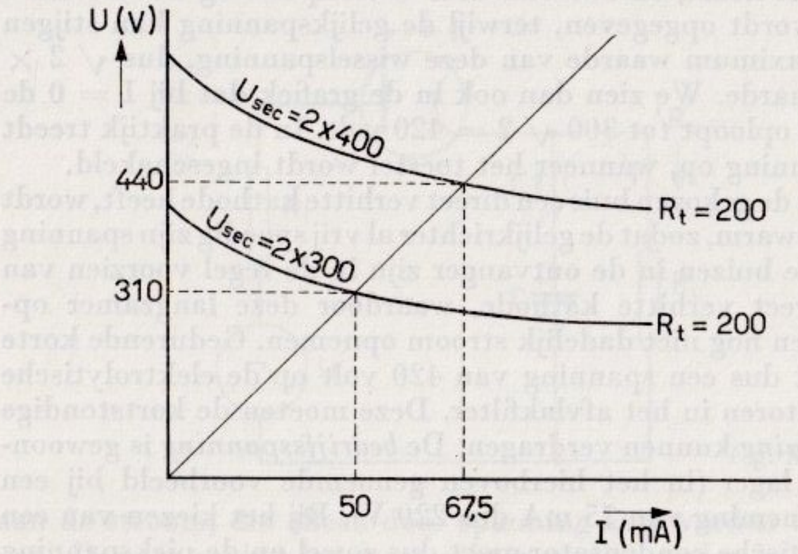


Fig. X-12

hierbij een hulpmiddel gebruiken. Over het algemeen mogen we aannemen, dat voor niet al te grote spanningsveranderingen de elektronenbuizen zich ongeveer als een gelijkstroomweerstand gedragen, dat wil zeggen, dat wanneer de spanning toeneemt de stroom evenredig daarmee toeneemt, dus: spanning $2 \times$ zo groot, stroom ook $2 \times$ zo groot enz. In fig. X-13 is voor een gewone weerstand een karakteristiek getekend, en wel zo, dat langs de verticale as de spanning U en langs de horizontale as de stroom I is uitgezet. In fig. X-10 zijn langs de assen dezelfde grootheden uitgezet. Dat wil zeggen, dat we in fig. X-10 ook een karakteristiek kunnen trekken als fig. X-13 aangeeft. Het eerste punt van deze karakteristiek is het punt, waar we vanuit gingen, nl. de

normale instelling van de ontvanger bij 50 mA en 310 volt. Een ander punt kunnen we vinden door er gebruik van te maken, dat wanneer de spanning nul is, de stroom door de weerstand (in dit geval door de buizen van het toestel) ook nul is.

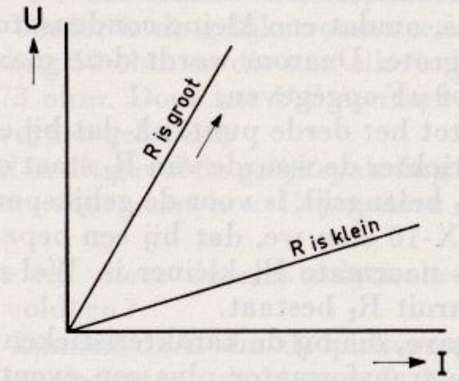


Fig. X-13

Verder weten we, dat de karakteristiek een rechte lijn is, zodat we dus nu deze lijn kunnen tekenen. In fig. X-12 is dit afzonderlijk aangegeven. De rechte lijn snijdt de kromme voor 2×400 V, $R_t = 200\ \Omega$, in een punt, waar $I = 69{,}5$ mA en $U = 432$ volt.

De gelijkrichtbuis kan dit wel leveren, maar bij deze spanning zullen de buizen en de elektrolytische condensatoren van het toestel in kwestie ernstig overbelast worden.

Nu iets over het feit, dat bij de karakteristieken van fig. X-10 de waarde van C staat opgegeven. Dit wil dus zeggen, dat we voor andere waarden van C andere karakteristieken zouden krijgen. Aan de hand van fig. X-5 is reeds opgemerkt, dat bij lagere condensatorwaarden de gemiddelde gelijkspanning daalt. Omgekeerd zouden we dus ook kunnen zeggen, dat bij hogere waarden van C de gelijkspanning stijgt. Dat is natuurlijk wel waar, maar hieraan wordt een zeer duidelijke grens gesteld. Immers kan de gelijkspanning plus de top van de rimpelspanning nooit groter worden dan $\sqrt{2} \times$ de eff. waarde van de wisselspanning (de reeds genoemde piekwaarde). Er komt dus een punt, waarbij vergroten van C vrijwel geen verhoging van de gelijkspanning meer geeft. Nu is de waarde van C, die bij de karakteristiek staat, zodanig gekozen, dat deze de praktische grens aangeeft. De schakeling geeft dus met een grotere C dan 16 μF geen noemenswaardige verhoging van de gelijkspanning.

Dit wil echter niet zeggen, dat het geen zin heeft deze waarde nog te verhogen, want al heeft deze dan geen invloed op de gelijkspanning meer, de invloed op de rimpelspanning blijft

belangrijk. Merkwaardig is echter, dat voor de besproken schakeling ook een maximum voor C wordt opgegeven, nl. 60 μF. Er is reeds vermeld, dat soms een weerstand nodig is om de gelijkrichtbuis te beveiligen tegen te grote stroomstoten. Wanneer nu C groot is, duren deze stroomstoten langer dan wanneer C klein is, omdat een kleine condensator eerder is opgeladen dan een grote. Daarom wordt deze maximaal toelaatbare waarde van 60 μF opgegeven.

We komen nu tot het derde punt, nl. dat bij elke karakteristiek van de gelijkrichter de waarde van R_t staat opgegeven. Dat de waarde van R_t belangrijk is voor de gelijkspanning is nu wel duidelijk. In fig. X-10 zien we, dat bij een bepaalde stroom de spanning hoger is naarmate R_t kleiner is. Wel moeten we nog even nagaan, waaruit R_t bestaat.

Blijkens de opgave, die bij de karakteristieken staat, is R_t de weerstand van de transformator plus een eventueel extra aan te brengen weerstand, wanneer de totale weerstand lager blijkt te zijn, dan door de buizenfabrikant opgegeven, laagst toelaatbare, waarden. De inwendige weerstand van de buis is hier niet bij, deze is al in de karakteristieken in rekening gebracht.

De weerstand van de transformator is niet alleen de ohmse weerstand van de secundaire wikkeling. Ook de weerstand van de primaire wikkeling speelt hierbij een rol. Wij komen hier later nog op terug bij de behandeling van de luidsprekertransformatoren, waarbij dan ook de formule zal worden afgeleid, die we hier voor de totale transformatorweerstand geven, die in de gelijkrichterketen optreedt, nl. $R_t = R_{sec} + n^2 R_p$. Hierin is n de transformatieverhouding, gegeven door het aantal secundaire windingen van één helft, gedeeld door de primaire windingen.

Een extra weerstand wordt alleen dan toegepast, wanneer de transformatorweerstand te gering is om het effect van de sterke stroomstoten door de buis binnen de grenzen te houden.

Opgaven

4. De transformator uit een P.S.A. is defect geraakt en moet worden vervangen. Daar een transformator van hetzelfde type niet aanwezig is, wordt er een van ander fabrikaat gebruikt. Vóór de inbouw worden de secundaire wisselspanningen gemeten en deze blijken in orde te zijn. Toch is na inbouw in het P.S.A. de gelijkspanning te laag. Wat kan hiervan de oorzaak zijn? Verondersteld wordt, dat alle aansluitingen goed zijn uitgevoerd.

5. Een dubbele gelijkrichter bestaat uit een transformator, een gelijkrichtbuis en een elektrolytische condensator van 50 μF.
   De transformator is bestemd voor aansluiting op een net van 220 V. De secundaire wisselspanning bedraagt dan 2 × 300 V. Verder is de gelijkstroomweerstand van de primaire wikkeling 50 ohm en die van elke helft der secundaire wikkeling 173 ohm. Door het P.S.A. moet een gelijkstroom van 70 mA worden geleverd.
   Hoe groot zal in dit geval de gelijkspanning zijn?
   Beschrijf stap voor stap hoe U tot deze waarde bent gekomen.
6. Aan welke eisen moet de elektrolytische condensator uit vraagstuk 5 voldoen?
7. Wat zou U kunnen doen om de piekspanning op de elektrolytische condensator uit vraag 5 beneden 380 V te houden? Heeft de toepassing van dit middel nog andere gevolgen, zo ja, welke?
8. Voor een gelijkrichtbuis worden de volgende grenswaarden aangegeven:

Max. wisselspanning in onbelaste toestand aan de secundaire wikkeling van de transformator	$U_{sec} = 2 \times 400$ V eff.
Max. te leveren gelijkstroom	$I = 175$ mA
Max. spanning tussen gloeidraad en kathode	$U_{fk} = 0$ volt
Minimum weerstand van de transformator bij $U_{sec} = 2 \times 300$ V	$R_t = 200$ ohm
Minimum weerstand van de transformator bij $U_{sec} = 2 \times 400$ V	$R_t = 300$ ohm
Max. capaciteit van de eerste afvlakcondensator bij $U_{sec} = 2 \times 400$ V	$C = 16$ μF
Max. capaciteit van de eerste afvlakcondensator bij $U_{sec} = 2 \times 300$ V	$C = 32$ μF

Gevraagd: Behandel stuk voor stuk de betekenis van de aangegeven grenswaarden en verklaar wat er gebeurt, wanneer deze waarden niet worden aangehouden.

HOOFDSTUK XI

VERSTERKING VAN WISSELSPANNINGEN DOOR MIDDEL VAN ELEKTRONENBUIZEN

§ 1. Inleiding

Hoe kunnen de betrekkelijk kleine wisselspanningen van allerlei frequenties, die in een ontvanger, een gramofoonversterker of andere dergelijke toestellen binnenkomen, zo versterkt worden, dat een bruikbare uitgangsspanning wordt verkregen?

Een sterkstroomman zal misschien dadelijk aan een transformator denken om deze kleine spanningen op te transformeren. In bepaalde gevallen zal dat ook wel eens mogelijk zijn, maar waar de sterkstroomman uit de aard der zaak gewoonlijk niet aan denkt is, dat de frequenties van wisselspanningen in elektronische toestellen in de regel veel hoger zijn dan 50 per/sec en dat dan zelfinductie en capaciteit der transformatorwindingen een rol gaan spelen. Dan zou het nog wel mogelijk zijn om een transformator te construeren voor één wisselspanning met één bepaalde, zij het dan ook hoge frequentie, maar normaal is, dat in deze toestellen wisselspanningen met alle mogelijke frequenties tegelijkertijd optreden en zo versterkt moeten worden, dat hun onderlinge sterkteverhouding niet wordt gewijzigd. Bovendien is in de regel de beschikbare energie zeer klein, zodat verliezen, die in grote transformatoren onvermijdelijk zijn, ernstige gevolgen zouden kunnen hebben. Hier komt nog bij, dat de gevraagde versterking dikwijls zeer groot moet zijn (b.v. 10 000 tot 100 000 maal). Nu is de beste transformator, die gemaakt kan worden, nog altijd sterk frequentie-afhankelijk, zodat we wat dit betreft nogal beperkt zijn in het kiezen van de transformatieverhouding. We zullen nu zien, hoe we dit probleem met buizen kunnen oplossen.

§ 2. Verzwakking en versterking

We beschouwen fig. XI-1 en stellen ons voor, dat alles wat zich binnen de stippellijn bevindt in een gesloten kast zit. We zien dan alleen 2 ingangsklemmen (1 en 2) en 2 uitgangsklemmen (3 en 4).

Tussen 1 en 2 zetten we de ingangsspanning E∼, terwijl we door een wisselspanningsmeter aan te sluiten tussen 3 en 4 de uitgangsspanning E_u kunnen meten. In het hier gegeven voorbeeld zal de uitgangsspanning steeds kleiner zijn dan de ingangs-

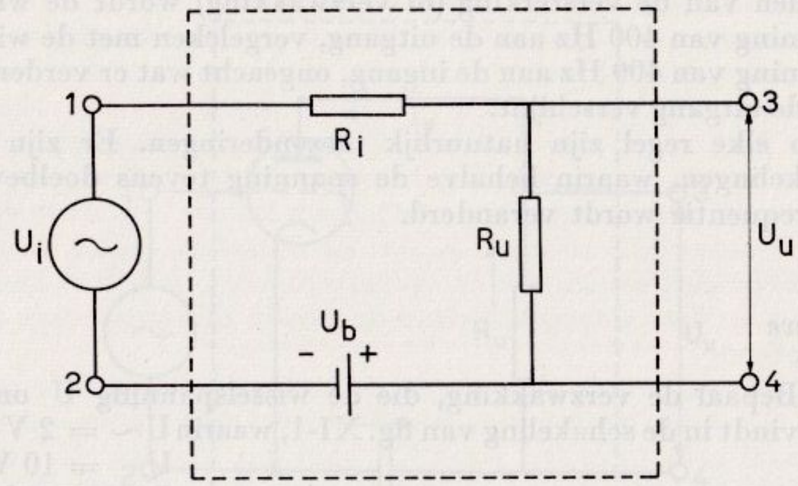


Fig. XI-1

spanning. De wisselspanning U∼ vinden we dus aan de uitgang terug, maar kleiner, verzwakt. We kunnen dus zeggen, dat dit apparaat een verzwakker is. Is de schakeling zodanig, dat U_u groter wordt dan U∼, dan spreken we van een *versterker* (fig. XI-2).

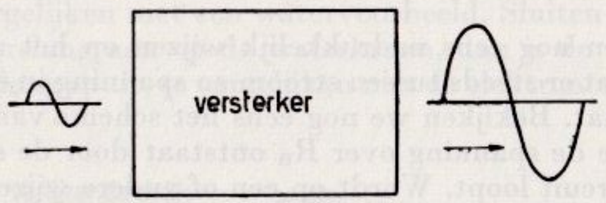


Fig. XI-2

Een afspraak moeten we nog maken over de vorm van de spanning. In het voorbeeld van fig. 1 komt er behalve de wisselspanning ook nog een gelijkspanning over R_u te staan en dus ook tussen de uitgangsaansluitingen 3 en 4. Wanneer we echter over verzwakken of versterken spreken, dan bedoelen we de verhouding tussen gelijksoortige spannings- of stroomsoorten. De *wissel*spanning aan de uitgang wordt dus vergeleken

met de *wissel*spanning aan de ingang. Ditzelfde geldt ook voor wisselspanningen met verschillende frequenties. Staat er een wisselspanning van 400 Hz op de ingang, dan kan het bij bepaalde schakelingen wel gebeuren, dat er aan de uitgang behalve 400 Hz ook nog 800 Hz of 1200 Hz ontstaat, maar bij het bepalen van de versterking (of verzwakking) wordt de wisselspanning van 400 Hz aan de uitgang, vergeleken met de wisselspanning van 400 Hz aan de ingang, ongeacht wat er verder nog aan de uitgang verschijnt.

Op elke regel zijn natuurlijk uitzonderingen. Er zijn ook schakelingen, waarin behalve de spanning tevens doelbewust de frequentie wordt veranderd.

Opgave

1a. Bepaal de verzwakking, die de wisselspanning U ondervindt in de schakeling van fig. XI-1, waarin $U\sim = 2$ V
$U = 10$ V
$R_i = 20$ k Ω
$R_u = 50$ k Ω

1b. Teken in één grafiek, dus met dezelfde assen, de ingangs- en de uitgangsspanning.

1c. Geef de verzwakking in een formule aan.

§ 3. Een elektronenbuis in de stroomketen

We willen nog eens nadrukkelijk wijzen op het zeer nauwe verband, dat er steeds tussen stroom en spanning in een stroomkring bestaat. Bekijken we nog eens het schema van fig. 1, dan zien we hoe de spanning over R_u ontstaat door de stroom, die door het circuit loopt. Wordt op een of andere wijze de stroom beïnvloed, dan verandert de spanning over R_u. Dit zouden we b.v. kunnen doen door R_i een andere waarde te geven, maar we kunnen ook R_i vervangen door een buis. Het belangrijkste van een buis is nl. dat er tussen anode en kathode een stroom loopt en dat we van buiten af die stroom groter of kleiner kunnen maken. Bij de gelijkrichtbuizen hebben we al gezien hoe de stroom afhankelijk is van de anodespanning U_a; bij versterkbuizen is de stroom bovendien te beïnvloeden doordat nog andere elektroden (roosters) aanwezig zijn.

Fig. XI-3 geeft de schakeling met een triode. In tegenstelling met de schakeling in fig. XI-1 is de ingangsspanning $E\sim$ hier niet in het eigenlijke stroomcircuit opgenomen. De stroom I loopt van + batterij door R_u, van anode naar kathode (tegengesteld aan

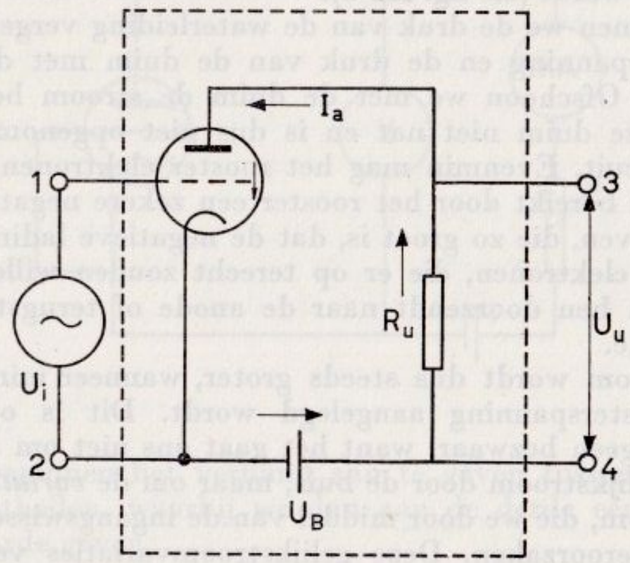


Fig. XI-3

de elektronenstroom!) en tenslotte weer naar de batterij. Het rooster van de triode, dat op de ingangsspanning is aangesloten, mag geen stroom opnemen uit het circuit, maar alleen de stroom in het circuit beïnvloeden. Deze gang van zaken is enigszins te vergelijken met een watervoorbeeld. Sluiten we een soepele rubberslang aan op de waterkraan, dan is de waterstraal, die uit de slang spuit, te vergelijken met de elektronenstroom, die

Fig. XI-4

in een buis van de kathode naar de anode vloeit. Wanneer we de waterslang met onze duim dichtdrukken, dan wordt de stroom minder; drukken we hard, dan kunnen we de stroom zelfs helemaal doen ophouden. Drukken we afwisselend hard en zacht, dan zien we hoe in hetzelfde tempo de waterstraal dikker of dunner wordt (zie fig. XI-4).

Nu kunnen we de druk van de waterleiding vergelijken met de anodespanning en de druk van de duim met de roosterspanning. Ofschoon we met de duim de stroom beïnvloeden wordt onze duim niet nat en is dus niet opgenomen in het stroomcircuit. Evenmin mag het rooster elektronen opnemen. Dit wordt bereikt door het rooster een zekere negatieve spanning te geven, die zo groot is, dat de negatieve lading van het rooster de elektronen, die er op terecht zouden willen komen, afstoot en hen doorzendt naar de anode of terugstuurt naar de kathode.

De stroom wordt dus steeds groter, wanneer minder negatieve roosterspanning aangelegd wordt. Dit is op zichzelf helemaal geen bezwaar, want het gaat ons niet om de waarde van de gelijkstroom door de buis, maar om de *variaties* in deze gelijkstroom, die we door middel van de ingangswisselspanning kunnen veroorzaken. Deze gelijkstroomvariaties veroorzaken gelijkspanningsvariaties over R_u en de variaties in deze spanning vormen de uitgangswisselspanning. De uitgangsspanning kan in dit geval belangrijk groter zijn dan de ingangsspanning zodat dus versterking optreedt.

Opgave

2. Schrijf puntsgewijs duidelijk op, toegelicht met diverse figuren, wat er met de stromen en spanningen in fig. XI-3 gebeurt, indien er een wisselspanning op de ingang van de versterker staat.

§ 4. Buiskarakteristieken

De stroom door een triode (I_a) kan dus worden beïnvloed door de anodespanning (U_a) en de roosterspanning (U_g). Er is tussen deze drie grootheden een bepaald verband dat wordt gegeven door de constructie van de buis. Dit verband is niet in een enkel getal uit te drukken, maar alleen door middel van grafische voorstellingen.

Nu is het vrij lastig om het verband tussen 3 grootheden uit te drukken in een eenvoudige grafische voorstelling. We zullen

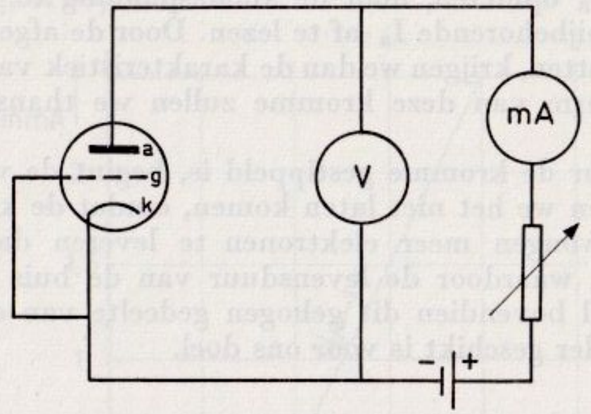


Fig. XI-5

daarom beginnen het verband aan te geven tussen twee van deze grootheden, waarbij we dan aan de derde een bepaalde vaste waarde geven.

Het eenvoudigste geval hebben we wanneer we de roosterspanning U_g gelijk aan nul maken. We kunnen dat doen door

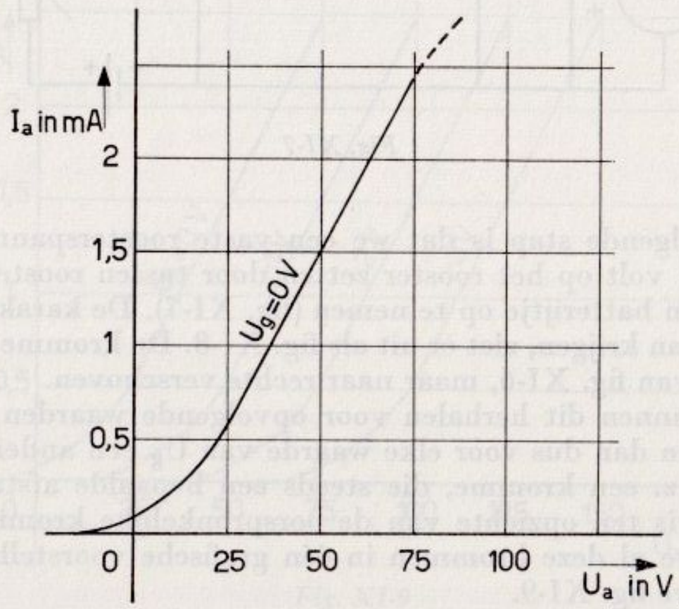


Fig. XI-6

het rooster rechtstreeks met de kathode te verbinden (zie fig. XI-5). In dat geval krijgen we vrijwel dezelfde karakteristiek als van een diode. Met de in fig. XI-5 aangegeven schakeling kunnen we het verband tussen de anodestroom I_a en de anodespanning U_a opmeten, door de anodespanning te variëren en telkens de bijbehorende I_a af te lezen. Door de afgelezen waarden uit te zetten, krijgen we dan de karakteristiek van fig. XI-6. Over de vorm van deze kromme zullen we thans niet meer spreken.

Daar waar de kromme gestippeld is, begint de verzadiging. Zover mogen we het niet laten komen, omdat de kathode dan wordt gedwongen meer elektronen te leveren dan eigenlijk mogelijk is, waardoor de levensduur van de buis wordt verkort, terwijl bovendien dit gebogen gedeelte van de karakteristiek minder geschikt is voor ons doel.

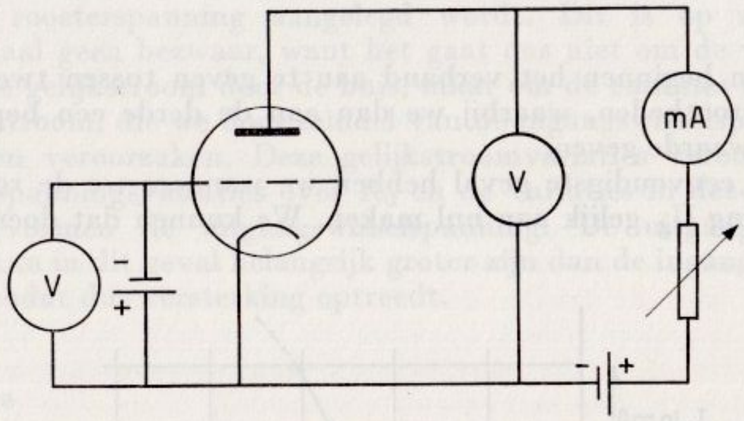


Fig. XI-7

De volgende stap is dat we een vaste roosterspanning van b.v. — 1 volt op het rooster zetten door tussen rooster en kathode een batterijtje op te nemen (fig. XI-7). De karakteristiek die we dan krijgen, ziet er uit als fig. XI-8. De kromme is gelijk aan die van fig. XI-6, maar naar rechts verschoven.

We kunnen dit herhalen voor opvolgende waarden van U_g en krijgen dan dus voor elke waarde van U_g een andere kromme, d.w.z. een kromme, die steeds een bepaalde afstand verschoven is ten opzichte van de oorspronkelijke kromme. Verenigen we al deze krommen in één grafische voorstelling, dan krijgen we fig. XI-9.

Dit is een hele bundel krommen, die tezamen het verband tussen I_a, U_g en U_a aangeven. Kiezen we dus een bepaalde waarde U_g en U_a, dan kunnen we de anodestroom I_a aflezen. Als b.v. $U_g = -1$ V en $U_a = 75$ V, dan lezen we af: $I_a = 1{,}5$ mA (fig. XI-9).

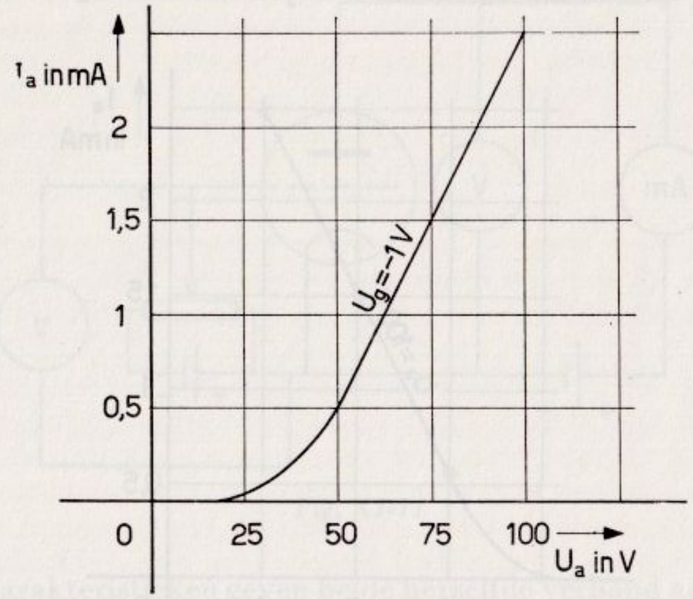


Fig. XI-8

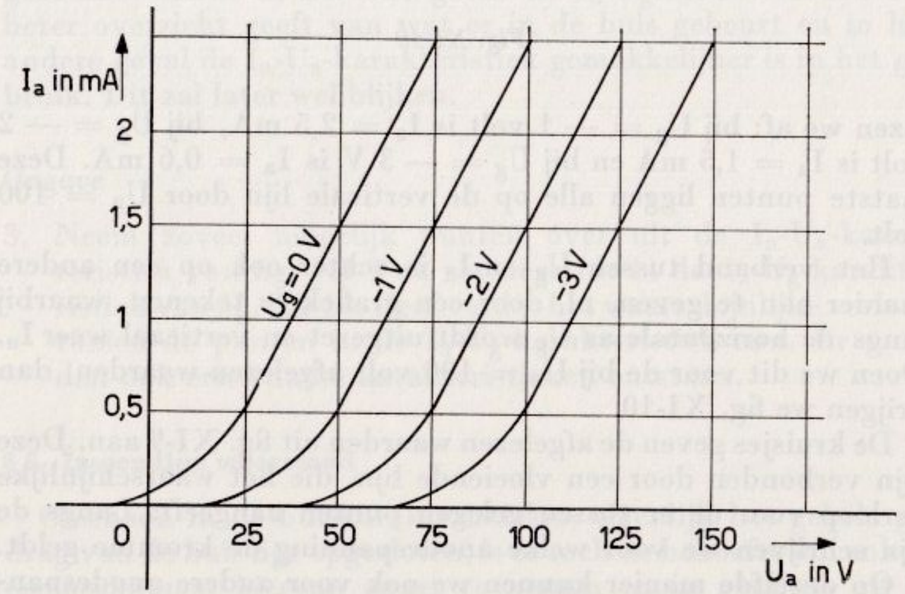


Fig. XI-9

Houden we U_g op dezelfde spanning, dan zien we ook dat bij $U_a = 100$ V de stroom $I_a = 2{,}5$ mA. Bij constante roosterspanning geeft de karakteristiek ons dus het verband tussen I_a en U_a.

