

R.T.

Ea

Nadruk verboden 1

Electronica. Les 1

Hoofdstuk 1

1.1. Thermische electronenemissie

Vloeit door een draad een elektrische stroom, dan verplaatsen electronen zich door de draad. Deze electronen blijven echter binnen de draad. Een electron, dat de draad zou willen verlaten, zou een positief ladingsoverschot achterlaten. Immers, met het electron zou een negatieve lading de draad verlaten, dus blijft er een tekort aan negatieve lading, ofwel een positieve lading, achter. Deze achterblijvende positieve lading zou het negatief geladen electron aantrekken en het zodoende binnen de draad houden, want tegengestelde ladingen trekken elkaar aan.

De moleculen, atomen en electronen van een lichaam zijn voortdurend in beweging. Met het blote oog, zelfs met een microscoop zien we daar niets van, omdat de deeltjes daarvoor veel te klein zijn. De beweging van die deeltjes is zeer onregelmatig. Zowel de snelheid waarmee de deeltjes zich bewegen als de richting waarin ze zich bewegen, verandert voortdurend. Daar de bewegende deeltjes herhaaldelijk tegen elkaar botsen, veranderen hun snelheid en richting steeds; ze blijven zich echter binnen een zekere ruimte bewegen.

Het feit, dat de deeltjes zich bewegen, is een uiting van een zekere hoeveelheid energie, die de deeltjes bezitten. Voor elke beweging is energie nodig, dus ook voor de bewegende moleculen, atomen en electronen. Naarmate de energie welke een bewegend deeltje bezit, groter is, zal de bewegingssnelheid ook groter zijn.

Voeren we aan een zeker lichaam energie toe, dan zal dit een snellere beweging van de deeltjes, welke in het lichaam voorkomen, ten gevolge hebben. De snelheid van de electronen zal meer toenemen dan de snelheid van de atomen of moleculen, daar de electronen zeer veel lichter zijn dan de atoomkernen. Deze snellere beweging van de electronen noemt men temperatuurbeweging.

Bereikt een electron met grote snelheid de oppervlakte van het materiaal, dan kan dit electron het materiaal verlaten en al buiten de invloedssfeer van de achterblijvende positieve lading zijn, voordat dit voldoende is afgeremd om, na tot stilstand te zijn gekomen, naar de geleider terug te keren.

Een veel toegepaste