We kunnen echter uit dezelfde grafiek ook het verband tussen I_a en U_g aflezen als U_a constant blijft. Als b.v. $U_a = 100$ volt,

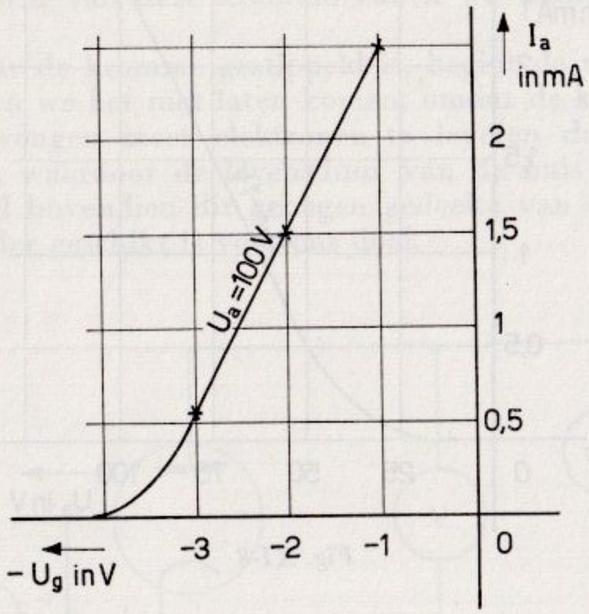


Fig. XI-10

lezen we af: bij $U_g = -1$ volt is $I_a = 2{,}5$ mA, bij $U_g = -2$ volt is $I_a = 1{,}5$ mA en bij $U_g = -3$ V is $I_a = 0{,}6$ mA. Deze laatste punten liggen alle op de verticale lijn door $U_a = 100$ volt.

Het verband tussen U_g en I_a is echter ook op een andere manier aan te geven, nl. door een grafiek te tekenen, waarbij langs de horizontale as U_g wordt uitgezet en verticaal weer I_a. Doen we dit voor de bij $U_a = 100$ volt afgelezen waarden, dan krijgen we fig. XI-10.

De kruisjes geven de afgelezen waarden uit fig. XI-9 aan. Deze zijn verbonden door een vloeiende lijn, die het waarschijnlijke verloop voor de er tussen gelegen punten aangeeft. Langs de lijn schrijven we voor welke anodespanning de kromme geldt.

Op dezelfde manier kunnen we ook voor andere anodespanningen krommen construeren. Natuurlijk kunnen we deze

krommen ook rechtstreeks opmeten volgens de schakeling van fig. XI-11.

De krommen van fig. XI-9 noemen we de I_a-U_a-karakteristieken, die van fig. XI-10 de I_a-U_g-karakteristieken. De I_a-U_a- en de

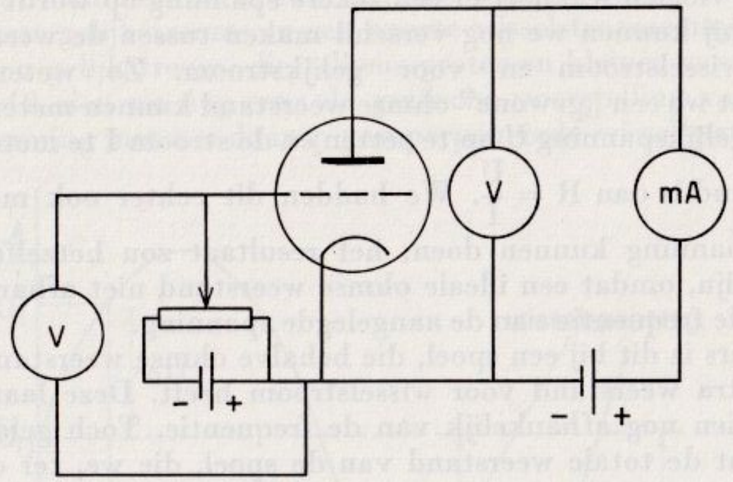


Fig. XI-11

I_a-U_g-karakteristieken geven beide hetzelfde verband aan tussen de drie grootheden I_a, U_g en U_a. Ze worden echter in beide vormen gebruikt omdat in het ene geval de I_a-U_g-karakteristiek een beter overzicht geeft van wat er in de buis gebeurt en in het andere geval de I_a-U_a-karakteristiek gemakkelijker is in het gebruik. Dit zal later wel blijken.

Opgave

3. Neem zoveel mogelijk punten over uit de I_a-U_a-karakteristiek van fig. XI-9 en zet deze uit in de I_a-U_g-karakteristiek van fig. XI-10. Geef verder het waarschijnlijke verloop tussen de punten in de I_a-U_g-karakteristiek aan. Er moet dan ook een bundel karakteristieken ontstaan.

§ 5. Inwendige weerstand

Ofschoon in de buiskarakteristieken eigenlijk het gehele gedrag van de buis ligt opgesloten, is er toch de behoefte om enkele eigenschappen hiervan apart te nemen en in getallen uit te drukken. Een hiervan is de inwendige weerstand R_i.

We moeten hierbij niet direct aan een ingebouwde weerstand denken of iets dergelijks, het gaat hier om een eigenschap der buis zelf, zoals we b.v. ook de inwendige weerstand van een batterij kennen. In het algemeen kunnen we zeggen, dat de weerstand van een onderdeel wordt bepaald door de stroom, die er gaat vloeien wanneer er een zekere spanning op wordt gezet.

Hierbij kunnen we nog verschil maken tussen de weerstand voor wisselstroom en voor gelijkstroom. Zo weten we b.v., dat we een „gewone" ohmse weerstand kunnen meten door er een gelijkspanning U op te zetten en de stroom I te meten. De weerstand is dan $R = \frac{U}{I}$. We hadden dit echter ook met een wisselspanning kunnen doen; het resultaat zou hetzelfde geweest zijn, omdat een ideale ohmse weerstand niet afhankelijk is van de frequentie van de aangelegde spanning.

Anders is dit bij een spoel, die behalve ohmse weerstand ook nog extra weerstand voor wisselstroom heeft. Deze laatste is bovendien nog afhankelijk van de frequentie. Toch geldt ook hier, dat de totale weerstand van de spoel, die we, ter onderscheiding van een ohmse weerstand, impedantie noemen (Z), wordt gemeten door er een spanning op te zetten met die frequentie, waarbij we Z willen weten. Dus hier geldt dan $Z = \frac{U}{I}$, waarbij dan tevens de frequentie moet worden genoteerd.

Zetten we een spanning op een buis tussen anode en kathode, dan gaat er ook een stroom vloeien, maar deze stroom is van allerlei factoren afhankelijk. In de eerste plaats komt de vraag naar voren of we met gelijkstroom of met wisselstroom moeten meten. De karakteristieken van § 4 van dit hoofdstuk zijn met gelijkstroom opgenomen, zodat de gelijkstroomweerstand zonder meer uit de grafiek is te halen, als we tenminste tegelijkertijd een zekere constante roosterspanning aannemen. Zo zien we uit fig. 9, dat voor $U_g = -3$ V bij een anodespanning van 112,5 V de stroom 1 mA is, waaruit dus een gelijkstroomweerstand van $R_i = \frac{U_a}{I_a} = \frac{112{,}5}{0{,}001} = 112\,500\,\Omega$ zou volgen. Zouden we echter een spanning van 150 volt op de anode zetten, dan zou bij dezelfde roosterspanning de stroom 2,5 mA worden, en dus $R_i = \frac{U_a}{I_a} = \frac{150}{0{,}0025} = 60\,000\,\Omega$. Bovendien zien we hoe ook voor elke roosterspanning deze waarden weer anders zijn. Veel hebben we hier niet aan.

Willen we de buis gebruiken voor het versterken van wisselspanningen, dan interesseert ons de wisselstroomweerstand veel meer. Nu weten we uit § 3, dat de stromen en spanningen in een versterkschakeling (fig. XI-3) vrijwel steeds bestaan uit de combinatie van gelijk- en wisselstroom (of -spanning). Deze combinatie kunnen we al naar het ons uitkomt beschouwen als een aparte gelijkstroom- en een aparte wisselstroomcomponent òf als een gelijkstroom, die telkens groter en kleiner wordt. In fig. XI-12 zien we nog eens de grafische voorstelling van een geijkspanning met een daarop gesuperponeerde wisselspanning.

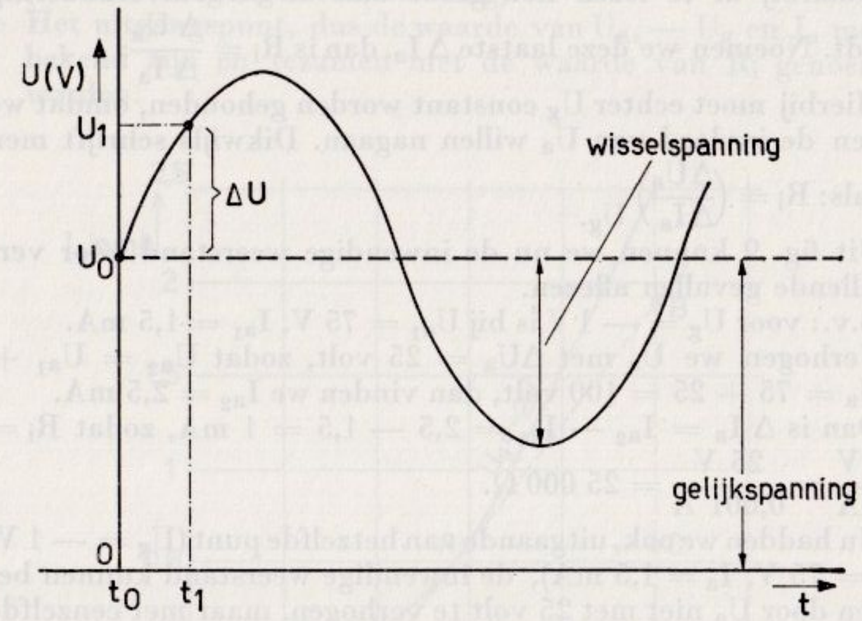


Fig. XI-12

Op het moment t_0 is de momentele waarde van de combinatie U_0. Zien we de toestand alleen op het moment t_0, dan zien we dus alleen een gelijkspanning met een waarde U_0. Even later, op het moment t_1, is deze gelijkspanning iets groter geworden, nl. U_1. Noemen we de toeneming van U_0 ΔU, dan is dus $U_1 = U_0 + \Delta U$. Deze toeneming van U is in dit geval gelijk aan de momentele waarde van de wisselspanning (U_{mom}), zodat dus $\Delta U = U_{mom}$. De maximale waarde, die ΔU kan aannemen, is dus $\Delta U_{max} = U_{max}$, terwijl de momentele waarde van U hoogstens $U + U_{max}$ en niet kleiner dan $U - U_{max}$ kan worden. De maximale en minimale waarden zijn niet afhankelijk van de frequentie.

Zeer belangrijk is ook, dat de *verandering* van U niet afhankelijk is van de waarde van U zelf, maar alleen van de wisselspanning, die er op gesuperponeerd is. Als we dus willen nagaan hoe het gedrag is van een buis voor wisselspanning, dan kunnen we dit doen door de gelijkspanning een zodanige verandering (ΔU) te geven, dat ΔU overeenkomt met de momentele waarde van de wisselspanning. Het tempo, waarin we deze verandering voltrekken (de frequentie), speelt hierbij geen rol.

De wisselstroomweerstand van een buis kunnen we dus bepalen door de anodespanning met ΔU_a te veranderen en daarbij af te lezen hoe groot dan de stroomverandering wordt. Noemen we deze laatste ΔI_a, dan is $R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}$.

Hierbij moet echter U_g constant worden gehouden, omdat we alleen de invloed van U_a willen nagaan. Dikwijls schrijft men dit als: $R_i = \left(\frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}\right)_{U_g}$.

Uit fig. 9 kunnen we nu de inwendige weerstand voor verschillende gevallen aflezen.

B.v.: voor $U_g = -1$ V is bij $U_{a_1} = 75$ V, $I_{a_1} = 1{,}5$ mA.

Verhogen we U_a met $\Delta U_a = 25$ volt, zodat $U_{a_2} = U_{a_1} + \Delta U_a = 75 + 25 = 100$ volt, dan vinden we $I_{a_2} = 2{,}5$ mA.

Dan is $\Delta I_a = I_{a_2} - I_{a_1} = 2{,}5 - 1{,}5 = 1$ mA, zodat $R_i = \frac{25 \text{ V}}{1 \text{ mA}} = \frac{25 \text{ V}}{0{,}001 \text{ A}} = 25\,000\ \Omega$.

Nu hadden we ook, uitgaande van hetzelfde punt ($U_g = -1$ V, $U_a = 75$ V, $I_a = 1{,}5$ mA), de inwendige weerstand kunnen bepalen door U_a niet met 25 volt te verhogen, maar met eenzelfde waarde te verlagen. We zien dan dat de stroom niet verder daalt dan tot 0,6 mA. Hieruit volgt, dat $\Delta I_a = 1{,}5 - 0{,}6 = 0{,}9$ mA. Omdat $\Delta U_a = 25$ volt is gebleven (eigenlijk zouden we moeten schrijven $\Delta U_a = -25$ volt, maar omdat het hier om „veranderingen" gaat, speelt het — teken hier geen rol) wordt $R_i = \frac{25}{0{,}0009} = 27\,777\ \Omega$.

Kiezen we echter ΔU_a kleiner dan 25 volt, b.v. 12,5 V, dan wordt R_i weer praktisch gelijk aan 25 000 Ω, zowel bij een verhoging als bij een verlaging van 12,5 volt.

($R_i = \frac{12{,}5 \text{ V}}{0{,}5 \text{ mA}} = \frac{12{,}5}{0{,}0005} = 25\,000\ \Omega$).

Zouden we een ander uitgangspunt hebben genomen, b.v. $U_g = -3$ V, $V_a = 100$ V, $I_a = 0{,}6$ mA, dan vinden we voor

een ΔU_a van $+ 12{,}5$ volt een ΔI_a van $1 - 0{,}6 = 0{,}4$ mA (dus $R_i = \frac{12{,}5}{0{,}0004} = 31\,000\ \Omega$), terwijl bij een $\Delta U_a = -12{,}5$ V de stroomvermindering 0,3 mA is (dus $R_i = \frac{12{,}5}{0{,}0003} = 41\,000\ \Omega$).

Wat is nu *de* inwendige weerstand van een buis? We spreken hiervoor het volgende af:

1e Voor het bepalen van R_i moeten we ΔU_a zo klein nemen, dat een verhoging van U_a met ΔU_a dezelfde stroomverandering veroorzaakt als een verlaging van U_a met ΔU_a (echter in tegengestelde richting).

2e Het uitgangspunt, dus de waarde van U_a, $-U_g$ en I_a moet bekend zijn en tezamen met de waarde van R_i genoemd worden.

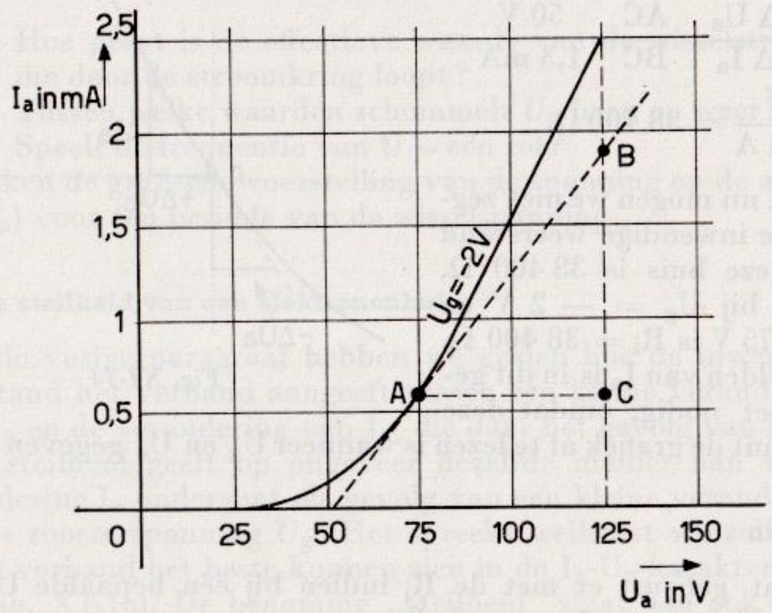


Fig. XI-13

Voorbeeld: Gegeven zijn de I_a-U_a-karakteristieken van een triode, en verder dat $U_g = -2$ V en $U_a = 75$ volt.

We kiezen nu de I_a-U_a-karakteristiek voor $U_g = -2$ V (fig. XI-13) en trekken bij $U_a = 75$ V een verticale lijn. Het snijpunt met de karakteristiek geeft ons het gegeven uitgangspunt. In dit punt trekken we een raaklijn aan de karakteristiek. Deze raaklijn valt voor een klein gedeelte samen met de karakteristiek. In fig. XI-14 is dit op iets groter schaal uitgezet.

We kunnen dus ook zeggen, dat de karakteristiek voor een klein gedeelte recht is. In dit kleine rechte deel geldt de hierboven genoemde afspraak, dat een kleine verhoging van U_a dezelfde stroomverandering geeft als een verlaging van U_a met dezelfde waarde. Nu zijn deze kleine veranderingen zeer moeilijk af te lezen, maar nu we de raaklijn hebben getrokken, kunnen we op deze raaklijn een willekeurig punt kiezen. De verhouding tussen AC en BC is immers dezelfde als tussen ΔU_a en ΔI_a.

In fig. XI-13 is AC:

$125 - 75 = 50$ volt en BC = $1{,}9 - 0{,}6 = 1{,}3$ mA, dus:

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{AC}{BC} = \frac{50\ V}{1{,}3\ mA} = \frac{50\ V}{0{,}0013\ A} = 38\,400\ \Omega.$$

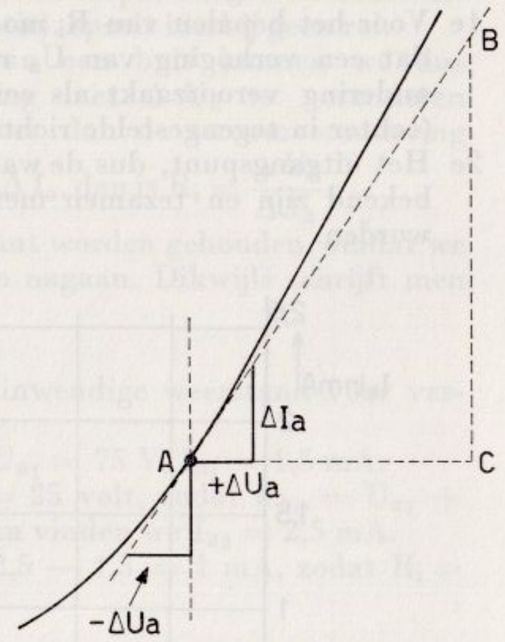


Fig. XI-14

Ook nu mogen we niet zeggen: *de* inwendige weerstand van deze buis is 38 400 Ω, maar: bij $U_g = -2$ V en $U_a = 75$ V is $R_i = 38\,400\ \Omega$. Vermelden van I_a is in dit geval niet nodig, omdat deze direct uit de grafiek af te lezen is wanneer U_g en U_a gegeven zijn.

Opgaven

4. Wat gebeurt er met de R_i indien bij één bepaalde U_g de U_a kleiner wordt gemaakt?
5. Wat gebeurt er met R_i indien bij één bepaalde U_a de U_g minder negatief wordt (nagaan in fig. XI-9).
6. Teken een schakeling, waarmede we de R_i van een buis kunnen meten. Waarop moeten we hierbij letten?
7. Een buis met een karakteristiekenbundel als in fig. XI-9, is geschakeld volgens fig. XI-15.
   In serie met de anodebatterij is een wisselspanningsbron opgenomen, waarvan de inwendige weerstand mag worden verwaarloosd. Deze levert een sinusvormige wisselspanning, waarvan de effectieve waarde $U\sim = 7{,}1$ V.

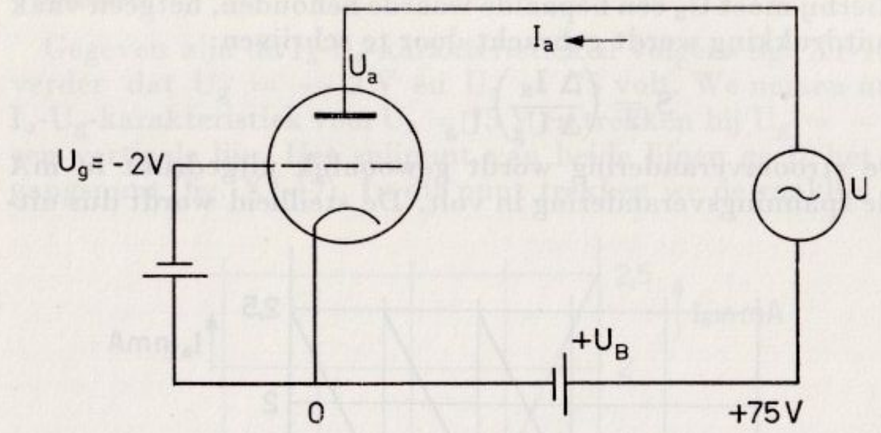


Fig. XI-15

a. Hoe groot is de effectieve waarde van de wisselstroom, die door de stroomkring loopt?
b. Tussen welke waarden schommelt U_a heen en weer?
c. Speelt de frequentie van $U\sim$ een rol?

8. Teken de grafische voorstelling van de spanning op de anode (U_a) voor één periode van de wisselspanning.

§ 6. De steilheid van een elektronenbuis

In de vorige paragraaf hebben we gezien hoe de inwendige weerstand het verband aangeeft tussen een kleine verandering van U_a en de verandering van I_a, die daar het gevolg van is.

De steilheid geeft op ongeveer dezelfde manier aan welke verandering I_a ondergaat als gevolg van een kleine verandering van de roosterspanning U_g. Het spreekt welhaast vanzelf, dat we dit verband het beste kunnen zien in de I_a-U_g-karakteristieken (fig. XI-16). De benaming „steilheid" slaat dan ook op de steilheid van de I_a-U_g-karakteristiek.

We zouden ook kunnen zeggen: de „helling" van de karakteristiek. Evenals we de helling van een weg kunnen uitdrukken in het aantal meters, dat de weg per kilometer lengte stijgt, zo drukt de steilheid hier uit hoeveel mA de stroom stijgt (resp. daalt) wanneer U_g minder (resp. meer) negatief wordt. Veranderen we U_g met ΔU_g, dan verandert de stroom met ΔI_a, zodat dan de steilheid kan worden uitgedrukt in de formule:

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g}.$$

Hierbij moet U_a een bepaalde waarde behouden, hetgeen vaak tot uitdrukking wordt gebracht door te schrijven:

$$S = \left(\frac{\Delta I_a}{\Delta U_g}\right)_{U_a}$$

De stroomverandering wordt gewoonlijk uitgedrukt in mA en de spanningsverandering in volt. De steilheid wordt dus uitgedrukt in mA/V, tenzij uitdrukkelijk anders wordt opgegeven. In Amerikaanse literatuur komt men wel mho tegen i.p.v. mA/V. Evenals bij het bepalen van R_i in de vorige paragraaf maken we ook hier een afspraak:

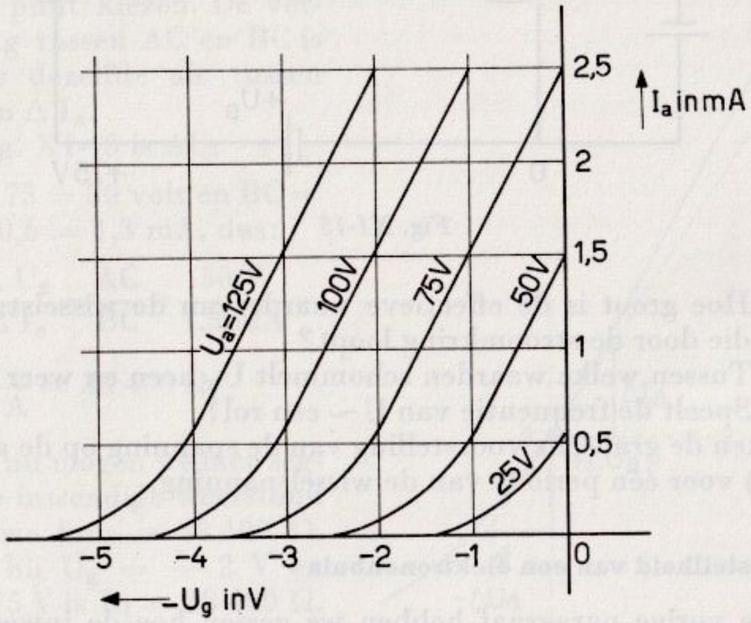


Fig. XI-16

1e Voor het bepalen van S moeten we ΔU_g zo klein nemen, dat een verhoging van U_g met ΔU_g dezelfde stroomverandering veroorzaakt als een verlaging van U_g met ΔU_g (echter in tegengestelde richting).

2e Het uitgangspunt, dus de waarde van U_a, $-U_g$ en I_a, moet bekend zijn en tezamen met de waarde van S worden genoemd.

Om aan deze voorwaarden te voldoen trekken we, wederom zoals bij de bepaling van R_i, in het gegeven uitgangspunt een raaklijn aan de karakteristiek, nu echter aan de I_a-U_g-karakteristiek. De helling van deze raaklijn is dan de steilheid in dat punt.

Voorbeeld

Gegeven zijn de I_a-U_g-karakteristieken volgens fig. XI-16 en verder dat $U_g = -2$ V en $U_a = 75$ volt. We nemen nu de I_a-U_g-karakteristiek voor $U_a = 75$ V en trekken bij $U_g = -2$ V een verticale lijn. Het snijpunt van beide lijnen geeft het uitgangspunt (fig. XI-17). In dit punt trekken we de raaklijn aan

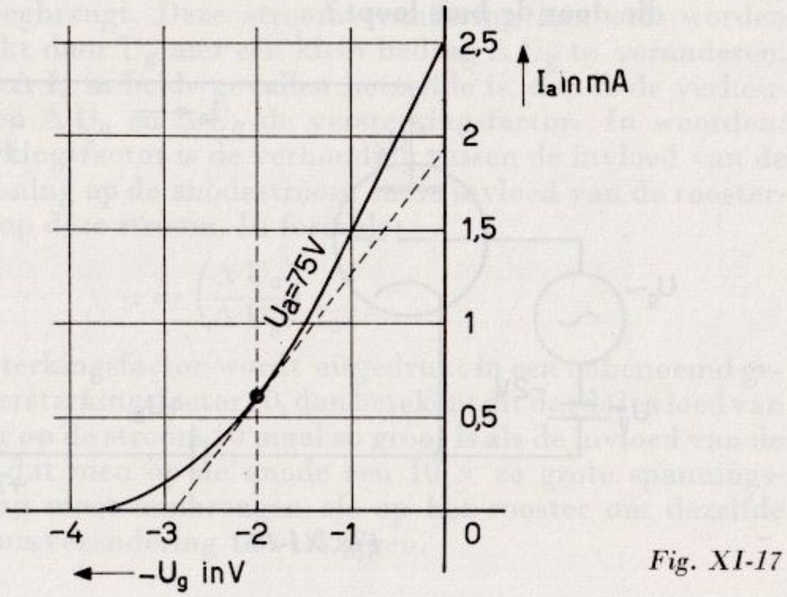


Fig. XI-17

de karakteristiek. De helling van de raaklijn kunnen we bepalen zoals dat het beste uitkomt. Als b.v. de roosterspanning verandert van 0 naar —2,9 volt, dan verandert de stroom van 1,9 mA naar 0 mA.

S wordt dan $\frac{1{,}9 \text{ mA}}{2{,}9 \text{ V}} = 0{,}65$ mA/V. Dit is de steilheid van de gegeven buis bij: $U_g = -2$ V en $U_a = 75$ V.

Opgaven

9. Wat gebeurt er met de steilheid indien bij één bepaalde U_g de U_a kleiner wordt gemaakt?
10. Wat gebeurt er met S indien bij een bepaalde U_a de U_g minder negatief wordt? (Nagaan in fig. XI-16.)
11. Vergelijk de uitkomsten van de opgaven 9 en 10 met die van de opgaven 4 en 5.
12. Teken een schakeling, waarmee we de S van een buis kunnen meten.

3. Een buis, waarvan de karakteristieken zijn als in fig. XI-16, is geschakeld volgens fig. XI-18.
In serie met de roosterspanningsbatterij is een wisselspanningsbron opgenomen, die een sinusvormige spanning levert van 0,28 volt (effectieve waarde).
Gevraagd:
a. Hoe groot is de effectieve waarde van de wisselstroom, die door de buis loopt?

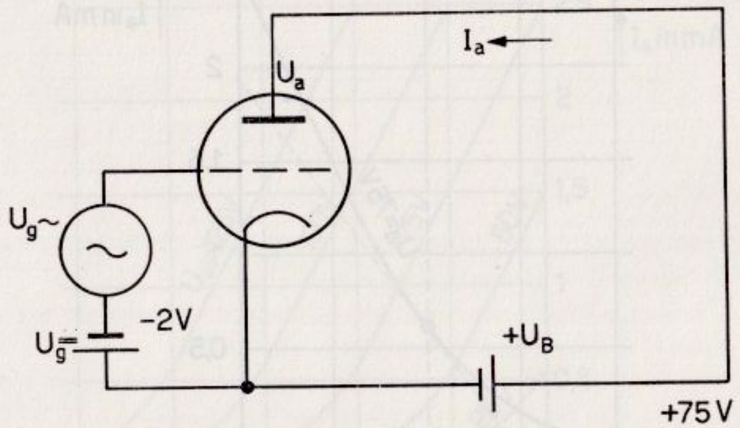


Fig. XI-18

b. Waarom is in dit geval de inwendige weerstand van de spanningsbron niet belangrijk?
c. Tussen welke waarden schommelt U_g heen en weer? Zet deze uit in een grafische voorstelling.
14. Teken de grafische voorstelling van de stroom door de buis (vraag 13) voor één periode van de wisselspanning.

§ 7. De versterkingsfactor van een elektronenbuis

De naam „versterkingsfactor" geeft nogal eens aanleiding tot misverstand. In de eerste plaats kunnen we met een buis alléén geen versterking verkrijgen. Dit is b.v. te zien uit fig. 18. Wel wordt een wisselspanning op het rooster gezet, maar omdat in de anodeleiding geen weerstand of andere impedantie is opgenomen, is nergens een versterkte wisselspanning aanwezig. In dit geval is er dus ook geen versterking, maar de buis zelf heeft wèl een versterkingsfactor. Evenals S en R_i moeten we de versterkingsfactor (aangegeven met de Griekse letter μ, mu)

beschouwen als een buiseigenschap. Als de buis in een versterkschakeling wordt opgenomen is het belangrijk voor de versterking hoe groot μ is, maar evenzeer is het belangrijk hoe groot S en R_i zijn. Er is trouwens een bepaald verband tussen μ, S en R_i.

In de vorige paragrafen hebben we gezien hoe een verandering van U_a met een klein bedrag ΔU_a een stroomverandering ΔI_a teweegbrengt. Deze stroomverandering kan ook worden veroorzaakt door U_g met een klein bedrag ΔU_g te veranderen. Indien nu ΔI_a in beide gevallen hetzelfde is, dan is de verhouding tussen ΔU_a en ΔU_g de versterkingsfactor. In woorden: de versterkingsfactor is de verhouding tussen de invloed van de anodespanning op de anodestroom en de invloed van de roosterspanning op deze stroom. In formule:

$$\mu = \left(\frac{\Delta U_a}{\Delta U_g}\right)_{I_a}.$$

De versterkingsfactor wordt uitgedrukt in een onbenoemd getal. Is de versterkingsfactor 10, dan betekent dit dat de invloed van het rooster op de stroom 10 maal zo groot is als de invloed van de anode, of dat men op de anode een 10 × zo grote spanningsverandering moet aanbrengen als op het rooster om dezelfde anodestroomverandering te verkrijgen.

Voorbeeld

In fig. 19 is een combinatie getekend van de reeds eerder gegeven fig. XI-9 en XI-16. In de I_a-U_a-karakteristiek zien we hoe bij een $V_g = -2$ V een verandering van U_a van 75 naar 100 V een stroomstijging geeft van 0,6 naar 1,5 mA.

In de I_a-U_g-karakteristiek zien we hoe bij een U_a van 75 V een verandering van U_g van — 2 naar — 1 V dezelfde stroomstijging veroorzaakt.

Een roosterspanningsverandering van 1 volt doet dus hetzelfde als een anodespanningsverandering van 25 volt. De invloed van het rooster op de stroom is dus 25 × zo groot en dus: $\mu = 25$.

We hadden dit ook alleen uit de I_a-U_a-karakteristieken kunnen aflezen. Trekken we door $U_a = 75$ V een verticale lijn totdat deze de lijn voor $U_g = -1$ V snijdt, dan zien we ook hieruit dat door bij constante U_a (in dit geval 75 V) over te gaan van $U_g = -2$ V naar de lijn voor $U_g = -1$ V de stroom evenveel stijgt, als wanneer we langs de lijn $U_g = -2$ V

van $U_a = 75$ V naar $U_a = 100$ volt gaan. Op overeenkomstige wijze kunnen we ook alleen uit de I_a-U_g-karakteristiek μ bepalen.

In tegenstelling met S en R_i blijkt, dat μ niet rechtstreeks samenhangt met de kromming van de karakteristiek. In vele gevallen kunnen we zelfs aannemen, dat μ voor elk uitgangspunt

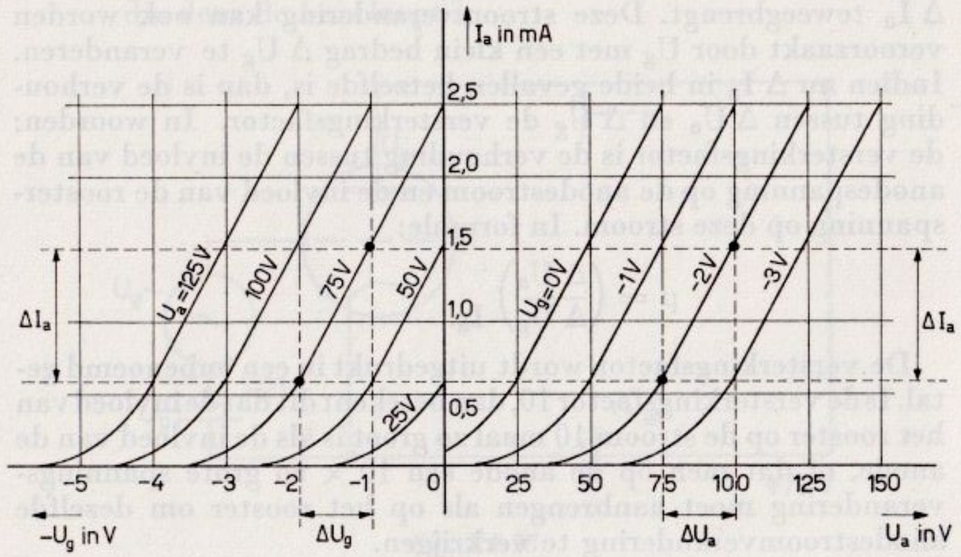


Fig. XI-19

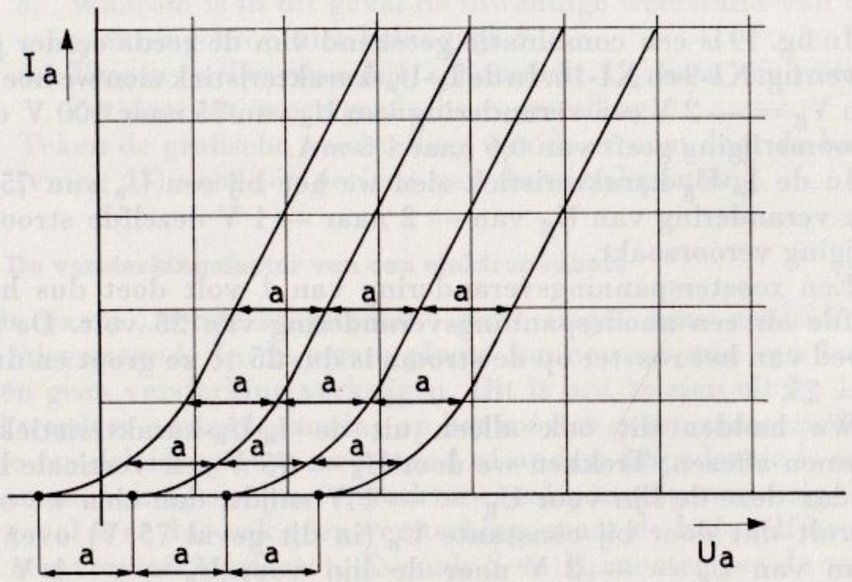


Fig. XI-20

dezelfde is. Is dit het geval, dan is de horizontale afstand tussen de verschillende I_a-U_a-karakteristieken steeds precies gelijk (fig. XI-20). De afstand a is, wanneer het verschil in roosterspanning precies 1 volt is, tevens de versterkingsfactor.

Voor de I_a-U_g-karakteristieken krijgt men iets dergelijks. Ook daar zijn dan de horizontale afstanden gelijk. Willen we μ zeer nauwkeurig weten, dan moeten we ook hier gebruik maken van een kleine ΔU_a en een kleine ΔU_g, waarbij we dan tevens het uitgangspunt moeten vermelden. Dit wordt ons echter gemakkelijk gemaakt, indien we R_i en S reeds kennen. We hebben nl. gezien dat:

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \text{ en } S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g}.$$

Vermenigvuldigen we deze beide, dan krijgen we:

$$S \times R_i = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g} \times \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_g}$$

en omdat $\mu = \dfrac{\Delta U_a}{\Delta U_g}$ mogen we dus schrijven:

$$\boxed{\mu = S \cdot R_i}$$

(*formule van Barkhausen*)

Voorbeeld

In de voorbeelden van § 6 en 7 vonden we, dat voor de gegeven karakteristieken, bij een uitgangspunt van $U_g = -2$ V en $U_a = 75$ V:

$$R_i = 38\,400\ \Omega \text{ en } S = 0{,}65\ \text{mA/V}.$$

Voor ditzelfde punt geldt dus:

$$\mu = 0{,}65\ \text{mA/V} \times 38\,400\ \Omega = \frac{0{,}65}{1\,000}\ \text{A/V} \times 38\,400\ \Omega = 25.$$

Dit klopt dus met de uit fig. 19 afgelezen waarde.

Opgave

15. In fig. XI-21 is de karakteristiek getekend van het triodegedeelte van een mengbuis. Deze triode is niet bedoeld

om als versterkbuis te worden gebruikt, maar als oscillatorbuis in een superheterodyne. De gepubliceerde gegevens zijn dan ook aangepast aan het gebruik als oscillatorbuis. Toch willen we eens nagaan of de gepubliceerde karakteristieken ons voldoende gegevens kunnen verschaffen voor het gebruik als versterkbuis. Gegeven is de I_a-U_g-karakteristiek voor $U_a = 100$ V en de volledige I_a-U_a-karakteristieken (fig. XI-21 en XI-22).

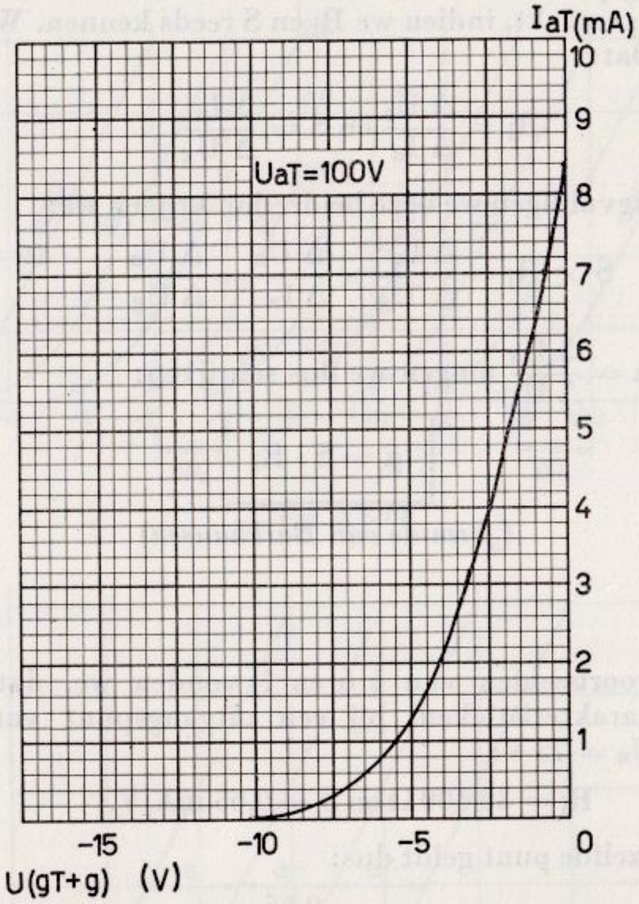


Fig. XI-21

Gevraagd wordt:

a. Teken de I_a-U_g-karakteristiek voor $U_a = 125$ volt.
b. Bepaal uit de I_a-U_a-karakteristiek de R_i voor $U_a = 125$ V en $U_g = -2$ V.
c. Bepaal uit de I_a-U_g-karakteristiek de S voor $U_a = 125$ V en $U_g = -2$ V.

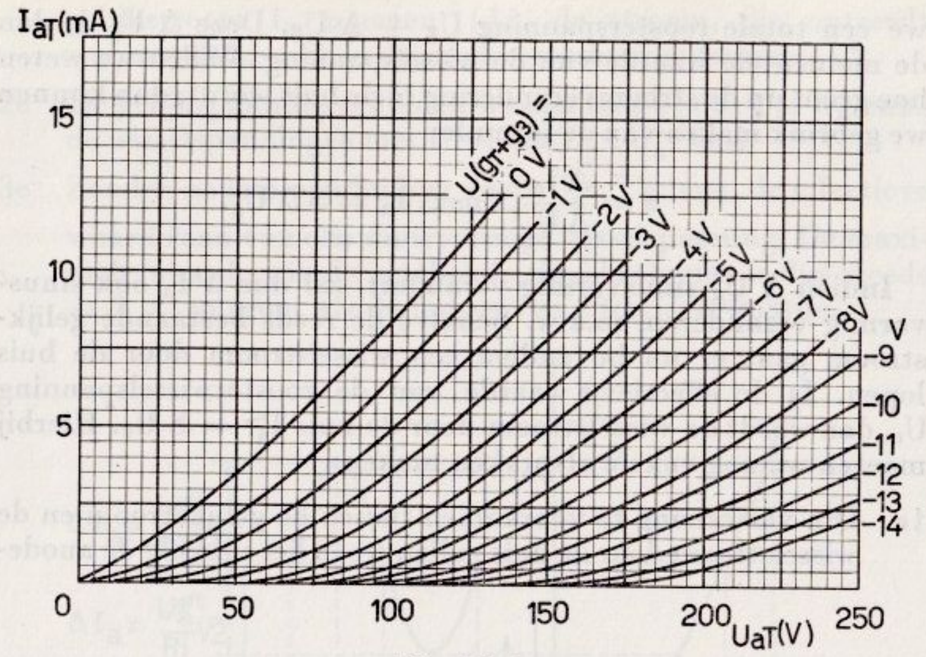


Fig. XI-22

d. Bereken de μ voor $U_a = 125$ V en $U_g = -2$ V en ga in de I_a-U_g en de I_a-U_a-karakteristiek na of dit klopt.

Laat in de figuren duidelijk zien hoe U de verschillende waarden hebt bepaald.

§ 8. Wisselspanningen op rooster en anode

In vraagstuk 7 van dit hoofdstuk hebben we reeds berekend welke wisselstroom er door de buis vloeit, indien er een wisselspanning op de anode komt te staan, in vraagstuk 13 van dit hoofdstuk is ditzelfde gebeurd voor het geval er een wisselspanning op het rooster komt te staan. We willen hier nu wat verder op in gaan.

In de eerste plaats zullen we afspreken, dat de wisselspanningen zo klein zijn, dat het gebruikte deel van de karakteristiek als recht kan worden beschouwd. Dit gedeelte valt dus samen met de raaklijn, die we in het uitgangspunt hebben getrokken. (Zie ook fig. XI-14 en XI-17.) Voor deze kleine spanningen mogen we dus in plaats van de karakteristiek ook de raaklijn gebruiken. Beginnen we met een wisselspanning op het rooster, dan gaan we uit van een bepaalde vaste negatieve roosterspanning U_g (op de waarde hiervan komen we later nog terug). Door met deze gelijkspanning een wisselspanning in serie te zetten, krijgen

we een totale roosterspanning $U_g + \Delta U_g$. Deze ΔU_g is dan de momentele waarde van de wisselspanning. Willen we weten hoe groot nu de stroomverandering in de buis wordt, dan kunnen we gebruik maken van de formule:

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g}, \text{ dus } \Delta I_a = S \, \Delta U_g.$$

Indien ΔU_g sinusvormig verandert, zal dus ΔI_a ook sinusvormig veranderen, m.a.w. behalve de reeds bestaande gelijkstroom gaat er nu bovendien een wisselstroom door de buis lopen. Is de effectieve waarde van de roosterwisselspanning U_e, dan wordt de wisselstroom door de buis $I_a\sim = S \, U_e$. Hierbij moeten we nog enkele afspraken maken:

1e Om verwarring te voorkomen tussen de gelijkstroom en de wisselstroom door de buis zullen we in het vervolg de anode-

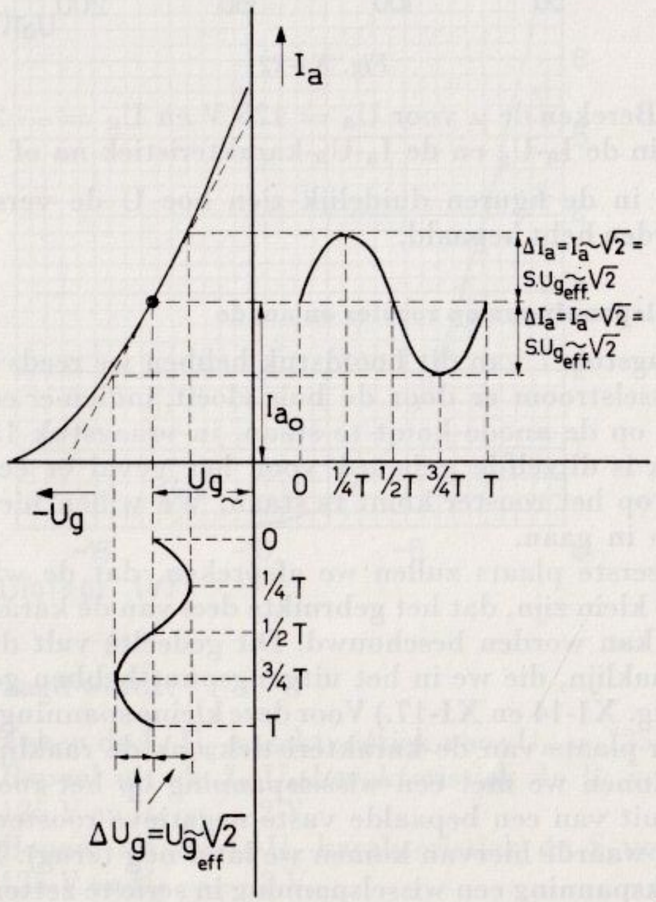


Fig. XI-23

gelijkstroom I_a noemen (d.i. de stroom, die optreedt wanneer $\Delta I_a = 0$) en de anodestroomverandering $= I_a\sim$.

2e De gelijkspanningen duiden we aan met U, dus U_g, U_a enz., de wisselspanningen met U $\sim$, dus $U_g\sim$, $U_a\sim$ enz.

3e Zonder nadere aanduiding geeft $U_g\sim$, $U_a\sim$ enz. de effectieve waarde aan van een sinusvormige wisselspanning. De maximale waarde van de getekende sinuskrommen is dus steeds $\sqrt{2} \times$ zo groot als de opgegeven effectieve waarde.

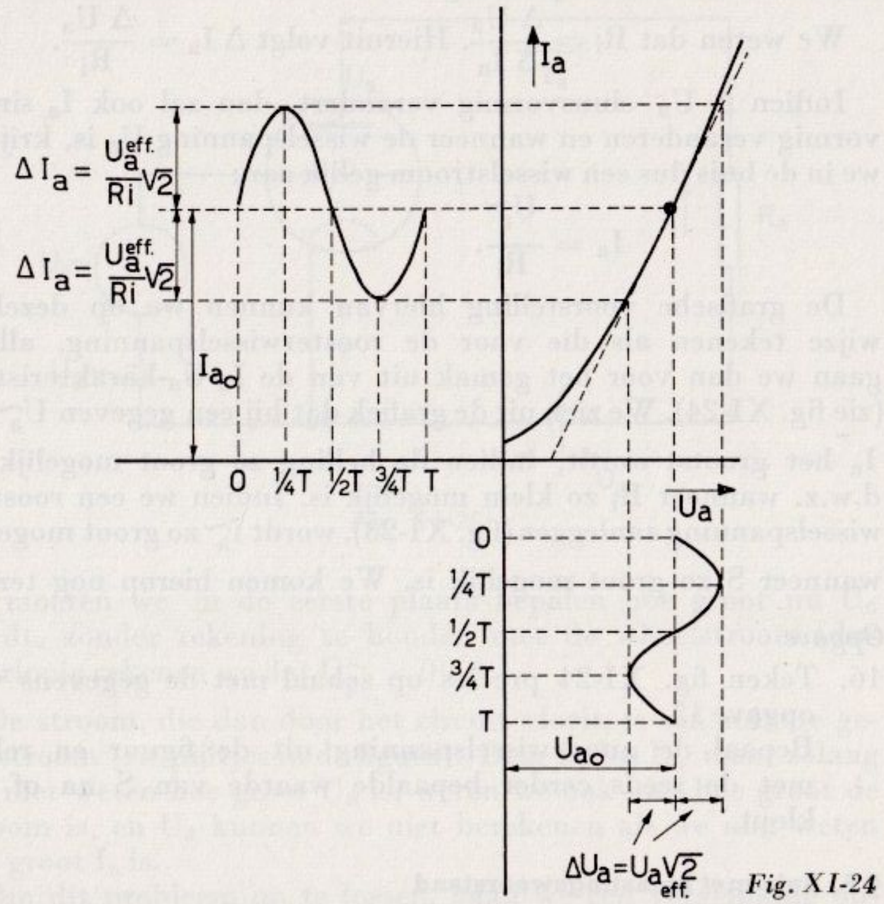


Fig. XI-24

In fig. XI-23 zien we de grafische voorstelling, die eigenlijk een combinatie is van de I_a-U_g-karakteristiek en de grafische voorstelling van de roosterspanning en anodestroom. Daarom komt ook de tijd t in deze grafiek voor. De begintoestand hebben we bij $t = 0$. Wanneer $t = {}^1/_4$ T is de negatieve roosterspanning het kleinst, de anodestroom het grootst. (Hierin is T de tijd van

één periode van de beschouwde wisselspanning of wisselstroom). Bij $t = {}^3/_4\ T$ is de negatieve roosterspanning het grootst en de anodestroom het kleinst. Wanneer $t = T$ begint alles weer van voren af aan. De schakeling hiervoor is reeds eerder gegeven in fig. XI-18.

In vraagstuk 7 is het geval behandeld, dat er een wisselspanning in serie met de vaste (positieve) anodespanning staat (fig. XI-15). Om na te gaan welke anodestroomverandering hierdoor ontstaat, kunnen we dezelfde redenering volgen als voor de roosterwisselspanning.

We weten dat $R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}$. Hieruit volgt $\Delta I_a = \frac{\Delta U_a}{R_i}$.

Indien ΔU_a sinusvormig verandert, dan zal ook I_a sinusvormig veranderen en wanneer de wisselspanning U_a is, krijgen we in de buis dus een wisselstroom gelijk aan:

$$I_a = \frac{U_a^{\sim}}{R_i}.$$

De grafische voorstelling hiervan kunnen we op dezelfde wijze tekenen als die voor de roosterwisselspanning, alleen gaan we dan voor het gemak uit van de I_a-U_a-karakteristiek (zie fig. XI-24). We zien uit de grafiek dat bij een gegeven $U_a^{\sim}$ de I_a het grootst wordt, indien de helling zo groot mogelijk is, d.w.z. wanneer R_i zo klein mogelijk is. Indien we een roosterwisselspanning aanleggen (fig. XI-23), wordt $I_a^{\sim}$ zo groot mogelijk wanneer S zo groot mogelijk is. We komen hierop nog terug.

Opgave

16. Teken fig. XI-24 precies op schaal met de gegevens van opgave 15.
    Bepaal de anodewisselspanning uit de figuur en reken met de reeds eerder bepaalde waarde van S na of dit klopt.

§ 9. Buis met belastingsweerstand

De gegevens en eigenschappen van de buis, zoals we die nu hebben behandeld, zijn eigenschappen van de buis alleen. We hebben reeds eerder opgemerkt, dat deze gegevens nog niet veel zeggen over de versterking van een bepaalde wisselspanning, indien de buis in een bepaalde schakeling is opgenomen. Men noemt deze gegevens de statische gegevens en de behandelde karakteristieken de statische karakteristieken. Ze kunnen

alle worden gemeten en opgenomen met behulp van gelijkspanning en gelijkstroom, door deze langzaam of in stappen te laten veranderen.

Willen we echter de versterking van de schakeling bepalen, dan maken we wel gebruik van de statische gegevens van de buis, maar moeten tevens rekening houden met de rest van de schakeling. In fig. XI-25 is tussen de anodebatterij en de anode een weerstand R_a aangebracht. Nu is in de regel U_B een bepaalde vaste positieve spanning. Uitgaande van deze spanning

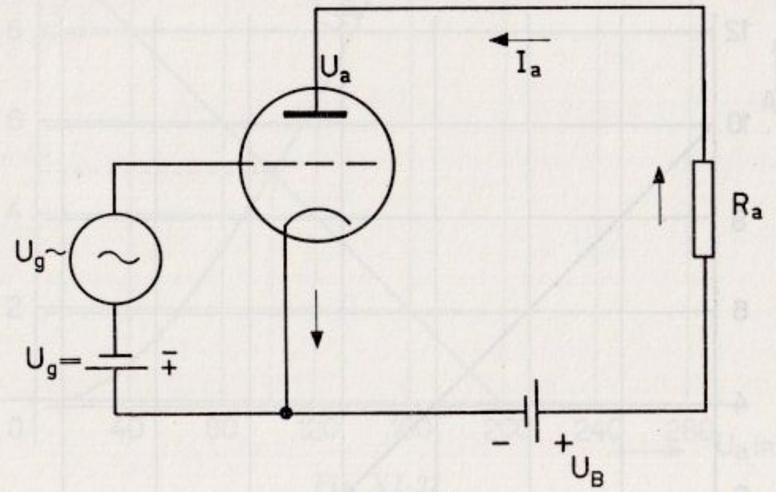


Fig. XI-25

U_B moeten we in de eerste plaats bepalen hoe groot nu U_a wordt, zonder rekening te houden met de wisselstroom (dus voorlopig rekenen we dat $U_g^{\sim} = 0$).

De stroom, die dan door het circuit vloeit, is een zuivere gelijkstroom (zie pijltjes in de figuur). Deze is dus I_a, maar zolang we niet weten hoe groot U_a is, weten we ook niet hoe groot de stroom is, en U_a kunnen we niet berekenen als we niet weten hoe groot I_a is.

Om dit probleem op te lossen, gaan we een vergelijking opstellen, die ons iets vertelt over het verband tussen de verschillende waarden zonder dat we die waarden zelf kennen.

Als de stroom door R_a gelijk aan I_a is, dan ontstaat er volgens de wet van Ohm een spanning over R_a, die gelijk is aan $I_a\ R_a$. De richting van de stroom is van $+\ U_B$ af, zodat we U_a vinden door $I_a\ R_a$ af te trekken van U_B. De gezochte vergelijking is dus: $U_a = U_B - I_a\ R_a$.

Hier is nu U_B een vast (bekend) getal, evenals R_a, maar de waarden van I_a en U_a kennen we niet. Als voorbeeld zullen we eens aannemen, dat $U_B = 200$ V en $R_a = 20\,000\ \Omega$. De vergelijking wordt dan:

$$U_a = 200 - 20\,000\, I_a$$

of, wanneer we I_a uitdrukken in mA, $U_a = 200 - 20\ I_a$.

We kunnen deze vergelijkingen nu in een grafische voorstelling uitzetten. Hiertoe nemen we telkens een bepaalde waarde voor I_a aan en berekenen de daarbij behorende U_a.

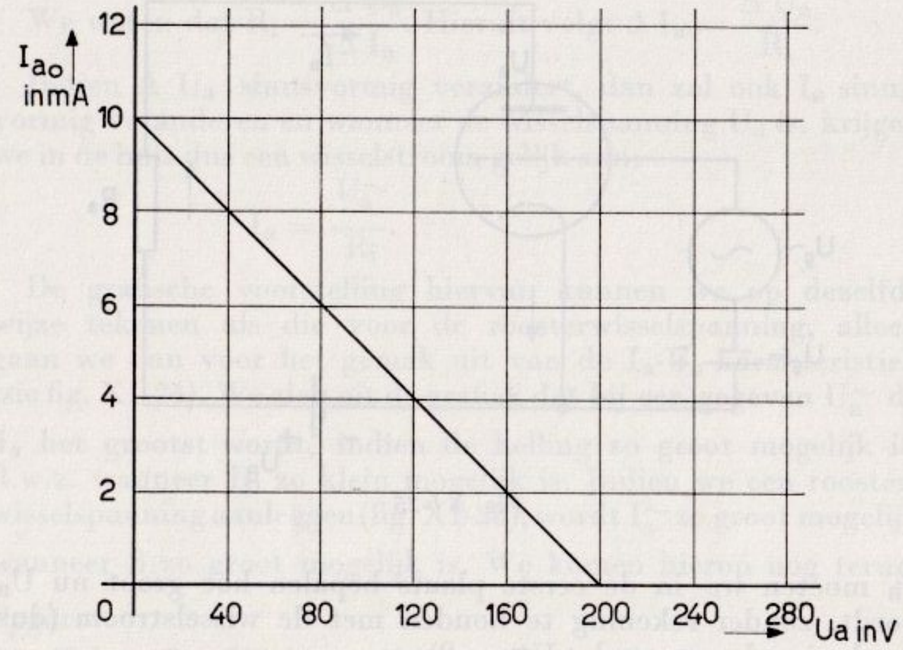


Fig. XI-26

$I_a = 0$ mA	$U_a = 200$ V
$I_a = 2$ mA	$U_a = 160$ V
$I_a = 4$ mA	$U_a = 120$ V
$I_a = 6$ mA	$U_a = 80$ V
$I_a = 8$ mA	$U_a = 40$ V
$I_a = 10$ mA	$U_a = 0$ V

Fig. XI-26 geeft hiervan de grafische voorstelling. We weten nu dat de gezochte I_a en U_a ergens op de gevonden rechte lijn moeten liggen.

Nu kennen we nòg een kromme, die ook het verband tussen I_a en U_a geeft, als tenminste U_g bekend is, dat is de I_a-U_a karakteristiek. Wanneer we deze in hetzelfde assenstelsel tekenen, krijgen we fig. XI-27. We kunnen nu gemakkelijk nagaan, dat het gezochte punt moet liggen op het snijpunt van beide lijnen, immers dit moet op beide lijnen tegelijk liggen.

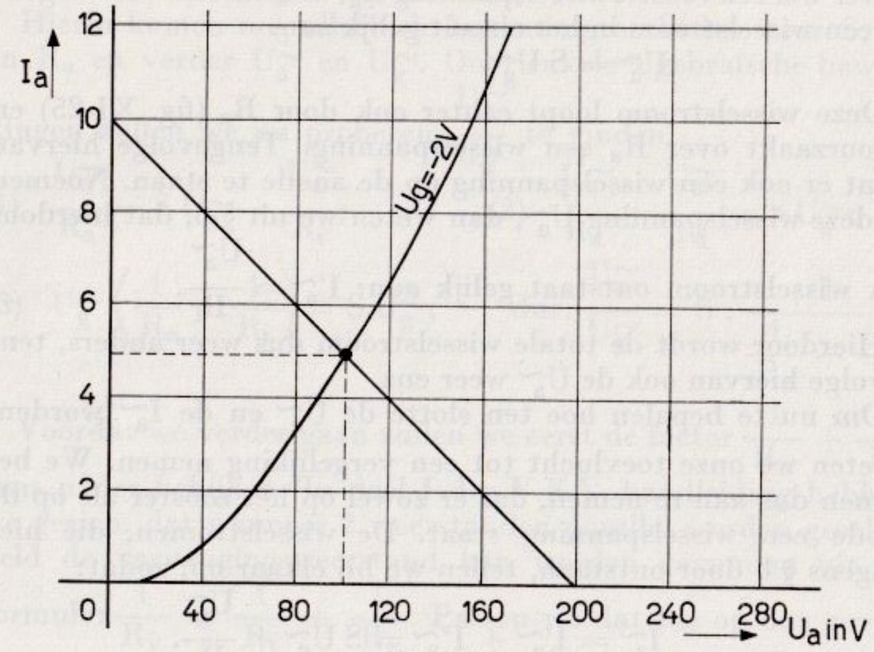


Fig. XI-27

Het blijkt, dat in dit geval: $I_a = 5$ mA en $U_a = 100$ V. We noemen het gevonden punt het *instelpunt* of *werkpunt*. Het werkpunt is dus voor een bepaalde buis vastgelegd door de waarden van U_g, U_B, en R_a. De weerstand R_a noemen we de *belastingsweerstand* en de rechte lijn van fig. XI-26 de *belastingslijn*. De stroom I_a in het werkpunt noemen we de *ruststroom*.

Opgaven

17. Teken in fig. XI-27 de belastingslijnen voor $U_B = 200$ V en $R_a =$ resp. 10 000 Ω en 40 000 Ω. Doe dit ook voor $U_B = 240$ V en $R_a =$ resp. 10 000, 20 000 en 40 000 Ω. Schrijf langs elke belastingslijn voor welke R_a deze geldt.
18. Teken in de I_a-U_a-karakteristieken van de triode uit fig. 22 de belastingslijn voor $U_B = 250$ V en $R_a = 20\,000\ \Omega$, en bepaal het werkpunt voor $U_g = -1$ V, $U_g = -2$ V en $U_g = -3$ V.

§ 10. Versterking

In de vorige paragraaf hebben we voorlopig aangenomen, dat er geen roosterwisselspanning aanwezig is en vonden zo het werkpunt van de buis, met een bepaalde I_{ao} en V_a. Is er echter wel een roosterwisselspanning E_g, dan ontstaat er volgens § 8 een wisselstroom in het circuit gelijk aan:

$$I'_a{\sim} = S\,U_g{\sim}.$$

Deze wisselstroom loopt echter ook door R_a (fig. XI-25) en veroorzaakt over R_a een wisselspanning. Tengevolge hiervan komt er ook een wisselspanning op de anode te staan. Noemen we deze wisselspanning $U_a{\sim}$, dan weten we uit § 8, dat hierdoor ook wisselstroom ontstaat gelijk aan: $I'_a{\sim} = \dfrac{U_a{\sim}}{R_i}$.

Hierdoor wordt de totale wisselstroom dus weer anders, tengevolge hiervan ook de $U_a{\sim}$ weer enz.

Om nu te bepalen hoe ten slotte de $U_a{\sim}$ en de $I_a{\sim}$ worden, moeten we onze toevlucht tot een vergelijking nemen. We beginnen dus aan te nemen, dat er zowel op het rooster als op de anode een wisselspanning staat. De wisselstromen, die hier volgens § 8 door ontstaan, tellen we bij elkaar op, zodat:

$$I_a{\sim} = I'_a{\sim} + I''_a{\sim} = S\,U_g{\sim} + \frac{U_g{\sim}}{R_i}.$$

Nu moeten we hierbij echter even op het + of — teken letten. Uit fig. XI-23 blijkt, dat wanneer de roosterwisselspanning positief is ($t = {}^1/_4\ T$) de wisselstroom ook positief is (stroomtoeneming). Hierdoor wordt de stroom door R_a groter, we krijgen een groter spanningsverlies over R_a en daardoor een kleinere spanning op de anode. Dit wil zeggen, dat dan de wisselspanning op de anode ($U_a{\sim}$) juist in de negatieve helft is, en dat hierdoor de momentele waarde van U_a afneemt ($U_a = U_B - U_a{\sim}$). Door het afnemen van U_a neemt ook de I_a, die oorspronkelijk was toegenomen, weer met een klein bedrag af. We kunnen dit tot uitdrukking brengen door in de formule $U_a{\sim}$ het — teken te geven. Dus:

$$I_a{\sim} = S\,U_g{\sim} - \frac{U_a{\sim}}{R_i}.$$

Als we de versterking willen weten, interesseert ons alleen de verhouding tussen $U_a{\sim}$ en $U_g{\sim}$. We zullen dus proberen $I_a{\sim}$ uit de vergelijking te laten verdwijnen. Wij kunnen dat doen, omdat we nog iets anders van $I_a{\sim}$ weten, nl. als we de wet van Ohm

toepassen op R_a, dan is $i_a\,I_a{\sim} = \dfrac{U_a{\sim}}{R_a}$. Dit is dezelfde wisselstroom als in bovenstaande formule, zodat we mogen schrijven:

$$\frac{U_a{\sim}}{R_a} = S\,U_g{\sim} - \frac{U_a{\sim}}{R_i}.$$

Hierin komen nog alleen de bekende grootheden voor S, R_i en R_a en verder $U_a{\sim}$ en $U_g{\sim}$. Door enkele algebraïsche bewerkingen zullen we nu proberen $\dfrac{U_a{\sim}}{U_g{\sim}}$ te vinden.

(1) $\dfrac{U_a{\sim}}{R_a} = S\,U_g{\sim} - \dfrac{U_a{\sim}}{R_i}$; (2) $\dfrac{U_a{\sim}}{R_a} + \dfrac{U_a{\sim}}{R_i} = S\,U_g{\sim}$;

(3) $U_g{\sim}\left(\dfrac{1}{R_a} + \dfrac{1}{R_i}\right) = S\,U_g{\sim}$; dus: $\dfrac{U_a{\sim}}{U_g{\sim}} = S \cdot \dfrac{1}{\dfrac{1}{R_a} + \dfrac{1}{R_i}}$

Voordat we verder gaan zullen we eerst de factor $\dfrac{1}{R_a} + \dfrac{1}{R_i}$ eens nader bekijken. In deel I der V.E.V.-handleiding hebben we gezien, dat wanneer 2 weerstanden parallel worden geschakeld de vervangingsweerstand kan worden gevonden uit de formule: $\dfrac{1}{R_v} = \dfrac{1}{R_1} + \dfrac{1}{R_2}$. Passen we dat toe op ons geval, dan mogen we schrijven $\dfrac{1}{R_v} = \dfrac{1}{R_a} + \dfrac{1}{R_i}$, waarbij R_v dan de vervangingsweerstand is voor de parallelschakeling van R en R_a.

Dus: $\dfrac{U_a{\sim}}{U_g{\sim}} = S\,\dfrac{1}{\dfrac{1}{R_a} + \dfrac{1}{R_i}} = S\,\dfrac{1}{\dfrac{1}{R_v}} = S\,R_v$

zodat: $\boxed{\dfrac{U_a{\sim}}{U_g{\sim}} = S\,R_v}$

Ondanks het ingewikkelde begin vinden we dus voor de versterking een buitengewoon eenvoudige formule.

Voorbeeld

Van een triode is gegeven, dat in het werkpunt: $S = 2$ mA/V, $\mu = 50$, $R_i = 25\,000\ \Omega$.

De belastingsweerstand is 0,1 M Ω.

Gevraagd: de versterking.

Uitwerking

We berekenen eerst de vervangingsweerstand R_v. Hiervoor is het mogelijk $\frac{1}{R_v} = \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_i}$ te gebruiken. Dat geeft ons:

$$\frac{1}{R_v} = \frac{1}{100\,000} + \frac{1}{25\,000} = \frac{1}{100\,000} + \frac{4}{100\,000} = \frac{5}{100\,000} = \frac{1}{20\,000}.$$

Dus $R_v = 20\,000\ \Omega$. De steilheid $= 2$ mA/V. In onze formule wordt dit 0,002 A/V en de versterking is:

$$\frac{U_a^{\sim}}{U_g^{\sim}} = 0{,}002 \times 20\,000 = 40.$$

Omdat de parallelschakeling van weerstanden zo buitengewoon belangrijk is, willen we daar nog even iets over zeggen. In de eerste plaats is R_v steeds kleiner dan de kleinste van de parallelgeschakelde weerstanden. In de tweede plaats kan het dikwijls voorkomen, dat één van de parallelgeschakelde weerstanden vrij klein is ten opzichte van de andere (b.v. 10 × zo klein). We maken dan maar een zeer kleine fout wanneer we zeggen, dat R_v gelijk is aan de kleinste weerstand. Dit is dikwijls zeer eenvoudig te zien als men even een figuurtje tekent volgens fig. XI-28. Vooral wanneer men millimeter-papier bij de hand heeft is dit zeer eenvoudig. Men zet een lijn a—b uit. De afstand a—b kan men willekeurig kiezen. Men trekt in a en b een loodlijn en past daaropde weerstanden, precies schaal, af. Daarna trekt men de elkaar snijdende lijnen. De afstand van het snijpunt (S) tot de lijn a—b (loodlijn van S op a—b) is dan R_v. In fig. XI-28 is dit gedaan voor het hierboven behandelde voorbeeld, waarbij $R_a = 100\,000\ \Omega$ en $R_i = 25\,000\ \Omega$. Ook in de figuur vinden we dat $R_v = 20\,000\ \Omega$.

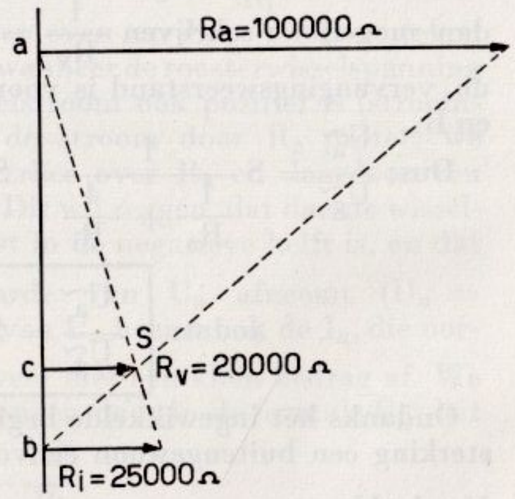


Fig. XI-28

De versterking is zo groot mogelijk wanneer R_v zo groot

mogelijk is. Kijken we nog even naar fig. XI-28, dan zien we dat R_v groter wordt naarmate R_a groter wordt, maar wanneer R_a al 4 tot 5 × zo groot is als R_i schieten we niet erg hard op door R_a nòg veel groter te maken. De maximale versterking, die we zouden kunnen krijgen, treedt op wanneer R_a zo groot is dat $R_v = I\sim$. In formule:

$$\left(\frac{U_a^{\sim}}{U_g^{\sim}}\right)_{max} = S\,R_i.$$

Nu is echter $S\,R_i = \mu$, zodat de versterking nooit groter kan zijn dan μ, de versterkingsfactor. In bovenstaand voorbeeld kregen we een versterking van 40 ×, terwijl $\mu = 50$.

In het voorbeeld is opgegeven, dat de waarden van S, R_i en μ gelden *in het werkpunt*. Nu weten we uit § 9, dat het werkpunt afhankelijk is van de belastingsweerstand. Verhoging van de belastingsweerstand kan dus tengevolge hebben, dat we in een punt van de karakteristiek terecht komen, waar S en R_i een ongunstiger waarde hebben dan te voren. Hierdoor wordt de versterking dan natuurlijk niet zo groot als we tengevolge van de vergroting van de belastingsweerstand in de versterkingsformule zouden verwachten!

Opgaven

19. Gegeven de triode uit het voorbeeld in deze paragraaf.
    a. Bepaal grafisch R_v voor de volgende waarden van R_a: 10 000 Ω, 25 000 Ω, 50 000 Ω, 0,1 MΩ, 0,2 MΩ.
    Teken de grafiek zo dat 10 000 Ω = 1 cm. (Potlood met scherpe punt gebruiken!)
    b. Bereken de versterking voor elk van deze waarden van R_a, waarbij we veronderstellen, dat het werkpunt *niet* verandert.
    c. Teken een grafische voorstelling van de versterking. Op de horizontale as de waarde van $\frac{R_a}{R_i}$ afzetten, zodanig dat een schaalwaarde van 2,5 cm overeenkomt met $\frac{R_a}{R_g} = 1$. Op de vertiale as zetten we de versterking zodanig, dat een versterking van 10 × overeenkomt met 2 cm.
20. Gebruik de gegevens van opgave 18.
    a. Bepaal uit de grafiek S en R_i voor $U_g = -2$ V, $U_B = 250$ V en $R_a = 20\,000\ \Omega$. Bereken de versterking met deze gegevens.

b. Doe hetzelfde voor $R_a = 50\,000\ \Omega$ (U_g en U_B blijven resp. — 2 V en 250 V), dus eerst werkpunt bepalen, vervolgens S en R_i en tenslotte versterking berekenen.

§ 11. Schermroosterbuizen

Ofschoon we in de vorige paragrafen steeds van de triode-karakteristieken zijn uitgegaan, komt de penthode in elektronische schakelingen ook voor. De penthode behoort tot de *schermroosterbuizen*. Deze buizen hebben een rooster, dat de anode afschermt van de rest van de buis. De penthoden hebben

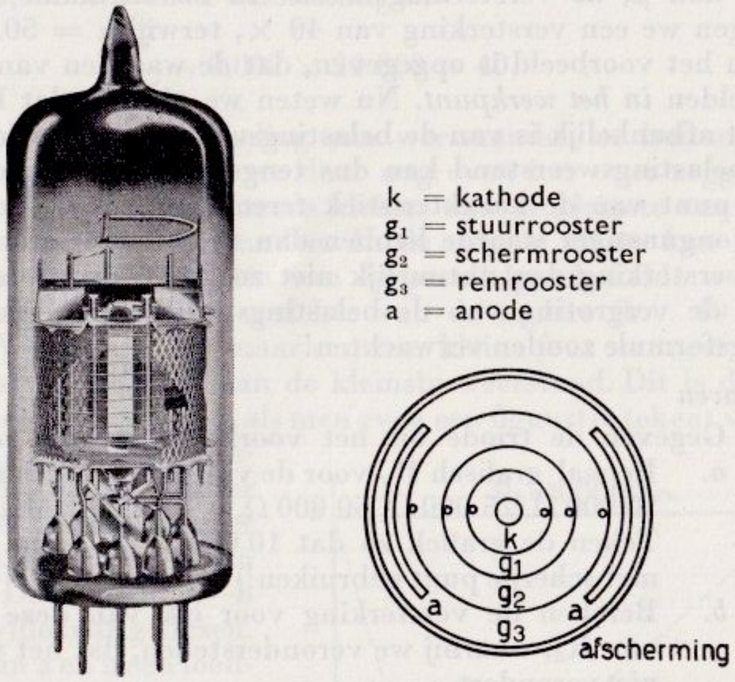


Fig. XI-29

behalve dit *schermrooster* ook nog een z.g. *remrooster*. Al deze roosters hebben de vorm van een cilindrische veer, die concentrisch zijn opgesteld, zoals te zien is in fig. XI-29.

Het oorspronkelijke rooster, zoals we dat bij de triode hebben leren kennen, blijft dienen om de stroomvariaties (wisselstroom) in de gelijkstroom, welke door de buis vloeit, te veroorzaken. Om het van de andere roosters te onderscheiden, noemen we dit het *stuurrooster* (g_1).

Als we willen nagaan, wat de invloed van het schermrooster op de verschillende eigenschappen van de buis is, kunnen we het beste uitgaan van een formule uit § 10, nl.:

$$I_a = S\,U_g - \frac{U_a}{R_i}.$$

Deze formule geeft aan hoe groot de wisselstroom i_a door de buis wordt als er een wisselspanning U_g op het stuurrooster staat en een wisselspanning U_a op de anode. Verder weten we, dat bij een normale versterkbuis steeds U_g en U_a tegelijkertijd aanwezig zijn, omdat U_a immers door de versterking ontstaat. We weten echter ook, dat de invloed van U_a op de anodewisselstroom ongunstig is, omdat $\frac{U_a}{R_i}$ moet worden afgetrokken van $S\,U_g$.

Door nu een schermrooster te leggen tussen de anode van de buis en de kathode kan men de invloed, die de anodespanning op de anodestroom heeft, aanzienlijk verminderen. In de formule wordt nu dus $\frac{U_a}{R_i}$ klein ten opzichte van $S\,U_g$, zodat we voor penthoden gewoonlijk mogen schrijven $I_a = S\,U_g$. We maken dan wel een kleine fout, maar dat is voor ons doel gewoonlijk niet zo belangrijk. Dit geeft ons tegelijkertijd een zeer eenvoudige formule voor versterking. Immers de versterkte spanning $U_g = I_a R_a = S\,U_g R_a$; de versterking: $\frac{U_a}{U_g} = S\,R_a$.

Indien de anodebelasting bestaat uit een willekeurige impedantie Z_a geldt ook algemeen: $\frac{U_a}{U_g} = S\,Z_a$

De verhouding $\frac{U_a}{U_g}$, die de spanningsversterking van een versterkertrap genoemd wordt, zien we dikwijls aangeduid met μ', zodat we kunnen schrijven:

$$\boxed{\mu' = \frac{U_a}{U_g} = S\,Z_a}$$

Door de werking van het schermrooster wordt R_i groot. Nu hebben we indertijd gezien (§ 5), dat $R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}$ bij constante U_g. Als nu door de afschermende werking van het schermrooster de invloed van de anodespanning op de anodestroom

gering wordt, wil dat zeggen, dat bij een bepaalde anodespanningsverandering slechts een zeer kleine stroomverandering optreedt. Als dus ΔI_a zeer klein is, wordt R_i zeer groot. Zo is b.v. voor vele penthoden $R_i = 1$ megohm. Dat wil dus zeggen, dat bij een ΔU_a van 1 volt een ΔI_a van 1 micro-ampère hoort.

Ook voor de versterkingsfactor μ geldt iets dergelijks. Immers volgens § 7 is $\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_g}$, d.w.z. de verhouding tussen de ΔU_a, die nodig is om een bepaalde kleine stroomverandering te veroorzaken en de ΔU_g, die nodig is voor die zelfde stroomverandering.

Hierboven zagen we reeds, dat bij een bepaalde ΔU_a maar een zeer kleine stroomverandering optreedt; als we het omkeren, kunnen we ook zeggen, dat voor een bepaalde stroomverandering een grote ΔU_a nodig is. Als we veronderstellen, dat de invloed van U_g op de stroom dezelfde is gebleven, dan is nu dus ΔU_a zeer groot ten opzichte van ΔU_g, zodat $\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_g}$ ook zeer groot wordt.

En waarde van $\mu = 2\,000$ is voor een penthode niet abnormaal, terwijl een normale triode gewoonlijk niet meer heeft dan $\mu = 30$ tot 60.

Be een R_i van 1 megohm en een μ van 2 000 is de steilheid

$$S = \frac{\mu}{R_i} = \frac{2\,000}{1\,000\,000} = 0{,}002 \text{ A/V} = 2 \text{ mA/V}.$$

Dit is een normale waarde die ook bij trioden kan voorkomen.

Door de werking van het schermrooster worden zowel R_i als μ zeer groot, terwijl over S niets bijzonders te vermelden is. Dit lijkt merkwaardig, omdat we zo juist gezien hebben, dat de versterking gelijk is aan $\frac{U_a\sim}{U_g\sim} = S\,R_a$. Voor de triode geldt volgens § 10: $\frac{U_a\sim}{U_g\sim} = S\,R_v$, waarin R_v de parallelschakeling is van R_i en R_a. Eigenlijk geldt dit ook voor de penthode, maar omdat R_i gewoonlijk zeer groot is ten opzichte van R_a maakt men geen grote fout wanneer men R_i weglaat.

De waarde van R_v kan natuurlijk nooit groter worden dan R_i, maar omdat voor de penthode R_i veel hoger is dan voor de triode, kan bij de penthode R_v een grotere waarde krijgen, en dus ook R_a, waardoor een grotere versterking ontstaat (als S ongeveer dezelfde is).

Voorbeeld

Van een triode is gegeven, dat bij de gebruikte instelling $S = 2$ mA/V, $\mu = 30$ en $R_i = 15\,000$ ohm. De belastingsweerstand $R_a = 0{,}1$ megohm. Wanneer we de triode vervangen door een penthode, die zo ingesteld is dat $S = 2$ mA/V, $\mu = 2\,000$ en $R_i = 1$ megohm, krijgen we een versterking die belangrijk groter is. We gebruiken de formule $\frac{U_a\sim}{U_g\sim} = S\,R_v$.

Voor de triode is $R_v = 15\,000$ ohm parallel aan 100 000 ohm dus $R_v = \frac{R_i \cdot R_a}{R_i + R_a} = \frac{15\,000 \cdot 100\,000}{115\,000} = 13\,000\,\Omega$. Dus $\frac{U_a\sim}{U_g\sim} = 26$.

Doen we ditzelfde voor de penthode, dan wordt:

$$R_v = \frac{1\,000\,000 \times 100\,000}{1\,100\,000} = 91\,000 \text{ ohm}.$$

Dus de versterking $S \times 91000 = 0{,}002 \times 91000 = 182$. $\frac{U_a\sim}{U_g\sim} =$ $S\,R_a$, dan hadden we $0{,}002 \times 100\,000 = 200$ voor de versterking gevonden. De fout, die we met deze vereenvoudigde rekenwijze maken, is dus ca 10%, hetgeen voor dit soort berekeningen in de regel wel toelaatbaar is.

§ 12. Penthodekarakteristieken

Bij de triode hebben we gezien, dat de buis ingesteld kan worden met twee spanningen, nl. U_g en U_a. Bij de penthode zijn dit er drie, nl. U_{g1}, U_{g2} en U_a. Hierbij zullen we steeds veronderstellen, dat het remrooster verbonden is met de kathode.

De karakteristieken moeten dus het verband geven tussen I_a, U_{g1}, U_{g2} en U_a.

Bij de triode namen we de I_a-U_a-karakteristiek op bij een bepaalde vaste roosterspanning. Voor elke andere waarde van de roosterspanning kregen we een andere karakteristiek, die tezamen een karakteristiekenbundel opleverden.

Bij de penthode kunnen we dit ook doen als we voor al deze metingen de schermroosterspanning een bepaalde vaste waarde geven. Wij krijgen dan een karakteristiekenbundel, die geldt voor die ene schermroosterspanning. Voor een andere waarde van de schermroosterspanning zouden we dan weer een andere karakteristiekenbundel krijgen.

Bij elke I_a-U_a-karakteristiek moet dus vermeld staan bij welke U_{g1} en U_{g2} deze is opgenomen. Evenzo moet bij de I_a-U_{g1}-

karakteristiek vermeld staan bij welke U_a en U_{g_2} deze is opgenomen.

Behalve de I_a-U_{g_1}- en de I_a-U_a-karakteristieken kunnen ook nog de schermroosterstroomkarakteristieken worden opgenomen. Deze zijn van belang wanneer een penthode als triode geschakeld wordt maar ook wanneer men wil bepalen hoe groot de schermroosterstroom en de schermroosterspanning worden indien men een weerstand in de schermroosterleiding opneemt (zie hiervoor ook § 9).

§ 13. De I_a-U_a-karakteristieken van de penthode

In § 11 hebben we reeds gezien, dat de invloed van de anodespanning op de anodestroom vrij gering is. De sterkte van de stroom wordt hoofdzakelijk bepaald door de schermroosterspanning. Dit wil dus zeggen, dat de anodestroom slechts weinig

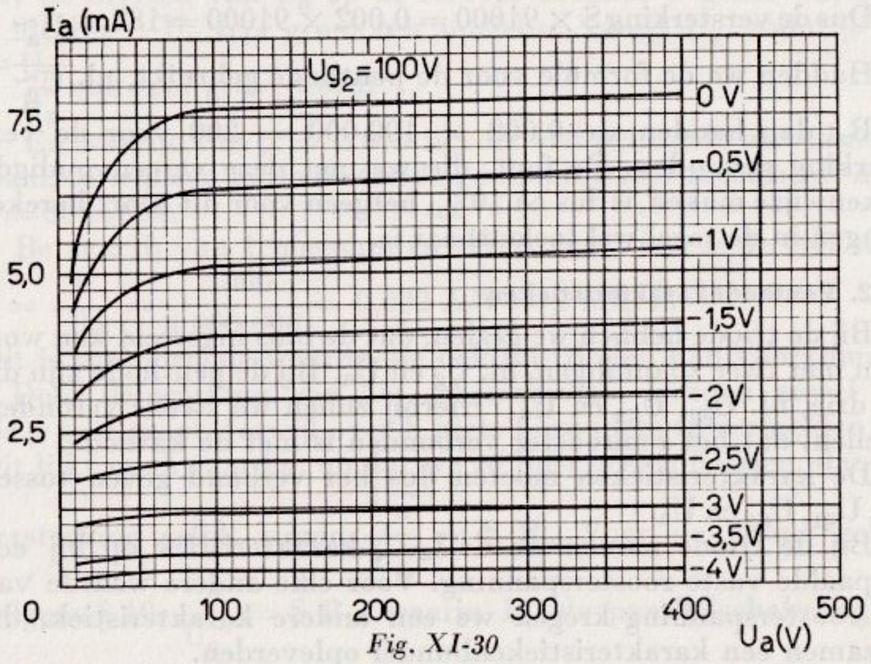


Fig. XI-30

toeneemt als U_a groter wordt. Zou de anodespanning helemaal geen invloed op de stroom hebben, dan zou de I_a-U_a-karakteristiek horizontaal lopen.

In fig. XI-30 zien we de I_a-U_a-karakteristiek van de penthode. Vanaf $U_a = 50$ V lopen de karakteristieken vrijwel recht. Vlak bij 0 volt worden de karakteristieken gewoonlijk niet getekend. De krommen vloeien alle in elkaar en zijn daar van geringe praktische betekenis.

Wanneer we op dezelfde manier als we dat bij de triode hebben gedaan de R_i uit de karakteristieken willen bepalen, stuiten we op praktische moeilijkheden. Zo wordt van de bovengenoemde penthode opgegeven, dat bij $U_a = 200$ V, $U_{g_2} = 100$ V en $U_{g_1} = -2$ V geldt: $R_i = 2$ MΩ. Nu is $R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} =$ 2 000 000 ohm. Nemen we $\Delta U_a = 200$ V, dan moet ΔI_a worden: $\frac{200}{2\,000\,000}$ A $= 0{,}1$ mA.

Een dergelijke kleine stroomverandering is in de grafiek niet meer af te lezen. Soortgelijke moeilijkheden krijgen we ook bij het meten van de inwendige weerstand van een penthode (zie ook § 5). Dit moet dus met zeer nauwkeurige instrumenten gebeuren.

Toch kan men uit de karakteristieken belangrijke conclusies trekken. Dit laatste gebeurt op dezelfde wijze als dat voor de triode is behandeld. Indien we bijvoorbeeld eens aannemen, dat we een anodeweerstand aanbrengen van 0,1 MΩ, terwijl we een U_B van 250 V hebben, dan loopt de belastingslijn van het punt 0 volt, 2,5 mA naar het punt 0 mA, 250 volt. Duidelijk zien we dan uit de karakteristiek, dat we in dit geval beslist geen U_{g_1} van — 2 volt moeten kiezen. Nemen we $U_{g_1} =$ — 3 volt, dan ziet het er beter uit, als we tenminste geen te grote wisselspanning op het stuurrooster hebben.

Natuurlijk speelt hier de schermroosterspanning ook een belangrijke rol. Wordt deze verhoogd, dan komen alle karakteristieken hoger te liggen (grotere I_a), wordt deze verlaagd, dan worden ze als het ware in elkaar gedrukt. Dit heeft natuurlijk ook invloed op het werkpunt, de vervorming enz.

Het spreekt wel vanzelf, dat het zeer moeilijk is om alle waarden zodanig te kiezen, dat de gunstigste toestand voor een bepaald geval wordt bereikt. Gewoonlijk worden door de buizenfabrikanten bepaalde instellingen aanbevolen, waaruit een keuze kan worden gemaakt. Toch is het noodzakelijk te weten wat er ongeveer gebeurt, wanneer van de aanbevolen waarden wordt afgeweken of wanneer door een fout de juiste waarden niet meer aanwezig zijn. In verband hiermede is een juist inzicht in de werking van de buizen en de karakteristieken onontbeerlijk.

§ 14. De I_a-U_{g1}-karakteristieken van een penthode

Bij de triode kregen we voor elke anodespanning een andere I_a-U_g-kromme. In beginsel is dat ook bij de penthode het geval,

maar in de praktijk komt daar niet veel van terecht, omdat immers de anodespanning slechts een zeer geringe invloed op I_a heeft. Hierdoor vallen alle krommen ongeveer op elkaar, zodat er eigenlijk maar één I_a-U_{g_1}-karakteristiek te tekenen is.

In fig. 31 zien we deze getekend. De karakteristiek geldt voor $U_{g_2} = 100$ V en $U_a = 100$ tot 250 V.

Wel zouden we voor elke waarde van U_{g_2} een andere kromme kunnen tekenen. Overigens is de gedaante van de I_a-U_{g_1}-karak-

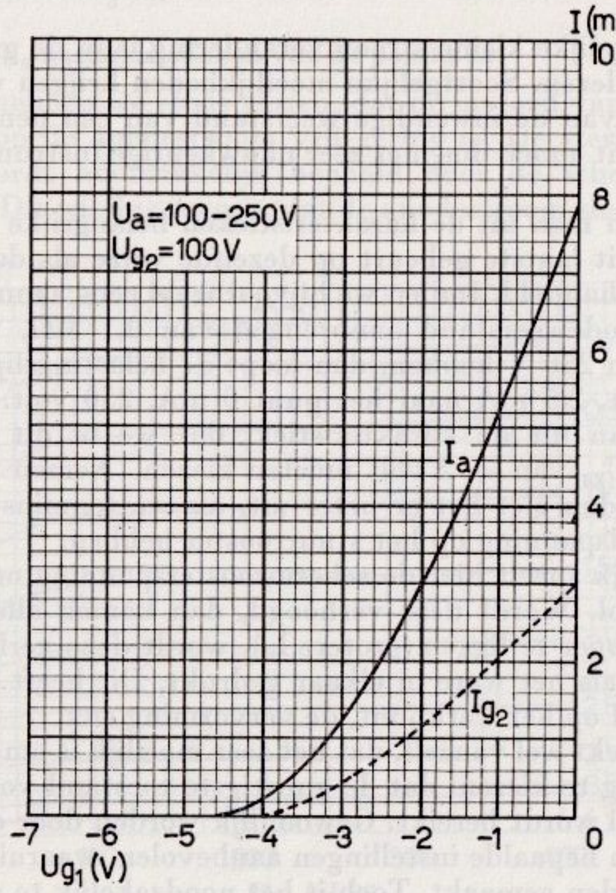


Fig. XI-31

teristiek vrijwel gelijk aan die van een triode. De steilheid S is op dezelfde wijze te bepalen door in het werkpunt een raaklijn aan de kromme te trekken. De versterkingsfactor kunnen we hieruit natuurlijk niet aflezen. In fig. XI-31 is tevens de kromme (I_{g_2}—U_{g_1}) voor de schermroosterstroom getekend. Duidelijk blijkt, dat deze slechts een gedeelte van I_a is (ongeveer 3/8).

Opgaven

21. Bepaal met behulp van de I_a-U_a-karakteristiek van fig. XI-30 de I_a-U_{g_1}-karakteristiek voor een anodespanning van 50 volt, en teken deze in fig. XI-31. Waarom valt *deze* kromme niet samen met die voor $U_a = 100$ tot 250 V?
22. Bepaal uit fig. XI-31 de steilheid bij $U_{g_1} = -2$ volt. Doe dit ook voor de geconstrueerde kromme bij $U_a = 50$ V.
23. Construeer de I_a-U_{g_1}-kromme voor de reeds genoemde penthode, wanneer deze wordt geschakeld als triode, als $U_a = U_{g_2} = 100$ volt. Hoe groot wordt dan S bij $U_{g_1} = -2$ volt?

§ 15. Het verkrijgen van de negatieve roosterspanning

Voor de juiste werking van een versterkerbuis is het noodzakelijk, dat het stuurrooster op een bepaalde negatieve spanning t.o.v. de kathode wordt gehouden. Zoals bekend, bepaalt het *spanningsniveau* van het stuurrooster de grootte van de anodestroom. Door dit negatieve potentiaal kan het stuurrooster geen stroom opnemen, zodat het stuurroostercircuit stroomloos is.

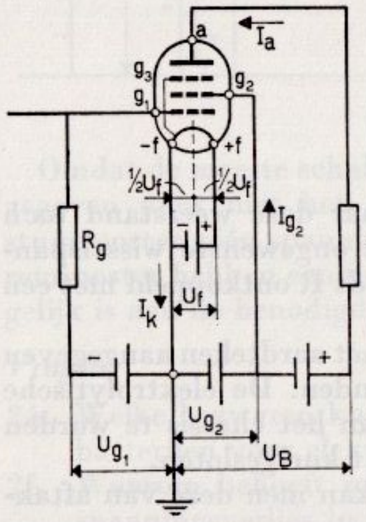


Fig. XI-32

We kunnen de voorgeschreven negatieve roosterspanning (afgekort n.r.sp.) uit een afzonderlijke kleine batterij betrekken, of, zoals bij batterij-ontvangers meestal plaats vindt, van een aftakking op de anode-batterij, zie fig. XI-32. Uit deze fig. zien we tevens, dat het niet onverschillig is, aan welke zijde van de gloeidraad de roosterspanningsbatterij verbonden wordt, daar het halve spanningsverlies over de direct verhitte gloeidraad bij de n.r.sp. moet worden opgeteld of afgetrokken, afhankelijk van de wijze waarop de gloeistroombatterij wordt aangesloten. Bij de aansluiting van de gloeidraden en de gloeistroombatterij in batterij-ontvangers moet men hierop letten. In de buizentabellen worden daarom ook de gloeistroomaansluitingen met plus en min gemerkt, mede met het oog op eventueel reeds inwendig doorverbonden elektroden, b.v. het remrooster.

In plaats van een batterij ter verkrijging van de n.r.sp., kan men ook het spanningsverlies over een weerstand benutten.

In fig. XI-33 is een weerstand R in de minleiding van het p.s.a. opgenomen. Deze weerstand wordt doorlopen door de totale stroom die het toestel opneemt. De spanning, die hierdoor aan deze weerstand ontstaat, wordt via de lekweerstand R_g aan het stuurrooster gelegd. De grootte van de n.r.sp. wordt nu bepaald door de waarde van R, en de stroom door deze weerstand. De

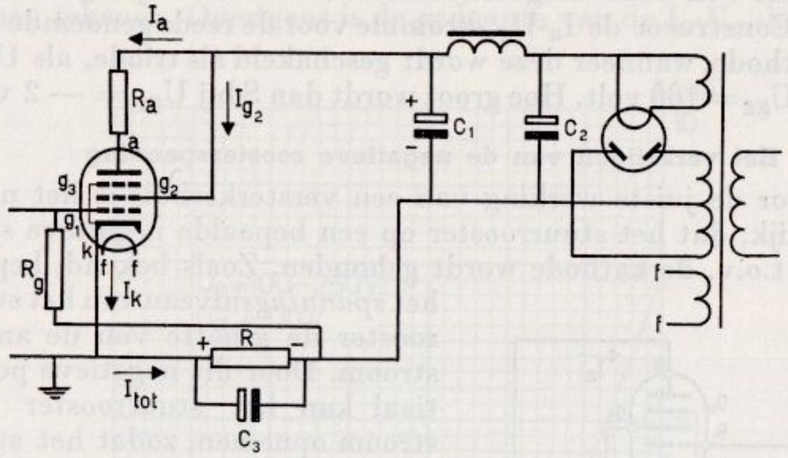


Fig. XI-33

waarde van R_g is niet belangrijk, daar deze weerstand toch stroomloos is. Om te voorkomen, dat ongewenste wisselspanningen op het stuurrooster komen, wordt R ontkoppeld met een grote condensator C_3, b.v. 50 à 100 μF.

Meestal zal de schakeling op de met het aardteken aangegeven plaats met het chassis worden verbonden. De elektrolytische condensatoren C_1 en C_2 dienen dan van het chassis te worden geïsoleerd, daar anders de n.r.sp. wordt kortgesloten.

Heeft men meer n.r.sp. nodig, dan kan men deze van aftakkingen op R afnemen.

In fig. XI-34 is de weerstand R uit fig. XI-33 verplaatst naar de kathodeleiding van de buis. (R_k in fig. XI-34). Deze kathodeweerstand wordt nu doorlopen door de som van I_a en I_{g_2}. Hierbij wordt de kathodezijde van deze weerstand positief, de andere zijde, die via de lekweerstand R_g met het stuurrooster is verbonden, negatief. Het stuurrooster krijgt dus een negatieve potentiaal t.o.v. de kathode, die gelijk is aan het spanningsverlies in R_k.

De grootte van de n.r.sp. is gelijk aan

$$U_k = I_k \times R_k$$

of, omdat $U_{g1} = U_k$ en $I_k = I_a + I_{g_2}$

$$U_{g1} = (I_a + I_{g_2})\, R_k$$

Ook in dit geval wordt R_k normaal overbrugd met een grote condensator, om te voorkomen, dat wisselspanning, afkomstig van R_k, op het stuurrooster van de buis komt.

Merk op, dat het remrooster g_3 geen spanning t.o.v. de kathode heeft, dus $U_{g3} = 0$ V.

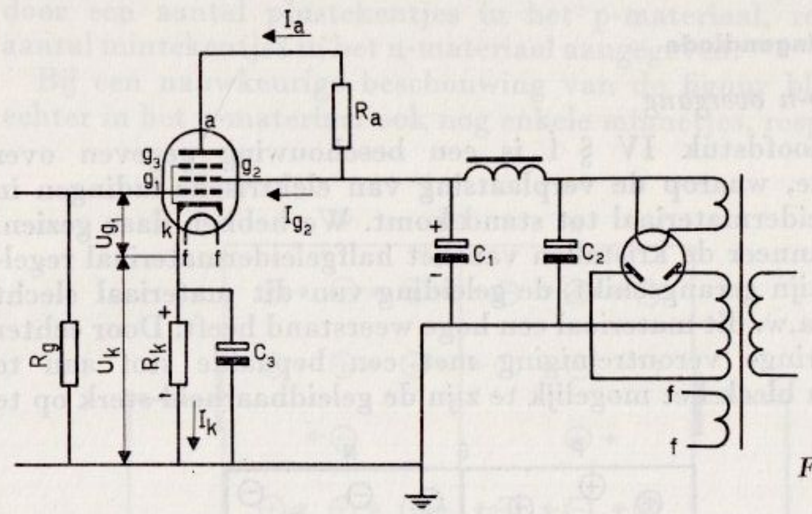


Fig. XI-34

Omdat de meeste schakelingen op het met het aardteken aangegeven punt met het chassis worden verbonden, heeft het stuurrooster géén spanning t.o.v. het chassis, de kathode en het remrooster hebben een positieve spanning t.o.v. het chassis, die gelijk is aan de benodigde n.r.sp.

Vragen:

24. Welke bezwaren kunt U opnoemen tegen het gebruik van batterijen voor elektronische toestellen?
25. Waarom behoeft men geen rekening te houden met een spanningsverlies in de roosterlekweerstand?
26. Bereken voor een penthode eindbuis de waarde van de n.r.sp. als gegeven zijn: $U_B = 270$ V, $R_k = 400$ ohm, $I_a = 48$ mA, $I_{g_2} = 12$ mA, en de gelijkstroomweerstand van $R_a = 200$ ohm (zie fig. 34).
27. Hoe groot is de anodespanning in het vorige vraagstuk?
28. Hoe groot is de schermroosterspanning in vraag 26?
29. Hoe groot is de remroosterspanning in vraag 26?
30. Hoe groot is de gelijkspanning tussen gloeidraad en kathode in fig. XI-34, aannemende, dat één zijde van het gloeidraadcircuit met het chassis is verbonden? Zelfde gegevens als in vraag 26.

HOOFDSTUK XII

HALFGELEIDERDIODEN EN TRANSISTOREN

§ 1. De lagendiode

a. De p-n overgang

In hoofdstuk IV § 1 is een beschouwing gegeven over de wijze, waarop de verplaatsing van elektrische ladingen in halfgeleidermateriaal tot stand komt. We hebben daar gezien, dat, wanneer de kristallen van het halfgeleidermateriaal regelmatig zijn gerangschikt, de geleiding van dit materiaal slecht is of m.a.w. dit materiaal een hoge weerstand heeft. Door echter een geringe verontreiniging met een bepaalde stof aan te brengen bleek het mogelijk te zijn de geleidbaarheid sterk op te

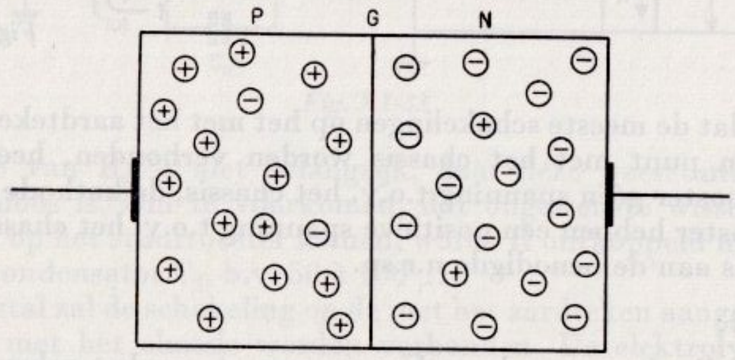


Fig. XII-1

voeren, waarbij de aard van de verontreinigende stof bepaalt, op welke manier deze geleiding tot stand komt. Bij verontreiniging door donors (b.v. arsenicum bij germanium) bleek de geleiding (het transport van de elektrische ladingen) hoofdzakelijk door elektronen te worden bewerkstelligd, (geleiding in n-materiaal) en bij verontreiniging door acceptoren (b.v. indium) vindt geleiding plaats door transport via positieve ladingen (gaten).

Lees deze paragraaf nog eens zorgvuldig na. Deze theorie hebben we nl. nodig om de halfgeleiderdiode te kunnen begrijpen.

Stellen we ons nl. voor een plaatje halfgeleidermateriaal (b.v. germanium), dat voor een deel bestaat uit p-materiaal (dus

germanium, dat acceptors bevat) en voor de rest uit n-materiaal (donors) (fig. XII-1).

Dit betekent, dat in het deel met p-materiaal dus een aantal vrije positieve ladingen en in het deel met n-materiaal een aantal vrije negatieve ladingen rondzweeft. In de figuur is dit door een aantal plustekentjes in het p-materiaal, resp. een aantal mintekentjes in het n-materiaal aangegeven.

Bij een nauwkeurige beschouwing van de figuur blijken er echter in het p-materiaal ook nog enkele minnetjes, resp. in het

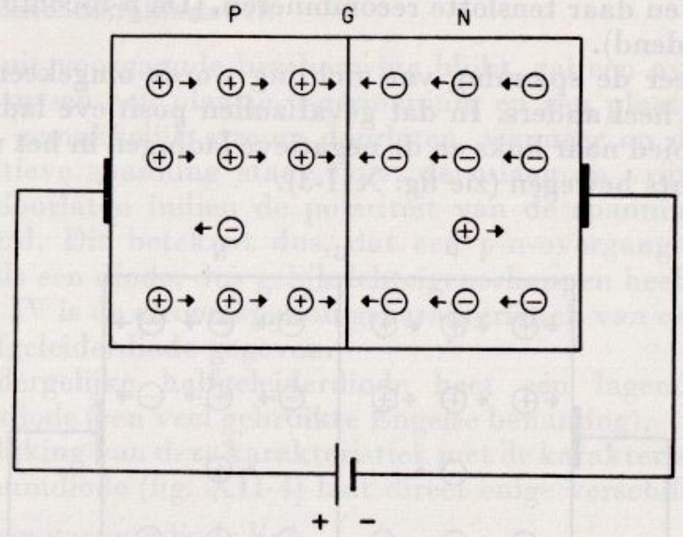


Fig. XII-2

n-materiaal enkele plusjes aanwezig te zijn. Deze ontstaan door verwarming of lichtinval van buitenaf.

Wat gebeurt er nu wanneer er op deze p-n-plaatjes een spanning wordt aangesloten? Laten we hiertoe eerst eens nagaan, wat er gebeurt, indien op de p-plaat een positieve spanning t.o.v. de n-plaat wordt aangelegd (zie fig. XII-2).

Onder invloed van deze spanning zullen alle gaten naar rechts gaan bewegen (worden door de positieve spanning afgestoten) en zullen alle elektronen zich naar links willen verplaatsen. Dit betekent, dat de gaten in het p-materiaal zich naar de grenslaag G zullen willen verplaatsen. Hetzelfde geldt voor de elektronen in het n-materiaal.

Nu vindt er iets belangrijks plaats. Wanneer nl. een elektron

en een gat elkaar in deze grenslaag ontmoeten is de kans heel groot, dat dit elektron „in dit gat valt", waardoor dus zowel het gat als het elektron is „verdwenen". In feite zullen beide elkaar door hun tegengestelde ladingen neutraliseren. Dit verschijnsel heet: *recombinatie.*

Het verdwijnen van het gat uit de p-laag en het elektron uit de n-laag maakt het vanzelfsprekend noodzakelijk dat beide tekorten weer worden aangevuld. Dit gebeurt door de batterij.

Zo zal dus in deze p-n-combinatie een stroom gaan vloeien, die wordt onderhouden, doordat de gaten in het p-gebied en de elektronen in het n-gebied zich naar de grenslaag zullen verplaatsen en daar tenslotte recombineren. (De p-n-combinatie is dus geleidend).

Wanneer de spanning van richting wordt omgekeerd, is de toestand heel anders. In dat geval zullen positieve ladingen in het p-gebied naar links en de negatieve ladingen in het n-gebied naar rechts bewegen (zie fig. XII-3).

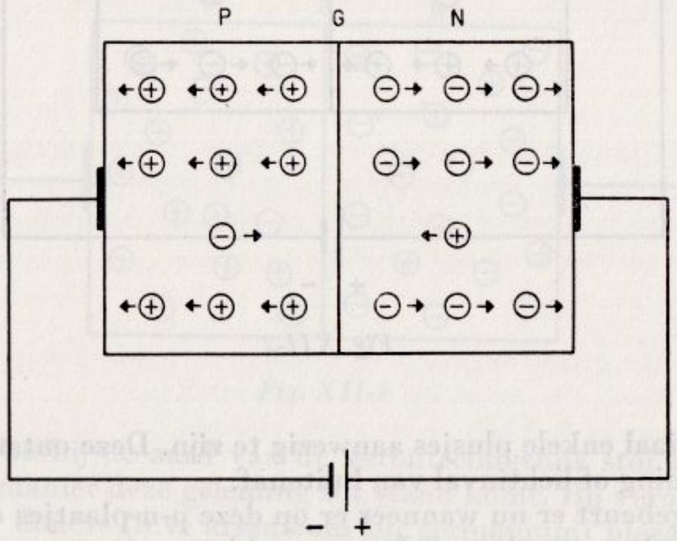


Fig. XII-3

Dit betekent dus, dat de elektronen en de gaten zich van de grenslaag af bewegen. In dit geval is er geen recombinatie in de grenslaag en dus ook geen stroomdoorgang. Als we echter een nauwkeurige meting doen aan een dergelijke p-n-overgang, waarbij op de p-laag een negatieve spanning staat t.o.v. de n-laag, zullen we toch nog een kleine stroom meten (zie fig. XII-3).

Dit komt, zoals het hiervoor ook al eens is gezegd, door het

kleine aantal elektronen dat steeds in het p-laagje en het kleine aantal positieve ladingen dat steeds in het n-gebied aanwezig is. Deze elektronen en gaten zullen zich nl. op precies dezelfde manier gedragen als de elektronen in het n-gebied en gaten in het p-gebied in het geval dat op de p-laag een positieve spanning staat. M.a.w. er zal een (hoewel zeer kleine) stroom vloeien.

Aangezien deze enkele elektronen en gaten ontstaan onder invloed van warmte- of lichtinval van buitenaf, is deze „lek"-stroom sterk afhankelijk van de temperatuur en van het op de halfgeleider vallende licht.

§ 2. Gelijkrichtkarakteristiek

Zoals uit voorgaande beschouwing blijkt, zal een overgangscontact tussen een plaatje p-germanium en een plaatje n-germanium gemakkelijk stroom doorlaten, wanneer op de p-laag een positieve spanning staat t.o.v. de n-laag en vrijwel geen stroom doorlaten indien de polariteit van de spanning wordt omgekeerd. Dit betekent dus, dat een p-n-overgang zich gedraagt als een diode, dus gelijkrichteigenschappen heeft. In fig. 6, hfdst. IV is de stroomspanningskarakteristiek van een dergelijke halfgeleiderdiode gegeven.

Een dergelijke halfgeleiderdiode heet een lagendiode of junctiondiode (een veel gebruikte Engelse benaming).

Vergelijking van deze karakteristiek met de karakteristiek van een vacuumdiode (fig. XII-4) laat direct enige verschillen zien:

a. bij een vacuumdiode ligt het punt waarbij de stroom 0 is bij een kleine negatieve spanning; dus bij $U_d = 0$ zal nog steeds 'n kleine stroom vloeien.
b. bij een grote negatieve spanning zal de vacuumdiode absoluut geen stroom trekken; bij de halfgeleiderdiode zal er ook bij een negatieve spanning (in het z.g. spergebied) een (zeer klein) stroompje vloeien;
c. bij zeer grote negatieve spanningen neemt de lekstroom sterk toe en kan zo groot worden, dat bij de lagendiode beschadiging optreedt.

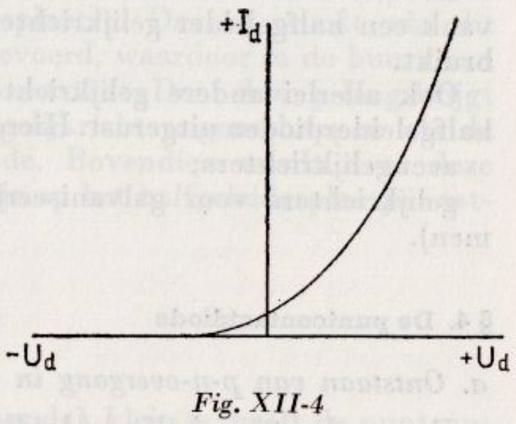


Fig. XII-4

§ 3. Toepassingen

Het toepassingsgebied van de halfgeleider-lagendiode breidt zich steeds meer uit. Deze snelle groei hangt samen met de dikwijls t.o.v. de buisdiode (ook gasgevulde) zeer gunstige eigenschappen. Enkele van deze eigenschappen zullen we hier noemen:

a. zeer lage weerstand in de geleidingsrichting;
b. ontbreken van gloeidraad voor kathodeverhitting;
c. kleine afmetingen.

De halfgeleider heeft echter ook nadelen. De drie belangrijkste hiervan zijn:

a. doordat de lekstroom sterk afhankelijk is van de temperatuur mag de diode niet bij hogere temperaturen worden gebruikt dan de door de fabrikant aangegeven waarde;
b. de spanning in de sperrichting mag niet willekeurig hoog worden gekozen omdat de diode dan „doorslaat";
c. de verplaatsing van de ladingen in het halfgeleidermateriaal gaat langzamer dan in een vacuumdiode, dit komt echter bij zeer hoge frequenties pas tot uiting.

Door de typische voordelen van de halfgeleiderdiode ziet men de vacuumdiode en de kwikdampgelijkrichter steeds meer en meer verdrongen worden door de halfgeleiderdiode.

In vele radio- en televisie-ontvangers wordt tegenwoordig vaak een halfgeleider gelijkrichter in het voedingsgedeelte gebruikt.

Ook allerlei andere gelijkrichters worden steeds meer met halfgeleiderdioden uitgerust. Hieronder vallen o.a.:

accugelijkrichters;

gelijkrichters voor galvaniseerinrichtingen (zeer grote stromen).

§ 4. De puntcontactdiode

a. Ontstaan van p-n-overgang in een puntcontactdiode

Een ander type halfgeleiderdiode, dat al een groot toepassingsgebied heeft, is de puntcontactdiode. De puntcontactdiode is eigenlijk al zeer oud. De eerste dioden, die in de radiotechniek werden gebruikt (zelfs al voordat de elektronenbuis bestond) waren eigenlijk puntcontactdioden.

Iedereen kent wel de kristaldetector in z'n oude vorm (zie fig. XII-5), waarbij met een instelstift, waarin een veertje gemonteerd is, de gevoelige plaats op het kristal kan worden opgezocht.

Een moderne puntcontactdiode heeft ongeveer dezelfde constructie. De instelstift is echter verdwenen, de diode is reeds in de fabriek ingesteld. De constructie is als volgt (zie fig. XII-6).

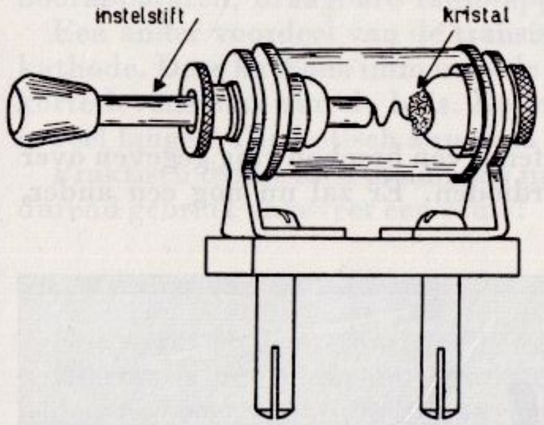


Fig. XII-5

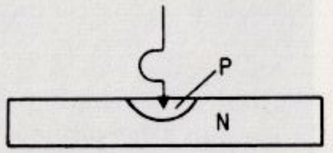


Fig. XII-6

Op een plaatje halfgeleidermateriaal (b.v. n-materiaal) wordt een scherp contactpuntje geplaatst. Daarna wordt via dit draadje een stroomstoot toegevoerd, waardoor in de buurt van de contactplaats een p-laagje ontstaat. Door deze p-laag krijgt deze contactplaats dezelfde gelijkrichtereigenschappen als de p-n-overgang in de lagendiode. Bovendien wordt door deze stroomstoot het contactdraadje op het halfgeleiderplaatje vastgesmolten.

b. Toepassingsgebieden

Doordat het aanrakingsoppervlak klein is, heeft de puntcontactdiode veel betere H.F.-eigenschappen dan de lagendiode (lage eigen capaciteit en kleine looptijd van de elektronen). Speciaal voor deze H.F.-toepassingen zal daarom de puntcontactdiode worden toegepast.

Hier volgen enkele voorbeelden:

a. detector voor signalen tot zeer hoge frequenties;
b. discriminator in FM-ontvangers;
c. videodetector in televisie-ontvangers;
d. mengdiode in radarontvangers.

De lage weerstand in de doorlaatrichting, zoals deze bij de lagendiode aanwezig is, wordt bij de puntcontactdiode niet bereikt. Voor grotere stromen zal deze daarom zelden worden toegepast.

§ 5. Transistoren

Opbouw van de transistor

In de voorgaande paragrafen is een beschouwing gegeven over de werking van halfgeleiderdioden. Er zal nu nog een ander,

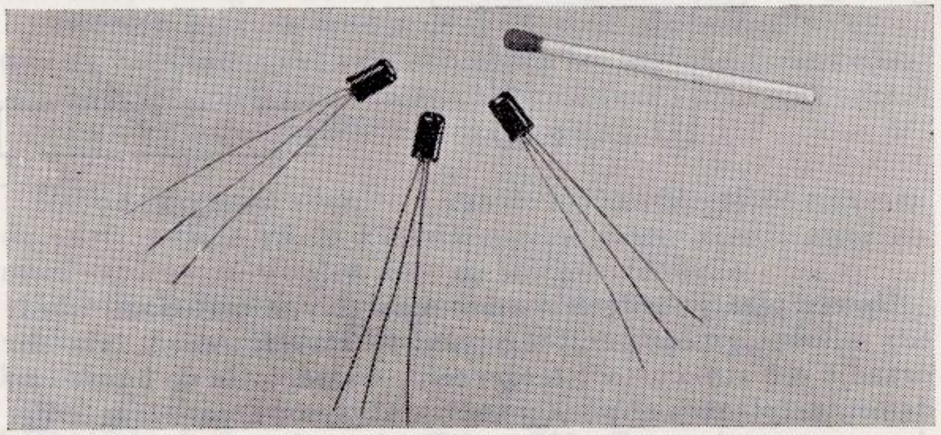


Fig. XII-7

zeer belangrijk en interessant halfgeleiderprodukt worden besproken, dat dusdanige eigenschappen heeft, dat het als versterker kan worden gebruikt. Dit halfgeleiderprodukt heet de *transistor* (deze is in zekere zin te vergelijken met een triode).

Transistoren ziet men de laatste tijd steeds meer toegepast als versterkerelement in plaats van buizen. Als typische voordelen van de transistor t.o.v. de elektronenbuis kunnen we noemen de lage spanningen waarop deze werkt en het ontbreken van een gloeidraad. De kleine afmetingen maken de transistor uitermate geschikt voor gebruik in kleine, lichte apparatuur. Bij voorkeur voert men draagbare apparatuur uit met transistoren,

als dit tenminste mogelijk is. Het kleine voedingsvermogen en de lage spanning vragen slechts uiterst lichte en kleine batterijtjes, waardoor de apparatuur licht blijft. Bij buizenapparaten maken de batterijen immers nog steeds een belangrijk gedeelte van het totale gewicht uit.

Hetzelfde geldt voor de bedrijfskosten. Een batterij is betrekkelijk duur en vermindering van de batterijkosten bij draagbare apparatuur is dus aantrekkelijk.

Zo vindt men de transistor steeds meer en meer toegepast in hoorapparaten, draagbare radio-apparaten enz.

Een ander voordeel van de transistor is het ontbreken van de kathode. Deze kathode immers is de oorzaak van de betrekkelijk korte levensduur van de buis. De levensduur van de transistor is veel langer. Theoretisch kan deze zelfs oneindig lang zijn.

Praktisch denkt men al aan een miljoen uren. Dit is bij voortdurend gebruik ongeveer een eeuw!

§ 6. Werking van de transistor

Hoe werkt nu deze transistor?

Hiertoe is het nodig de theorie over de geleiding in halfgeleiders nog eens in herinnering te roepen. Bestudeer dit nog eens.

Een transistor is eigenlijk niets anders dan een samenstelsel van twee halfgeleiderdioden, die *één* halfgeleiderelektrode gemeenschappelijk hebben (zie fig. XII-8).

De beide dioden zijn in de tekening door I en II aangegeven.

Is de rangschikking van de halfgeleiderlagen zoals in fig. XII-8

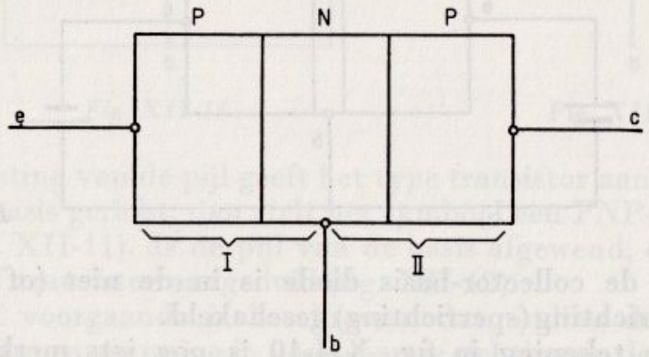


Fig. XII-8

is aangegeven, dan spreken we van een PNP-transistor. Bij een NPN-transistor is de rangschikking van de lagen zoals in fig. XII-9 is gegeven.

De linkerelektrode heet emissor (e), de middelste elektrode heet basis (b) en de rechter elektrode heet collector (c).

We zullen nu aan de hand van een eenvoudige beschouwing trachten enig inzicht te krijgen in het versterkingsmechanisme van de transistor. Een volledige verklaring van alle effecten zal niet worden gegeven. Dit zou veel te ver voeren; het is bovendien ook niet nodig om te kunnen inzien, hoe een transistor kan worden gebruikt als versterker. We beginnen met onze transistor (van b.v. fig. XII-8) aan te sluiten op spanningen, zoals is aangegeven in fig. XII-10.

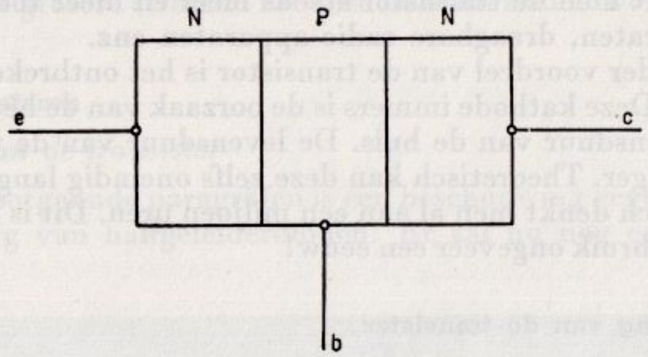


Fig. XII-9

De p-laag, die emissor heet, wordt dus op een positieve spanning t.o.v. de basis aangesloten, de andere p-laag (collector) is op een negatieve spanning aangesloten. De emissor-basis diode is dus in geleidingsrichting (of voorwaartsrichting) ge-

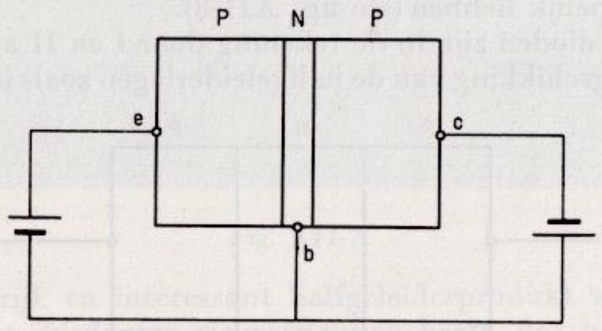


Fig. XII-10

schakeld, de collector-basis diode is in de niet (of slechte)-geleidingsrichting (sperrichting) geschakeld.

Aan de tekening in fig. XII-10 is nog iets merkwaardigs op te merken.

De hier getekende transistor heeft nl. een veel smallere basislaag dan die in fig. XII-9. Om deze smalle basislaag gaat het nu.

Wanneer de positieve ladingen (gaten dus) uit de emissor naar de basis gaan, dan zullen deze gaten niet direct, wanneer

ze de emissor-basis grenslaag zijn gepasseerd, worden gerecombineerd (dus door de in de basis aanwezige elektronen worden opgevangen). De ladingen kunnen nog een eindje in de basis doordringen voordat ze een elektron hebben gevonden dat precies in hun weg ligt en waardoor ze dus worden „opgevangen". Nu is de basis zo dun gemaakt (enkele tientallen micron), dat de meeste gaten nog niet zijn gerecombineerd, wanneer ze de hele basis al zijn gepasseerd. Ze steken dus vrijwel alle over naar de collector. Wanneer ze daar eenmaal aangekomen zijn, zijn ze weer in een p-laag gearriveerd. De negatieve spanning, die op deze p-laag is aangesloten, zal de positieve ladingen van de gaten, die uit de emissor komen, opvangen. De collector laat deze stroom dus wel door.

§ 7. Geaarde basisschakeling van de transistor

We beschouwen nog eens fig. XII-10. Deze is schematisch weergegeven in fig. XII-11; de transistor is hier voorgesteld door zijn symbool, zoals dit in schema's ook wordt gebruikt.

De basis wordt hierbij weergegeven door een dwarsstreepje, de emissor en de collector door twee, in het midden van de basis samen komende lijnen. De emissor wordt van de collector onderscheiden door een pijltje, dat daarop is aangebracht.

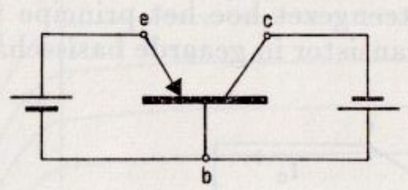


Fig. XII-11

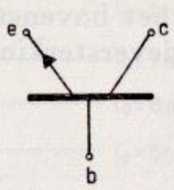


Fig. XII-12

De richting van de pijl geeft het type transistor aan. Is de pijl naar de basis gericht, dan stelt het symbool een PNP-transistor voor (fig. XII-11). Is de pijl van de basis afgewend, dan wordt een NPN transistor aangeduid (fig. XII-12).

In het voorgaande is beschreven, dat, indien de emissor-basis diode een spanning in voorwaartse richting en de collector-basis diode een voorspanning in tegenrichting krijgt, dan zullen de gaten, die uit de emissor komen, vrijwel ongehinderd de basis oversteken, zodat vrijwel alle gaten de collector bereiken.

We noemen dit de stroomversterkingsfactor van de transistor in geaarde basis schakeling (vrijwel 1).

Aangezien nu de weerstand tussen de emissor en basis zeer klein is (emissor in voorwaartse richting) en de weerstand tussen de collector en basis zeer hoog is (collector in sper-richting), zal de energie die uit de transistor komt veel groter zijn dan die er wordt ingestopt, wanneer een kleine wisselstroom in de emissor wordt gestuurd. Immers de stroom, die in de emissor wordt

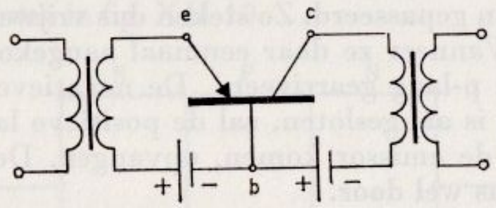


Fig. XII-13

gestuurd, treedt aan de collectorzijde vrijwel onverzwakt weer uit, terwijl de ingangsweerstand klein en de uitgangsweerstand groot is.

In fig. XII-13 is het principe van een versterkerschakeling met een transistor in geaarde basisschakeling gegeven.

Met „geaarde" basisschakeling wordt bedoeld, dat de basis aan het gemeenschappelijke punt van de batterijen ligt. Dit punt wordt dan meestal wel geaard, doch dit is niet altijd nodig.

§ 8. Transistor in geaarde emissorschakeling

In het bovenstaande is uiteengezet hoe het principe van de energieversterking van een transistor in geaarde basisschakeling

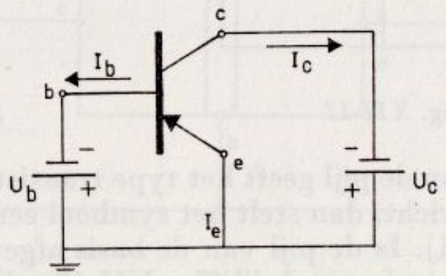


Fig. XII-14

tot stand komt. Toch wordt deze methode van schakelen niet dikwijls gebruikt. Meestal zal een transistor als geaarde emissor worden geschakeld, omdat in dat geval de versterking groter is (fig. XII-14).

Wordt in het geval van de geaarde basis de energieversterking alleen bepaald doordat de ingangsweerstand veel kleiner is dan de uitgangsweerstand, in de geaarde emissorschakeling

treedt bovendien nog een versterking van de stroom op, die groter dan 1 is. Hoe ontstaat deze stroomversterking?

In het voorgaande is reeds aangegeven, dat een groot gedeelte van de emissorstroom in de collector arriveert. Stel dat voor een bepaalde transistor dit bedrag 98% is. Dit betekent, dat wanneer in de emissor van deze transistor een stroom van b.v. 1 000 microampère wordt gestuurd, de collectorstroom 980 microampère zal zijn. Het zal wel duidelijk zijn, dat de rest van de stroom door de basis wegvloeit. De basisstroom is dus 1 000 microampère — 980 microampère = 20 microampère.

Zou men nu omgekeerd in de basis 20 microampère sturen, terwijl de basis-emissor diode en de collector-basis diode de juiste voorspanning hebben, dan zal de collectorstroom 980 microampère zijn. Dit betekent, dat er dus een stroomversterkingsfactor van basis naar collector van 49 aanwezig is.

Ook in de geaarde emissorschakeling zal de ingangsweerstand weer veel lager zijn dan de uitgangsweerstand, zodat de energieversterking betrekkelijk groot zal zijn.

Bij normale lagentransistoren is de versterking 1 000 à 10 000-voudig.

§ 9. Transistorkarakteristieken

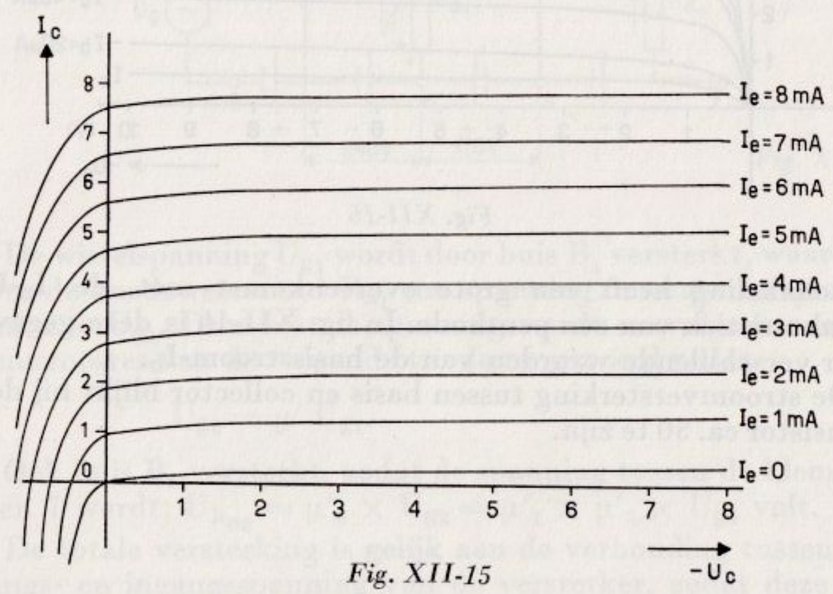


Fig. XII-15

Om de overeenkomst tussen de beide versterkerelementen, nl. de buis en de transistor te demonstreren, zullen van een transistor de I_c-U_c-karakteristiek (te vergelijken met de I_a-U_a-karakteristiek van een buis) worden gegeven.

In fig. XII-15 is de I_c-U_c-karakteristiek van een transistor in geaarde basisschakeling gegeven.

In plaats van een bundel karakteristieken te geven voor een bepaalde waarde van de negatieve roosterspanning, zoals in de I_a-U_a-karakteristieken voor buizen gedaan wordt, geeft men bij transistoren de I_c-U_c-karakteristieken op bij een bepaalde waarde voor de emittorstroom I_e.

Uit deze karakteristiek is duidelijk te zien, dat de stroomversterking vrijwel één is.

De I_c-U_c-karakteristiek van een transistor in geaarde emis-

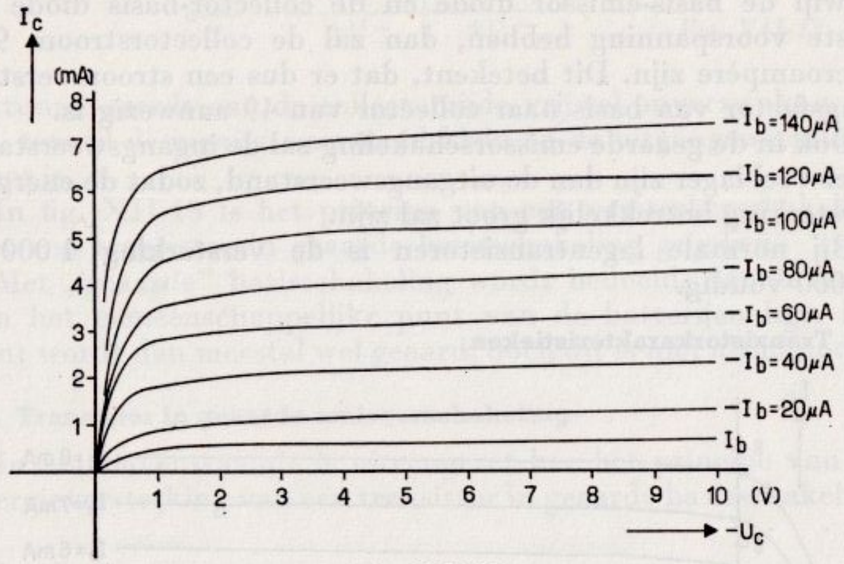


Fig. XII-16

sorschakeling heeft een grote overeenkomst met de I_a-U_a-karakteristiek van een penthode. In fig. XII-16 is deze gegeven voor verschillende waarden van de basisstroom-I_b.

De stroomversterking tussen basis en collector blijkt bij deze transistor ca. 50 te zijn.

HOOFDSTUK XIII

VERSTERKERSCHAKELINGEN MET ELEKTRONENBUIZEN EN TRANSISTOREN

§ 1. Een versterker met twee trioden

Zoals we in hfdst. IX, § 10 hebben gezien, is het mogelijk met behulp van een elektronenbuis wisselspanningen te versterken. Door het toepassen van meer buizen kan deze versterking nog aanzienlijk worden opgevoerd. Een voorbeeld van een dergelijke schakeling is gegeven in fig. XIII-1.

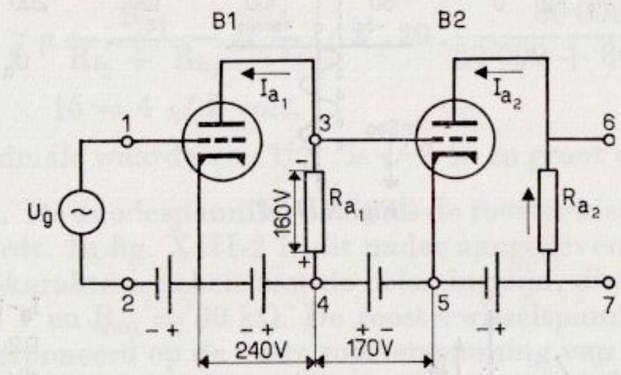


Fig. XIII-1

De wisselspanning U_{g1} wordt door buis B_1 versterkt, waardoor over de anodeweerstand R_{a1} een spanning ontstaat ter grootte van $\mu \times U_{g1}$. Deze laatste spanning wordt vervolgens aan het stuurrooster van de volgende triode toegevoerd zodat

$$U_{g2} = \mu' U_{g1}.$$

Ook buis B_2 versterkt, zodat de spanning tussen de klemmen 6 en 7 wordt: $U_{R_{a2}} = \mu'_2 \times U_{g2} = \mu'_1 \times \mu'_2 \times U_{g1}$ volt.

De totale versterking is gelijk aan de verhouding tussen uitgangs- en ingangsspanning van de versterker, zodat deze hier juist $\mu'_1 \times \mu'_2$ bedraagt. Omdat we hier met het produkt $\mu'_1\mu'_2$ van de versterkingen, verkregen met de afzonderlijke buizen te maken te hebben, kan de totale versterking zeer groot worden.

Om nader te bepalen hoe groot μ'_1 en μ'_2 zijn is het noodzakelijk de karakteristieken en instellingen van B_1 en B_2 nader te beschouwen in de fig. XIII-2 en 3. Hierbij nemen we $R_{a_1} = 80$ kΩ en $R_{a_2} = 6$ kΩ.

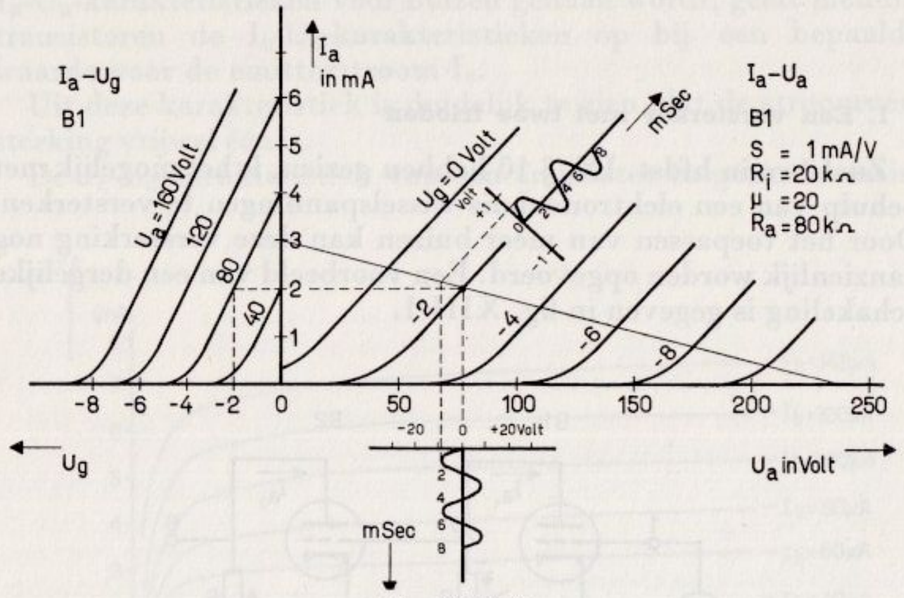


Fig. XIII-2

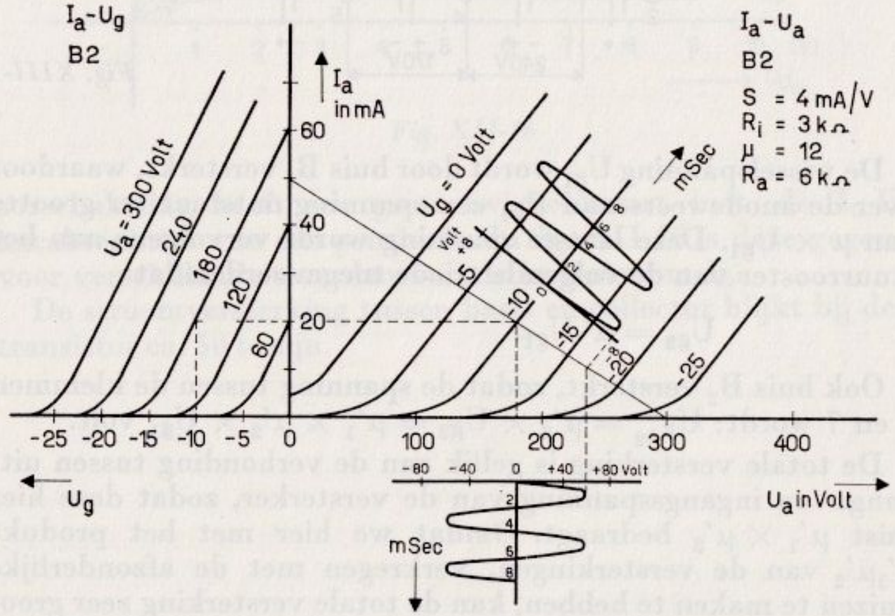


Fig. XIII-3

Uit de formule, die in hfdst. IX, § 11 werd afgeleid, bleek te gelden voor de verhouding $\frac{U_a^{\sim}}{U_g^{\sim}}$:

$$\frac{U_a^{\sim}}{U_g^{\sim}} = S\,R_v \text{ of } U_a^{\sim} = U_g^{\sim}\ S\,R_v = U_g^{\sim}\frac{S\,R_i R_a}{R_i + R_a}.$$

Deze laatste vorm kan door toepassen van de formule van Barkhausen worden vereenvoudigd tot:

$$U_a^{\sim} = U_g^{\sim}\frac{\mu\,R_a}{R_i + R_a}$$

Aan B_1 wordt een wisselspanning met een frequentie van 250 Hz en een effectieve waarde $U_{g_1}^{\sim} = \frac{1}{4}\sqrt{2}$ V (maximale waarde 0,5 V) toegevoerd. Hierdoor ontstaat een wisselspanning over R_{a_1} nl.:

$$U_{R_{a_1}}^{\sim} = U_{g_1}^{\sim}\,\mu\,\frac{R_{a_1}}{R_{i_1} + R_{a_1}} = \frac{1}{4}\sqrt{2}\,.\,20\,.\,\frac{80\,000}{20\,000 + 80\,000} =$$
$$= \frac{1}{4}\sqrt{2} \times 16 = 4\sqrt{2} \text{ volt.}$$

De maximale waarde van $U_{R_{a_1}}^{\sim}$ is $\sqrt{2}\times$ zo groot en bedraagt dus 8 volt. De anodespanning daalt als de roosterwisselspanning groter wordt. In fig. XIII-2 is dit nader aangegeven in de bundel I_a-U_a-karakteristieken met de belastingslijn, die behoort bij $U_a = 240$ V en $R_{a_1} = 80$ kΩ. De roosterwisselspanning is hierbij gesuperponeerd op de vaste roosterspanning van — 2 volt in het werkpunt en wel zo, dat in de eerste kwart periode de anodestroom stijgt. (Een kwart periode van 250 Hz is 1 milliseconde, zie fig. XIII-2.) Omdat nu bij een stijgende anodestroom de anodespanning daalt moeten we dus in de grafische voorstelling van de anodewisselspanning in fig. XIII-2 de eerste kwart periode een negatieve waarde toekennen. Hieruit kunnen we de belangrijke gevolgtrekking maken dat:

Bij weerstandsbelasting van een buis is de anodewisselspanning 180° in fase verschoven ten opzichte van de roosterwisselspanning.

Bezien we nu eens de gelijkspanningen, dan blijkt direct uit fig. XIII-1 (ga dat zelf na) dat punt 4 160 volt positief is ten opzichte van punt 3. Zouden we 3 en 4 zonder meer met een volgende buis verbinden, dan wordt het stuurrooster van B_2 dus sterk positief! Een versterkbuis moet echter met negatieve rooster-

spanningen werken en daarom is tussen punt 4 en de kathode van B_2 (punt 5) een batterij van 170 volt geschakeld, zó, dat U_{g_1} van buis 2 ondanks de positieve spanning over R_{a_1} toch een waarde van — 10 volt krijgt.
De buis B_2 werkt nu in het punt aangegeven in fig. 3 en krijgt als roosterwisselspanning toegevoerd de $U_{\widetilde{R}_{a_1}}$ van buis B_1.

Op dezelfde wijze als voor B_1 werd gevonden, blijkt nu voor de in fig. XIII-2 gegeven waarden de anodewisselspanning van B_2 te bedragen:

$$U_{\widetilde{R}_{a_2}} = U_{\widetilde{R}_{a_1}} \mu_2 \frac{R_{a_2}}{R_{i_2} + R_{a_2}} = 4\sqrt{2} \cdot 12 \cdot \frac{6000}{3000 + 6000} =$$
$$= 4\sqrt{2} \times 8 = 32\sqrt{2} \text{ volt.}$$

De maximale waarde van $U_{\widetilde{R}_{a_2}}$ is dus 64 volt, zoals ook uit fig. 3 kan worden afgelezen. Omdat nu de roosterwisselspanning van B_2 in de eerste kwart periode negatief is, moeten we de anodewisselspanning van B_2 in dit tijdsverloop dus als positief tekenen: $U_{\widetilde{R}_{a_2}}$ en $U_{\widetilde{g}_1}$ zijn dus weer precies in fase !

De totale versterking N in de schakeling van fig. XIII-1 bereikt, is gelijk aan de verhouding van de wisselspanningen tussen de klemmen 6 en 7 en die over de punten 1 en 2. Uit de berekende waarden volgt dus:

$$N = \frac{32\sqrt{2}}{\frac{1}{4}\sqrt{2}} = 128$$

Deze waarde van N moet ook gelijk zijn aan het produkt van de afzonderlijke versterkingen van elke buis of elke z.g. versterktrap nl.:

$$N = \mu'_1 \times \mu'_2 = \mu_1 \cdot \frac{R_{a_1}}{R_{i_1} + R_{a_1}} \times \mu_2 \cdot \frac{R_{a_2}}{R_{i_2} + R_{a_2}} =$$
$$= 16 \times 8 = 128.$$

De toepassing van de besproken schakeling voor het versterken van wisselspanningen is zeer beperkt i.v.m. het grote aantal batterijen of voedingsspanningen. Het voordeel van de schakeling is echter, dat ook veranderingen van de gelijkspanning aan het stuurrooster van de 1e buis worden versterkt, omdat immers elke verandering van I_{a_1} een verandering in de stuurroosterspanning van de 2e buis tengevolge zal hebben. Voor speciale doeleinden in de regeltechniek of voor een kathodestraaloscillograafversterker wordt deze schakeling daarom als *gelijkspanning*sversterker wel gebruikt.

§ 2. Een versterker voor wisselspanningen

De schakeling in fig. XIII-4 stelt een versterker voor, waarbij een triode als voorversterker en een penthode als eindbuis dienst doet. Er is slechts één gelijkspanning van 300 V nodig. De negatieve roosterspanningen zijn verkregen op de in hfdst. XI beschreven wijze.

De te versterken wisselspanning $U_{\widetilde{g}_1}$ wordt via de condensator C_1 toegevoerd aan het rooster van B_1. Deze condensator

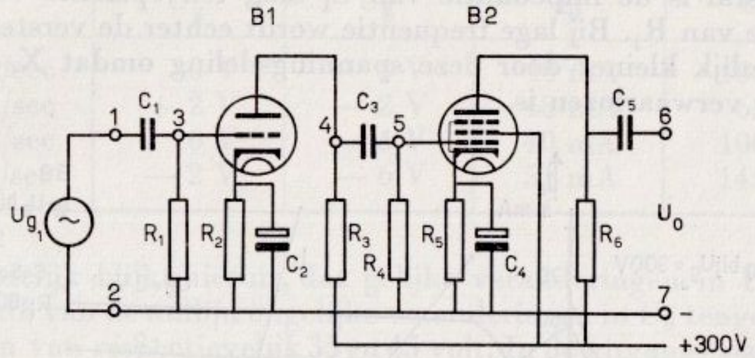


Fig. XIII-4

verhindert, dat bij een eventueel aanwezige gelijkspanning in het ingangssignaal de negatieve roosterspanning van B_1 een andere waarde krijgt. De weerstand R_1 (meestal ca 1 MΩ) brengt een geleidende verbinding tot stand van het rooster met de negatieve zijde van de kathodeweerstand R_2. Parallel aan R_2 is de elektrolytische condensator C_2 geschakeld; de impedantie hiervan voor de te versterken wisselspanningen is zo laag, dat over R_2 geen wisselspanningen van betekenis kunnen ontstaan tengevolge van de anodewisselstroom. We kunnen dan ook zonder bezwaar onze formules voor het berekenen van de versterking op deze schakeling toepassen.

De anodewisselspanning van B_1 komt vervolgens via de z.g. scheidings- of koppelcondensator C_3 op het stuurrooster van B_2, zodat ook deze buis zijn bijdrage in de versterking kan leveren. De uitgangsspanning wordt via een scheidingscondensator C_5 aan de klemmen 6 en 7 toegevoerd.

De isolatie-weerstand van C_3 moet hoog zijn: is b.v. van B_1 de anoderustspanning 200 volt dan komt bij een isolatieweerstand van C_3 ter grootte van 50 MΩ een gelijkspanning van ca 4 volt op het stuurrooster van B_2 terecht.

Hierdoor wordt de anoderuststroom van B_2 aanzienlijk groter en bij nog ongunstiger isolatie van C_3 kan B_2 defect raken.

Voor wisselspanningen vormen C_1, R_1 en ook C_3, R_4 spanningsdelers, zodat b.v. aan het stuurrooster van B_1 een spanning wordt toegevoerd ter grootte van:

$$\frac{R_1}{\sqrt{R_1^2 + \frac{1}{\omega^2 C_1^2}}} \cdot U_{g_1}^{\sim}$$

Meestal is de impedantie van C_1 laag ten opzichte van de waarde van R_1. Bij lage frequentie wordt echter de versterking aanzienlijk kleiner door deze spanningsdeling omdat X_{C1} dan niet te verwaarlozen is.

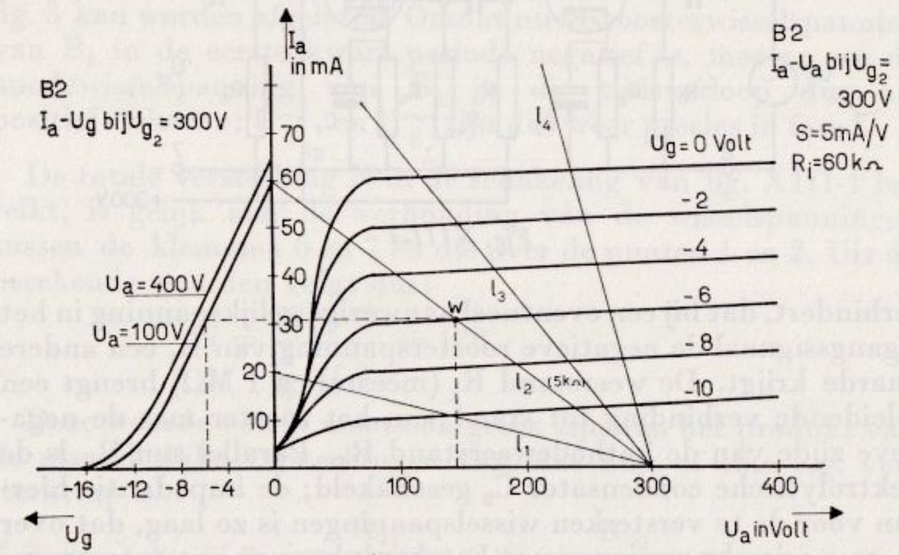


Fig. XIII-5

Aan de hand van fig. XIII-5 kan de hiertoe gepaste penthode nog nader worden beschouwd. Onmiddellijk valt ook hier op, dat de I_a-U_g-karakteristieken slechts in geringe mate afhangen van U_a door de aanwezigheid van het schermrooster. De inwendige weerstand is dus hoog, zoals ook gemakkelijk te bepalen is uit het rechte deel van de I_a-U_a-karakteristieken. Voor een belastingsweerstand van 5 kΩ is de belastingslijn C_2 aangegeven tussen de punten $U_a = 300$ V en $I_a = 60$ mA. Op gelijke wijze kan de lezer nagaan dat l_1, l_3 en l_4 overeenkomen met waarden voor R_a van 15 kΩ, 3 kΩ en 1 kΩ.

Het werkpunt kiezen we op de belastingslijn zodat ter weerszijden hiervan door de opeenvolgende I_a-U_a-lijnen zoveel mogelijk gelijke delen van de belastingslijn worden afgesneden. Hierdoor wordt bereikt, dat in U_a zo weinig mogelijk vervorming optreedt. Zou men b.v. op l_2 het punt $U_g = -4$ V kiezen als werkpunt, dan treden bij een wisselspanning $U_{g_1}^{\sim}$ met een max. waarde van 2 volt en een frequentie van 250 Hz op verschillende tijdstippen de volgende waarden op:

t	$U_{g_1}^{\sim}$	U_g	I_a	U_a
0 m/sec	0 V	— 4 V	40 mA	100 V
1 m/sec	+ 2 V	— 2 V	48 mA	65 V
2 m/sec	0 V	— 4 V	40 mA	100 V
3 m/sec	— 2 V	— 6 V	51 mA	145 V

Duidelijk blijkt hieruit, dat gelijke veranderingen in U_g ten opzichte van de nullijn ongelijke veranderingen in U_a tengevolge hebben van respectievelijk 35 en 45 volt. In de uitgangsspanning is door de — verkeerde — keuze van het werkpunt een ernstige vervorming ontstaan. Bij geluidsweergave levert deze vervorming of distorsie onaangenaam klinkende bijgeluiden, terwijl bij versterkers voor meetdoeleinden meetfouten kunnen ontstaan: de vergelijking $N = \frac{U_a^{\sim}}{U_{g_1}^{\sim}}$ geldt dan niet meer!

Een versterker wordt in vele gevallen gebruikt om wisselstroom-energie te leveren, bijv. aan een kleine motor voor regeldoeleinden of aan een groot aantal luidsprekers van een geluidsinstallatie. Naast de grootte van de beschikbare wisselspanning $U_{g_1}^{\sim}$ en de versterking N is het dan van belang te weten, hoeveel watt of milliwatt aan onvervormd wisselstroomvermogen bij een bepaalde belastingsweerstand beschikbaar is. Volgens het superpositiebeginsel kunnen we de gelijkstroomsituatie hierbij buiten beschouwing laten en alleen de wisselstroomgrootheden $I_a^{\sim}$ en $U_a^{\sim}$ in de berekening betrekken.

Het wisselstroomvermogen W dat in R_a per sec. wordt omgezet in warmte bedraagt:

$$W = I_a^{\sim} \times U_a^{\sim} = I_{a^2}^{\sim} R_{a_2} = \frac{U_{a^2}^{\sim}}{R_a}$$

Voeren we de maximale waarden

$$I\sim_{a_{max}} = I\sim_a \sqrt{2} \text{ en } U\sim_{a_{max}} = U\sim_a \sqrt{2} \text{ in}$$

dan is dus ook

$$W = \frac{I\sim_{a_{max}}}{\sqrt{2}} \times \frac{U\sim_{a_{max}}}{\sqrt{2}} = \frac{I\sim_{a_{max}} \times U\sim_{a_{max}}}{2}$$

Aan de hand van fig. XIII-5 met de daarin getekende belastingslijnen krijgen we voor onze eindpenthode de volgende waarden voor $U\sim_a$ en $I\sim_a$, telkens bij een zo gunstig mogelijk gekozen werkpunt met het oog op geringe vervorming:

R_a	$U\sim_{a_{max}}$	$I\sim_{a_{max}}$	Vermogen
1 kΩ	30 V	30 mA	0,45 W
3 kΩ	90 V	28 mA	1,26 W
5 kΩ	70 V	18 mA	0,63 W
15 kΩ	120 V	8 mA	0,48 W

Bij de aangenomen anodebelastingsweerstanden komt bij een R_a van 3 kΩ het grootste wisselstroomvermogen beschikbaar. Door de buizenfabrikant wordt meestal de gunstigste belastingsweerstand opgegeven.

§ 3. De eindbuis met aanpassingstransformator

Zoals we hebben gezien in het voorbeeld van § 2 is het mogelijk om een eindbuis wisselstroomenergie te laten leveren aan een bepaalde belastingsweerstand. Voor vele toepassingen gaat het er nu juist om bij een gegeven eindbuis en een bepaalde waarde van U_a een zo groot mogelijk vermogen te leveren aan een lage belastingsweerstand zoals bijvoorbeeld een luidspreker met een weerstand van 6 Ω. Het afgegeven vermogen is in de eerste plaats afhankelijk van de buisconstructie en de buisgrootheden zoals de steilheid. Verder echter ook van de grootte van R_a: bij een R_a van 6 Ω zal het wisselstroomvermogen volgens het hierboven behandelde wel zeer gering zijn!

Er is een belangrijk middel om de kloof tussen de lage belastingsweerstand en de veel grotere door de buizenfabrikant opgegeven gunstigste R_a te overbruggen, nl. de aanpassingstransformator.

Om de werking hiervan goed te begrijpen zullen we eerst de fig. XIII-6 en 7 nader bestuderen. In fig. XIII-6 is weer de penthode eindbuis F uit § 2 getekend, terwijl in fig. XIII-7 de I_a-U_a-karakteristieken getekend zijn.

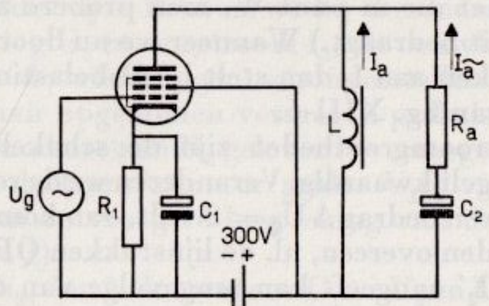


Fig. XIII-6

In fig. XIII-6 is de anode van de penthode met de batterij verbonden via de smoorspoel L, waarvan de zelfinductie zeer groot is. De gelijkstroomweerstand van L is te verwaarlozen klein, zodat

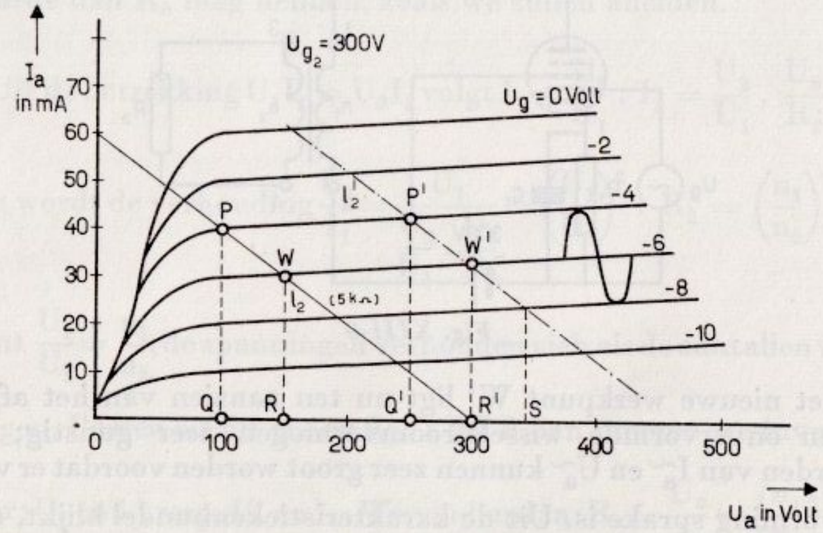


Fig. XIII-7

U_a = 300 V wordt en de totale I_a door de smoorspoel gaat. De belastingsweerstand R_a bedraagt 5 kΩ, de scheidingscondensator C_2 heeft een zeer grote capaciteit zodat de wisselspanning over C_2 te verwaarlozen gering is. Het werkpunt in de karakteristiekenbundel van fig. XIII-7 wordt dan inplaats van het punt W

uit fig. XIII-5 het punt W′: er is immers geen gelijkspanningsdaling over anodeweerstand. In fig. XIII-7 is het werkpunt W met de belastingslijn l_2 nog eens aangegeven.

(De aandachtige lezer zal opmerken dat de kathodeweerstand behorende bij W′ een iets kleinere waarde moet hebben dan overeenkomt met die in punt W, men probere zelf eens te bepalen hoeveel dit bedraagt.) Wanneer we nu door W′ een lijn l_2' evenwijdig trekken aan l_2 dan stelt l_2' de belastingslijn voor R_a in het schema van fig. XIII-6.

Voor wisselstroomgrootheden zijn de schakelingen van fig. XIII-4 en 6 dus gelijkwaardig. Veranderen we de roosterspanning in W en W′ met een bedrag $\Delta U_g = 2$ volt, dan komen hiermee gelijke ΔU_a waarden overeen, nl. de lijnstukken QR en Q′R′.

Zoals de lijn l_2' aangeeft kan tengevolge van een roosterwisselspanning de momentele waarde van U_a hoger worden dan de batterijspanning van 300 volt. De verklaring hiervan is, dat bij afnemende I_a in de smoorspoel L een E.M.K. van zelfinductie ontstaat, die dan zo gericht is, dat deze in serie staat met de batterijspanning.

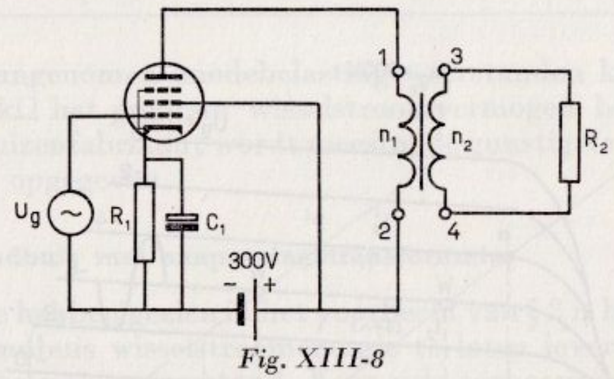


Fig. XIII-8

Het nieuwe werkpunt W′ ligt nu ten aanzien van het afgegeven onvervormde wisselstroomvermogen zeer gunstig; de waarden van $I_a^{\sim}$ en $U_a^{\sim}$ kunnen zeer groot worden voordat er van vervorming sprake is. Uit de karakteristiekenbundel blijkt, dat in de nieuwe schakeling een vermogen van

$$\frac{I^{\sim}_{a_{max}} \times U^{\sim}_{a_{max}}}{2} = \frac{30 \times 150}{2}\ \text{mW} = 2{,}25\ \text{W}$$

ontwikkeld wordt, wat aanzienlijk meer is dan we in § 2 vonden voor $R_a = 5\ \text{k}\Omega$.

De toepassing van een uitgangstransformator (fig. XIII-8)

vormt de meest gebruikelijke oplossing om te bereiken, dat alleen de anodewisselstroom door de belastingsweerstand vloeit. Het aantal windingen van de primaire wikkeling bedraagt n_1, van de secundaire n_2. Verder heeft de wisselspanning over de klemmen 1 en 2 de waarde U_1, de hierbij behorende primaire wisselstroom is I_1. Op dezelfde wijze hebben we bij de secundaire wikkeling een klemspanning U_2 en een stroom I_2, die ook vloeit door R_2. De weerstand van de wikkelingen veronderstellen we zeer klein, zodat het primair opgenomen vermogen praktisch gelijk is aan het door de secundaire aan R_2 geleverde vermogen. Hieruit volgt dus, dat voor de transformator geldt: $U_1 I_1 = U_2 I_2$, wat we trouwens al van de vroegere bespreking van de transformator wisten (zie deel I).

Als nu $n_1 = n_2$, dan is dus wegens $U_1 = U_2$ en $U_1 I_1 = U_2 I_2$ ook $I_1 = I_2$: de wisselstroomsituatie in de anodekring komt geheel overeen met die in fig. XIII-6!

Door n_2 b.v. kleiner te maken dan n_1 heeft men een ideaal middel gevonden om de buis met de gunstigste weerstand te belasten, ten einde het maximale wisselstroomvermogen volledig over te dragen aan de weerstand R_2, die nu een veel lagere waarde dan R_a mag hebben, zoals we zullen afleiden.

Uit de betrekking $U_1 I_1 = U_2 I_2$ volgt $I_1 = \frac{U_2}{U_1} \cdot I_2 = \frac{U_2}{U_1} \cdot \frac{U_2}{R_2}$,

dan wordt de verhouding $\frac{U_1}{I_1} = \frac{U_1}{\frac{U_2}{U_1} \cdot \frac{U_2}{R_2}} = \left(\frac{U_1}{U_2}\right)^2 \cdot R_2 = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 R_2$,

want $\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}$, de spanningen verhouden zich als de aantallen windingen. Passen we dit toe op fig. XIII-8 dan moeten we invullen voor: U_1 en I_1, resp. U_a en I_a. We vinden dan: $R_a = \frac{U_a}{I_a} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 R_2$.

Is de gunstigste R_a voor een bepaalde buis bv. $5\ \text{k}\Omega$ en komt R_2 overeen met een luidspreker, waarvan de weerstand $5\ \Omega$ bedraagt, dan is de juiste aanpassing verkregen als:

$$5\,000 = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 5 \text{ of } \frac{n_1}{n_2} = \sqrt{1\,000} = 31{,}5.$$

Volledigheidshalve moeten aan het slot van deze paragraaf nog de volgende opmerkingen worden gemaakt:

1. Bij echte transformatoren treden verliezen op door warmteontwikkeling van de primaire en secundaire stroom in de wikkelingen. Bovendien treden ijzerverliezen op. Beide verliezen zijn echter bij in de praktijk toegepaste transformatoren gering ten opzichte van het beschikbare wisselstroomvermogen van de buis: de afgeleide betrekkingen blijven geldig.
2. Bij de smoorspoel in fig. XIII-6 bleek ons al, dat een hoge waarde van de zelfinductie noodzakelijk is, dit geldt evenzeer voor de primaire wikkeling van de transformator.
3. Door smoorspoel- en transformatorwikkeling vloeit een gelijkstroom I_a. Om verzadiging van de kern te voorkomen moet een luchtspleet worden toegepast. (Zie ook hfdst. VIII, § 3).

§ 4. De balansschakeling.

Bij de constructie van elektronische versterkers is het van belang, om bij niet al te grote afmetingen van het voedingsgedeelte een zo groot mogelijk beschikbaar uitgangsvermogen te krijgen. Het rendement van een versterker is dus een belangrijke economische factor en er bestaan schakelingen zoals die in fig. XIII-9 aangegeven om dit te bereiken.

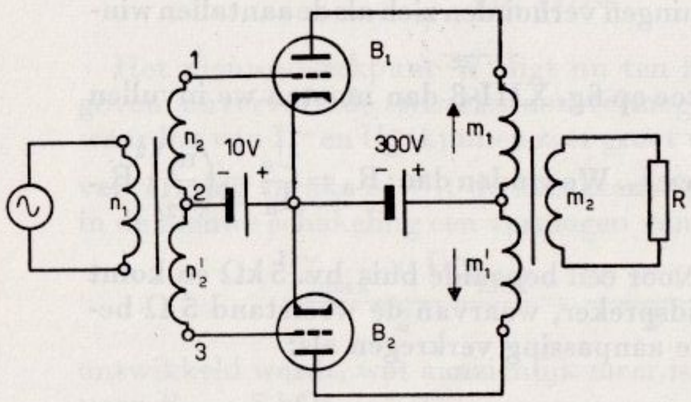


Fig. XIII-9

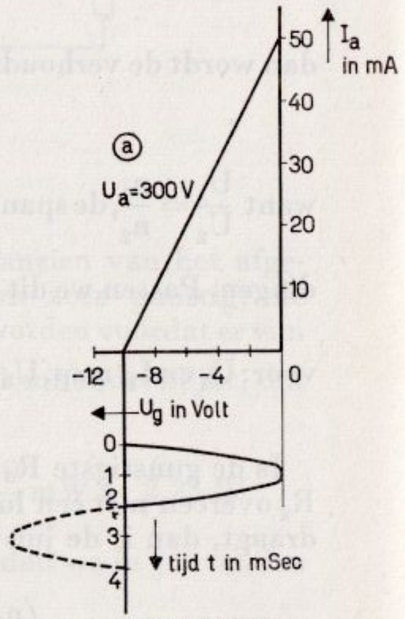


Fig. XIII-9a

De eindbuizen waarvan de geïdealiseerde I_a-U_g-karakteristiek is gegeven in fig. XIII-9a hebben beide een negatieve roosterspanning van — 10 volt, zodat de I_a in rusttoestand vrijwel nul is. Aan het rooster van B_1 wordt een wisselspanning toegevoerd met een max. waarde van 10 volt. In de in fig. XIII-9a getekende eerste halve periode van U_g is de I_{a1} van B_1 hiermee gelijkvormig, terwijl de max. waarde 50 mA bedraagt. In de eerste 2 msec is de I_{a2} van B_2 voortdurend nul omdat de wisselspanning van n_2' juist in tegenfase is met die van n_2.

In de volgende halve periode laat juist B_2 stroom door en B_1 niet. Aan de uitgangstransformator met twee primaire wikkelingen m_1 en m_1' worden nu beurtelings door B_1 en B_2 de anodestroomstoten toegevoerd. De stroomrichting is hierbij volgens de getekende pijltjes, zodat in de ijzerkern een wisselflux ontstaat met een maximale waarde evenredig aan de max. waarde van de anodestroom. Dientengevolge kan nu n_2 een wisselstroomvermogen overdragen aan R ter grootte van:

$$W_a = \frac{I_{a_{max}} \cdot U_{a_{max}}}{2} = \frac{50\ mA\ .\ 300\ V}{2} = 7{,}5\ watt!$$

Het rendement van deze schakeling is dus zeer hoog. In de praktijk vindt men deze schakeling vaak toegepast onder de naam balansversterker.

§ 5. Een versterker met transistoren

Meestal zal in een versterker de transistor in geaarde emissorschakeling worden opgenomen. Op deze manier geschakeld,

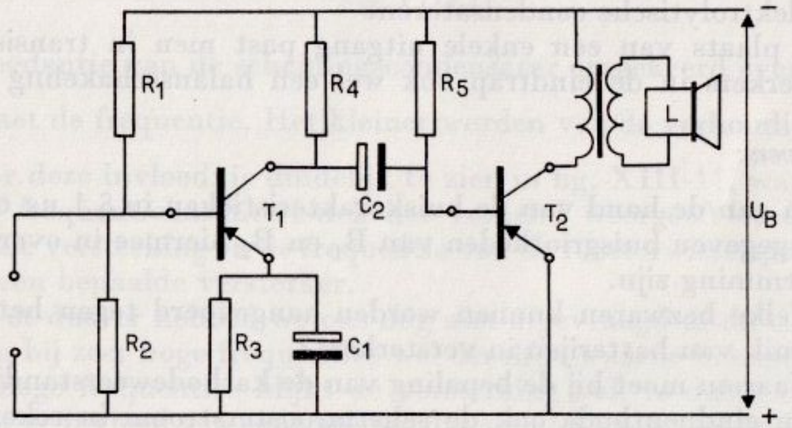


Fig. XIII-10

is nl. de versterking het grootst, omdat hierbij een grote stroomversterking optreedt.

In fig. XIII-10 is een laagfrequentversterker gegeven, bestaande uit een eindtrap, die via een transformator is gekoppeld met de luidspreker.

De eindtransistor T_2 wordt uitgestuurd d.m.v. een voortransistor T_1. Het uitgangsvermogen van de transistor wordt op dezelfde manier berekend als bij een penthode eindbuis, d.w.z. dat het maximale uitgangsvermogen gelijk is aan:

$$W_{o_{max}} = \frac{U_c \times I_c}{2}$$

De gunstigste belastingsweerstand van de eindtransistor wordt gevonden met de volgende formule

$$R_c = \frac{U_c}{I_c}$$

De collectorstroom van de eindtransistor wordt ingesteld d.m.v. de basisweerstand R_5.

De weerstand R_3 werkt op dezelfde manier als de kathodeweerstand bij een buis.

Parallel aan R_2 is een condensator (C_1) geschakeld, die dient ter ontkoppeling van de emissorweerstand.

C_2 is de koppelcondensator tussen de eerste transistor en de tweede. In transistorversterkers zijn deze koppelcondensatoren gewoonlijk elektrolytische condensatoren. Door de betrekkelijk lage waarde van de ingangsimpedantie moet nl. een betrekkelijk grote koppelcapaciteit (enkele microfarad) gebruikt worden.

Om de afmetingen niet te groot te maken, gebruikt men daarom elektrolytische condensatoren.

In plaats van een enkele uitgang past men in transistorversterkers in de eindtrap ook wel een balansschakeling toe.

Opgaven:

1. Ga aan de hand van de buiskarakteristieken in § 1 na of de opgegeven buisgriotheden van B_1 en B_2 hiermee in overeenstemming zijn.
2. Welke bezwaren kunnen worden aangevoerd tegen het gebruik van batterijen in versterkers?
3. Waarom moet bij de bepaling van de kathodeweerstand van een eindpenthode ook de schermroosterstroom in rekening worden gebracht?

4. Bereken de waarden van R_2 en R_5 uit fig. XIII-4 aan de hand van de in s 1 en 2 gegeven buiskarakteristieken.
5. Bereken de versterking die bereikt wordt met B_1 in fig. 4 bij een frequentie van 40 Hz, $C_1 = 0{,}1\mu F$, $R_1 = 1\ M\Omega$ en $R_3 = 80\ k\Omega$ (de invloed van C_3 en R_4 blijft hierbij buiten beschouwing).
6. Teken fig. XIII-5 over op mm papier en schets bij $U_g = -6$ V en de belastingslijn l_2 de U_a, als aan het stuurrooster van deze buis een wisselspanning van 2 volt met een frequentie van 2 000 Hz wordt toegevoerd.

§ 6. De invloed van de frequentie op de versterking.

In § 2 van dit hoofdstuk is erop gewezen dat de scheidingscondensator en de roosterweerstand een spanningsdeler vormen. De invloed hiervan neemt bij lagere frequentie steeds toe, omdat de

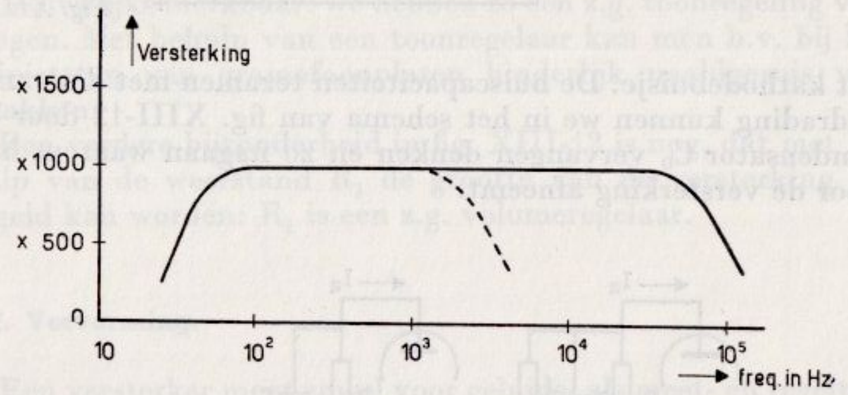


Fig. XIII-11

impedantie van de scheidingscondensator omgekeerd evenredig is met de frequentie. Het kleiner worden van de verhouding $\frac{U_g}{U_i}$ door deze invloed, is duidelijk te zien in fig. XIII-11, waar een z.g. frequentiekarakteristiek het verband weergeeft tussen de totale versterking en de frequentie van de roosterwisselspanning bij een bepaalde versterker.

Tot dusver hebben we ons nog niet afgevraagd of de versterking bij zeer hoge frequenties wel dezelfde waarde behoudt. Bij de hoge frequenties blijkt de versterking ook te dalen en wel door de invloed van capaciteiten die parallel staan aan de anode- en roosterweerstanden. Een versterker moet nu eenmaal worden

voorzien van bedrading, er komen buizen aan te pas, het geheel wordt gemonteerd op een metalen plaat en is soms nog door een metalen kast omgeven. De bedrading, die deel uitmaakt van rooster- en anodecircuits is door isolatiemateriaal van de montageplaat gescheiden en vormt dus een condensator. Ook roosterspiralen en anoden hebben een capaciteit ten opzichte van

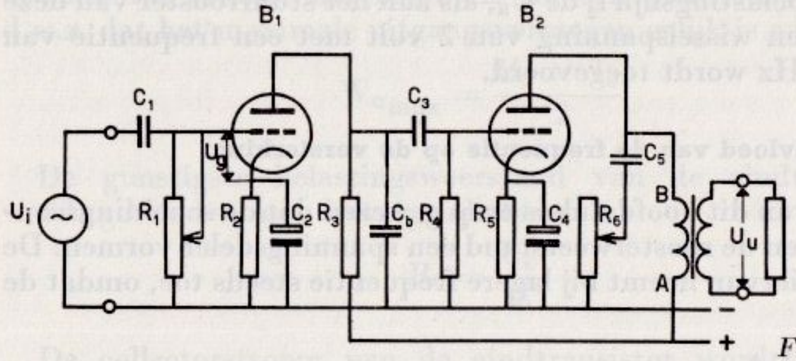


Fig. XIII-12

het kathodebuisje. De buiscapaciteiten tezamen met die van de bedrading kunnen we in het schema van fig. XIII-12 door één condensator C_b vervangen denken en zo nagaan waarom hierdoor de versterking afneemt.

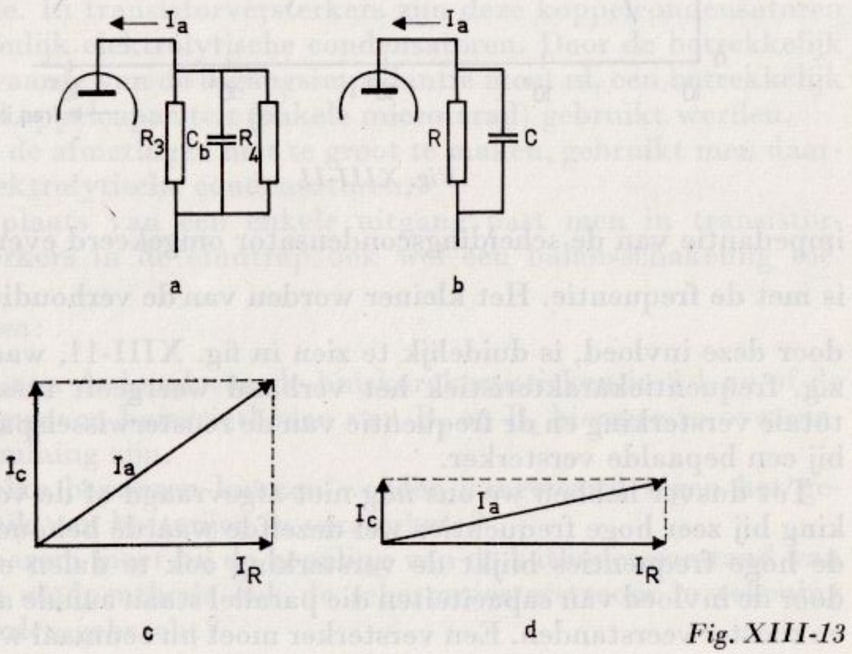


Fig. XIII-13

De impedantie van C_3 is voor hoge frequenties te verwaarlozen klein ten opzichte van R_4. Het anodecircuit van B_1 mogen we voor de wisselstroomsituatie dan vervangen denken door het schema uit fig. XIII-13b, dat ontstaan is uit dat van fig. XIII-13a door R_3 en R_4 te vervangen door R.

Uit het vectordiagram in fig. XIII-13c zien we, dat I_a de som is van een stroom I_c, die frequentieafhankelijk is en de stroom I_R. Wanneer we nu zorgen, dat I_c klein is ten opzichte van I_R dan is bij benadering $I_a = I_R$, zodat de spanning over R vrijwel niet door de frequentie wordt beinvloed. Dit kunnen we bereiken door C_b klein te houden d.w.z. korte verbindingen maken en R_3 klein te maken d.w.z. lage anodeweerstanden gebruiken.

In fig. XIII-12 is C_5 nog getekend in serie met een regelbare weerstand R_6. Staat het afneemcontact in de onderste stand bij A dan is C_5 parallel geschakeld aan de anode impedantie van B_2 en zal dus de versterking voor hoge frequenties doen afnemen. Staat het afneemcontact van R_6 in stand B dan is de invloed van C_5 nauwelijks merkbaar: we hebben zo een z.g. toonregeling verkregen. Met behulp van een toonregelaar kan men b.v. bij het beluisteren van gramofoonplaten hinderlijk naaldgeruis verzwakken.

Een verdere bijzonderheid in fig. XIII-12 is nog, dat met behulp van de weerstand R_1 de grootte van de versterking geregeld kan worden: R_1 is een z.g. volumeregelaar.

§ 7. Vervorming.

Een versterker moet zowel voor geluids- als meet- en regeltoepassingen de ingangspanning evenredig vergroten: U_i en U_a moeten dezelfde vorm hebben. Verder wordt vaak verlangd dat de frequentie van de ingangspanning geen invloed heeft op de grootte van de versterking. We zagen reeds dat dit niet opgaat, de frequentiekaraktecistiek is niet recht, de uitgangspanning is dan ten opzichte van de ingangspanning niet evenredig vergroot.

Een aantal gevallen waarin tengevolge van onjuiste keuze van het werkpunt van versterkbuizen U_a een andere vorm krijgt dan U_i zijn samengebracht in fig. XIII-14.

In fig. XIII-14a is U_g te sterk negatief, de tweede halve periode van I_a wordt afgeplat.

In fig. XIII-14b is U_g niet voldoende negatief, het rooster wordt in de eerste halve periode zelfs positief; er treedt hierdoor en t.g.v. het niet meer recht verlopen van de I_a-U_g-karakteris-

stiek bij positieve roosterspanningen een afplatting van de eerste halve periode op.

In fig. XIII-14c is aangegeven wat er gebeurt met de I∼ als bij een balansversterker de negatieve roosterspanning te groot is, ge-

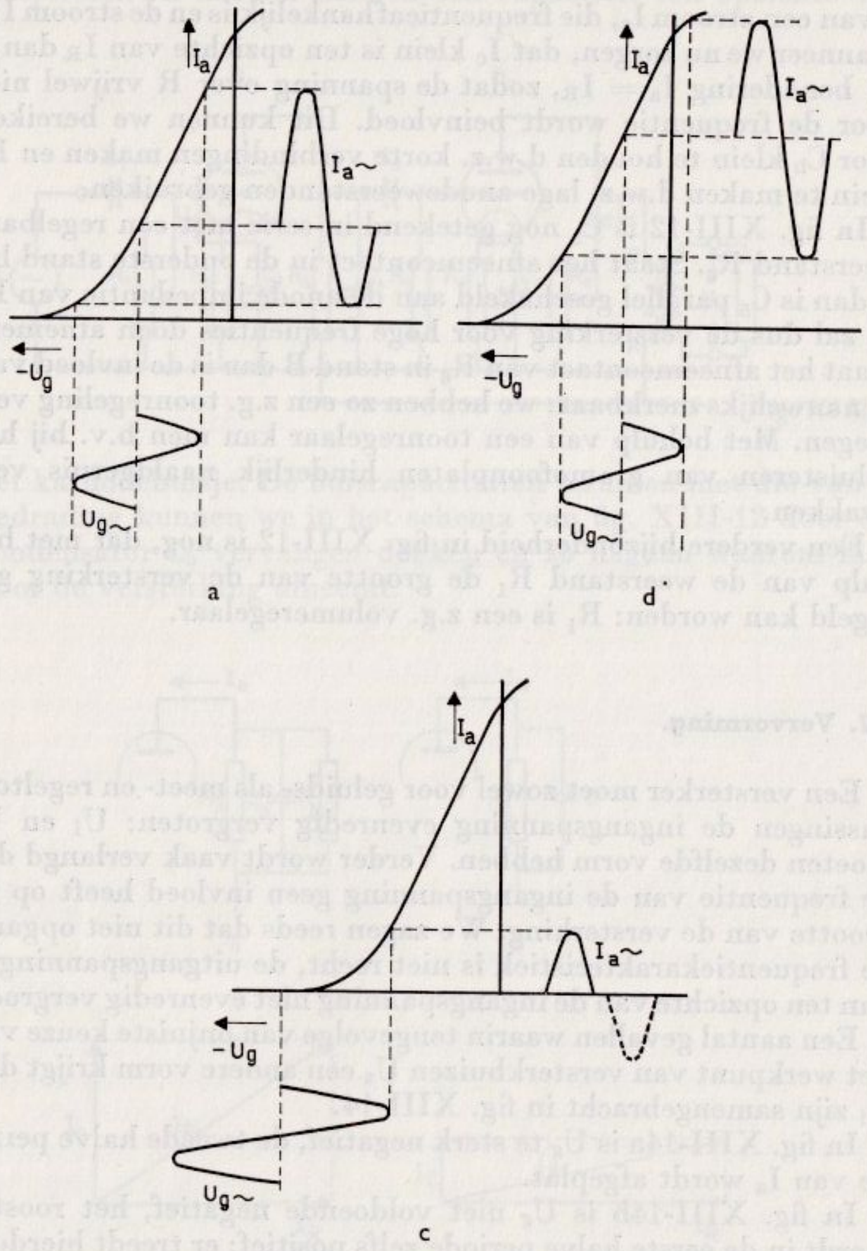


Fig. XIII-14

durende een kleine tijd is de I∼ nul wat in combinatie met het — gestippelde — aandeel in I∼ afkomstig van de tweede buis wel een bijzonder grote afwijking van de sinuskromme oplevert.

§ 8. Tegenkoppeling.

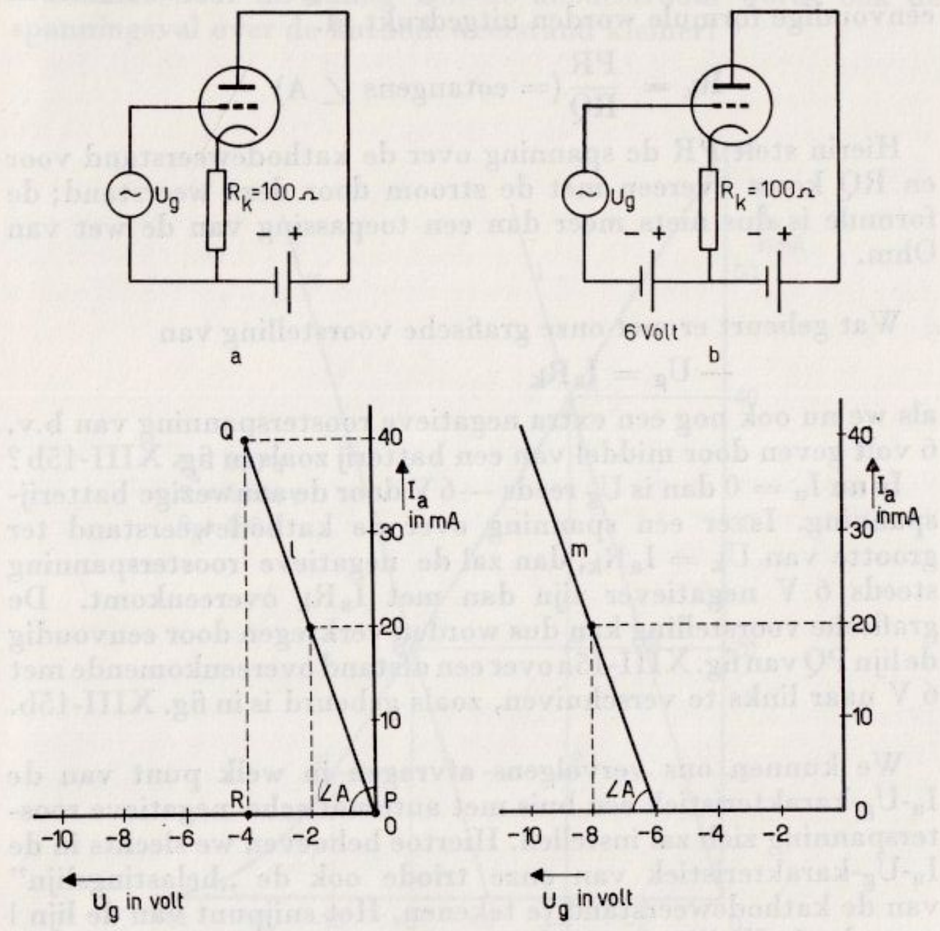


Fig. XIII-15

In fig. XIII-15a en b is een triode getekend met een kathodeweerstand van 100 Ω, waaraan, nu eens in tegenstelling met de tot dusver getekende schakelingen voor automatische negatieve roosterspanning geen condensator parallel staat.

Het verband tussen I_a en U_g is in de grafiek van fig. XIII-15a aangegeven, waarbij zoals we reeds wisten moet gelden:

$$-U_g = I_a \times R_k.$$

De grafische voorstelling hiervan is een rechte lijn, zo is b.v. voor $I_a = 20$ mA de bijbehorende roosterspanning gelijk aan 20 mA $\times$ 100 Ω = 2 V. Als de anodestroom tot nul daalt is de negatieve roosterspanning in fig. XIII-15a ook nul geworden. Evenals indertijd bij de belastingslijn werd vermeld, kan ook hier de helling van lijn l met betrekking tot de grootte van R_k in een eenvoudige formule worden uitgedrukt nl.

$$R_k = \frac{PR}{RQ} (= \text{cotangens} \angle A)$$

Hierin stelt PR de spanning over de kathodeweerstand voor en RQ komt overeen met de stroom door deze weerstand; de formule is dus niets meer dan een toepassing van de wet van Ohm.

Wat gebeurt er met onze grafische voorstelling van

$$-U_g = I_a R_k$$

als we nu ook nog een extra negatieve roosterspanning van b.v. 6 volt geven door middel van een batterij zoals in fig. XIII-15b?

Is nu $I_a = 0$ dan is U_g reeds -6 V door de aanwezige batterijspanning. Is er een spanning over de kathodeweerstand ter grootte van $U_k = I_a R_k$, dan zal de negatieve roosterspanning steeds 6 V negatiever zijn dan met $I_a R_k$ overeenkomt. De grafische voorstelling kan dus worden verkregen door eenvoudig de lijn PQ van fig. XIII-15a over een afstand overeenkomende met 6 V naar links te verschuiven, zoals gebeurd is in fig. XIII-15b.

We kunnen ons vervolgens afvragen in welk punt van de I_a-U_g-karakteristiek een buis met automatische negatieve roosterspanning zich zal instellen. Hiertoe behoeven we slechts in de I_a-U_g-karakteristiek van onze triode ook de „belastingslijn" van de kathodeweerstand te tekenen. Het snijpunt van de lijn l met de I_a-U_g-lijn geeft die anodestroom aan, waarbij geldt $-U_g = I_a R_k$. Dit is in fig. XIII-16 aangegeven ook voor het geval van fig. XIII-15b, waar dus een extra negatieve spanning van 6 V was toegevoegd (lijn m).

Zoals we in de figuur kunnen aflezen ligt het werkpunt voor lijn l op $U_g = -4$ V en $I_a = 40$ mA. Gaan we nu door middel van de batterij van 6 V de negatieve roosterspanning opvoeren, dan zou men in eerste instantie een daling van de anodestroom verwachten ter grootte van

$$\triangle I_a = 6 \text{ V} \times 5 \frac{\text{mA}}{\text{V}} = 30 \text{ mA},$$

waarbij we dus in het punt E van de I_a-U_g-karakteristiek uit zouden komen.

Het merkwaardige van de schakeling met een kathodeweerstand is echter, dat we niet in E terechtkomen maar in B, het snijpunt van de I_a-U_g-lijn met m.

Immers door de daling van de anodestroom wordt ook de spanningsval over de kathodeweerstand kleiner!

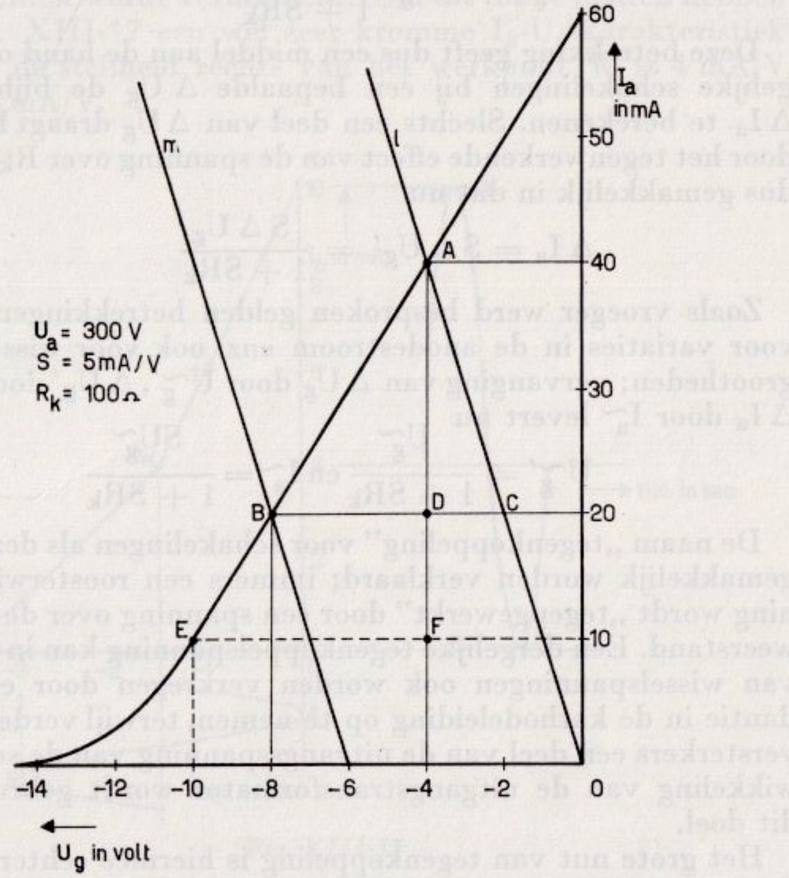


Fig. XIII-16

Uit fig. XIII-16 blijkt direct:

$$S = \frac{AD}{BD} \qquad AD = S \,.\, BD$$

$$R_k = \frac{CD}{AD} \text{ dus } CD = AD.\, R_k = S \,.\, R_k \,.\, BD$$

We schrijven nu onder elkaar de volgende vergelijkingen en tellen deze op:

$$\begin{aligned} CD &= SR_k \,.\, BD \\ BD &= BD \\ \hline CD + BD &= (1 + SR_k)\, BD \end{aligned} +$$

$$BC = (1 + SR_k)\, BD \text{ of } BD = BC \,.\, \frac{1}{1 + SR_k}$$

Noemen we nu $BC = \Delta U_g$ en $BD = \Delta U_g'$ dan geldt dus

$$\Delta U_g' = \Delta U_g \,.\, \frac{1}{1 + SR_k}$$

Deze betrekking geeft dus een middel aan de hand om in dergelijke schakelingen bij een bepaalde ΔU_g de bijbehorende ΔI_a te berekenen. Slechts een deel van ΔU_g draagt hierin bij, door het tegenwerkende effect van de spanning over R_k. We zien dus gemakkelijk in dat nu

$$\Delta I_a = S\, \Delta U_g' = \frac{S\, \Delta U_g}{1 + SR_k}$$

Zoals vroeger werd besproken gelden betrekkingen afgeleid voor variaties in de anodestroom enz. ook voor wisselstroomgrootheden; vervanging van ΔU_g door $U_g^{\sim}$, $\Delta U_g'$ door $U_g^{\sim\prime}$ en ΔI_a door $I_a^{\sim}$ levert nu

$$U_g^{\sim\prime} = \frac{U_g^{\sim}}{1 + SR_k} \text{ en } I_a^{\sim} = \frac{SU_g^{\sim}}{1 + SR_k}$$

De naam „tegenkoppeling" voor schakelingen als deze kan nu gemakkelijk worden verklaard; immers een roosterwisselspanning wordt „tegengewerkt" door een spanning over de kathodeweerstand. Een dergelijke tegenkoppelspanning kan in het geval van wisselspanningen ook worden verkregen door een impedantie in de kathodeleiding op te nemen, terwijl verder bij vele versterkers een deel van de uitgangsspanning van de secundaire wikkeling van de uitgangstransformator wordt gebruikt voor dit doel.

Het grote nut van tegenkoppeling is hiermee echter nog niet verklaard. Tot dusver zagen we alleen maar dat slechts een deel van $U_g^{\sim}$ nog bij kan dragen om een $I_a^{\sim}$ te produceren zodat de versterking zelfs kleiner is geworden!

Als eerste belangrijke toepassing kan worden genoemd de frequentie-afhankelijke tegenkoppeling, zoals deze vaak in versterkers en radio-ontvangers wordt toegepast. Door inplaats van de kathodeweerstand in fig. XIII-15a een smoorspoeltje te nemen, waarvan de weerstandswaarde gelijk is aan R_k bereikt men

bij een zelfde instelpunt, dat voor lage frequenties de tegenkoppelspanning gering en de versterking normaal is, terwijl juist voor hogere frequenties door de grotere tegenkoppelspanning over de smoorspoel een belangrijke daling in de versterking optreedt.

Tegenkoppelschakelingen worden veel toegepast om een bepaalde frequentiekarakteristiek te verkrijgen.

De tweede belangrijke reden voor de toepassing van tegenkoppeling is, dat hierdoor de vervorming in de anodewisselstroom, die ontstaat tengevolge van kromme buiskarakteristieken aanzienlijk wordt verminderd. Om dit toe te lichten hebben we in fig. XIII-17 een wel zeer kromme I_a-U_g-karakteristiek getekend: de steilheid rechts van het werkpunt W is 4 mA/V en links 2 mA/V.

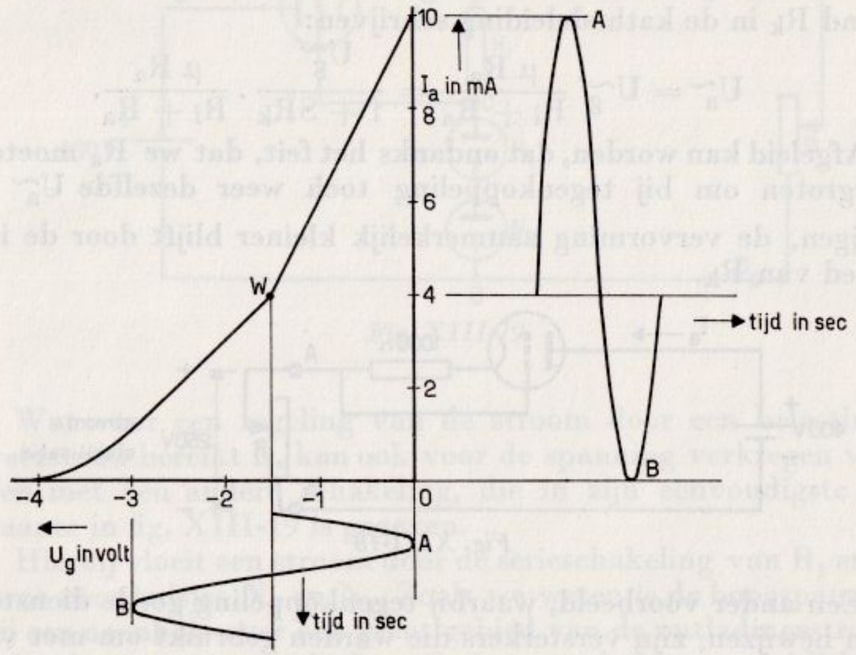


Fig. XIII-17

Het gevolg van deze „kromme" karakteristiek is, in een schakeling zonder kathodeweerstand dus, dat de maximum waarde van de anodewisselstroom in de eerste halve periode bij A het dubbele bedraagt van dat in de tweede halve periode bij B. De vervorming is dus zeer groot.

Nemen we aan, dat er geen anodeweerstand is toegepast dan kan de volgende berekening ons leren hoe de verhouding van i_a

bij A en i_a bij B zal worden indien een kathodeweerstand van 375 Ω wordt toegepast:

bij A is $I_a^{\sim} = U_g^{\sim} \frac{S_A}{1 + S_A R_k} = U_g^{\sim} \frac{4 \times 10^{-3}}{1 + 1{,}5} = U_g^{\sim} \,.\, 1{,}6 \,.\, 10^{-3}$

bij B is $I_a^{\sim} = U_g^{\sim} \frac{S_B}{1 + S_B R_k} = U_g^{\sim} \frac{2 \times 10^{-3}}{1 + 0{,}75} = U_g^{\sim} \,.\, 1{,}14 \,.\, 10^{-3}$.

De verhouding van de maximum waarden is nu door de tegenkoppeling verminderd tot $\frac{1{,}6}{1{,}14} = 1{,}4$. Wat dus een belangrijke verbetering betekent.

De versterking gaat door het toepassen van tegenkoppeling ook achteruit, volgens het superpositiebeginsel mogen we teneinde de anodewisselspanning te bepalen over een belastingsweerstand R_a in de anodeleiding van een triode met een weerstand R_k in de kathodeleiding schrijven:

$$U_a^{\sim} = U_g^{\sim\prime} \frac{\mu R_a}{R_i + R_a} = \frac{U_g^{\sim}}{1 + SR_k} \cdot \frac{\mu R_a}{R_i + R_a}.$$

Afgeleid kan worden, dat ondanks het feit, dat we R_a moeten vergroten om bij tegenkoppeling toch weer dezelfde $U_a^{\sim}$ te krijgen, de vervorming aanmerkelijk kleiner blijft door de invloed van R_k.

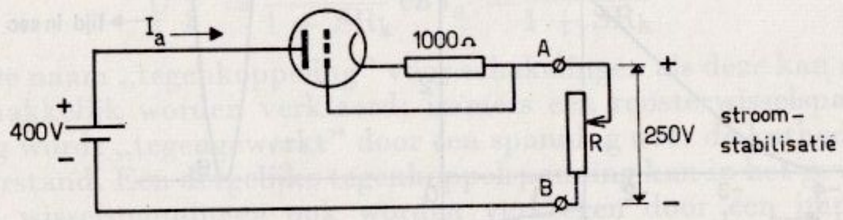


Fig. XIII-18

Een ander voorbeeld, waarbij tegenkoppeling goede diensten kan bewijzen, zijn versterkers die worden gebruikt om met vrij grote nauwkeurigheid kleine wissel- of gelijkspanningen te meten. Een belangrijke eis hierbij is, dat de versterking zoveel mogelijk constant is, dus onafhankelijk van voedingspanningsvariaties en veranderingen in buiseigenschappen. Door nu een sterke tegenkoppeling toe te passen, kan men dit doel op eenvoudige wijze verwezenlijken.

Tenslotte vermelden we nog twee belangrijke schakelingen voor de meet- en regeltechniek, waarbij dank zij de tegenkoppeling het mogelijk is een vrijwel constante gelijkspanning of -stroom aan een belasting toe te voeren.

Bezien we daartoe eerst fig. XIII-18. De anodestroom van de regeltriode vloeit door de kathodeweerstand van 1 000 Ω en de belastingsweerstand R_B. Wanneer de belastingsweerstand op een kleinere waarde wordt ingesteld neemt in eerste instantie de (anode)stroom toe en dus ook de spanning over de kathodeweerstand. Dit laatste veroorzaakt echter een toename van de negatieve roosterspanning, waardoor de anodestroom kleiner wordt. Afhankelijk van de steilheid van de buis e.d. kan men het resultaat bereiken, dat de stroom vrijwel constant blijft, onafhankelijk van de waarde van de belastingsweerstand (in een bepaald gebied): *de inwendige weerstand van deze schakeling is a.h.w. zeer groot geworden.*

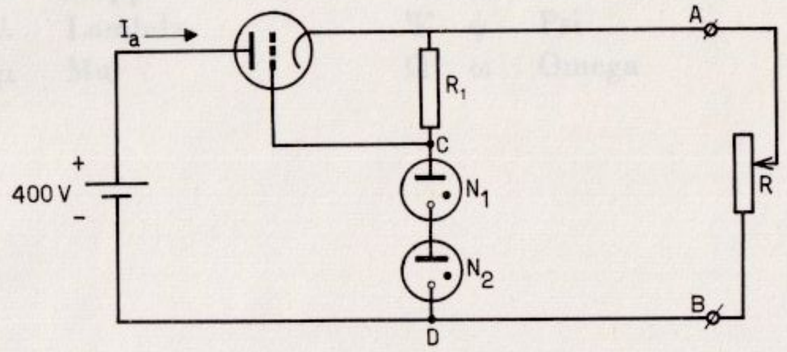


Fig. XIII-19

Wat voor een regeling van de stroom door een belastingsweerstand bereikt is, kan ook voor de spanning verkregen worden met een andere schakeling, die in zijn eenvoudigste gedaante in fig. XIII-19 is gegeven.

Hierbij vloeit een stroom door de serieschakeling van R_1 en de twee neonbuisjes N_1 en N_2. Zoals we weten is de boogspanning bij een neonbuis over een groot gebied van de ontladingsstroom vrijwel constant: wordt de spanning aan de klemmen AB lager b.v. tengevolge van een lagere waarde van R_B dan blijft desondanks de spanning over CD vrijwel constant. De spanning over de weerstand R_1 is echter wel lager geworden, waardoor de anodestroom I_a van de triode toeneemt. Een grotere I_a vergroot weer de spanning AB en bij een juiste berekening van de onderdelen kan bereikt worden, dat de spanning AB onafhankelijk van de grootte van de belasting eenzelfde waarde behoudt: *de inwendige weerstand van deze schakeling is zeer gering geworden.*

Vanzelfsprekend zijn de schema's van voedingsapparaten voor constante stroom of spanning ingewikkelder; zo is de batterij van 400 volt in fig. XIII-18 en 19 meestal een p.s.a. en in plaats van één regeltriode past men meer buizen toe om de roosterspanning van de regeltriode uit onze schema's eerst na versterking af te leiden van de uitgangsspanning of -stroom.

Grieks alfabet

A	α	Alpha	N	ν	Nu
B	β	Bêta	Ξ	ξ	Xi
Γ	γ	Gamma	O	ο	Omicron
Δ	δ	Delta	Π	π	Pi
E	ε	Epsilon	P	ρ	Rho
Z	ζ	Zêta	Σ	σ	Sigma
H	η	Êta	T	τ	Tau
Θ	ϑ	Thêta	Υ	υ	Ypsilon
I	ι	Jota	Φ	φ	Phi
K	κ	Kappa	X	χ	Chi
Λ	λ	Lambda	Ψ	ψ	Psi
M	μ	Mu	Ω	ω	Omega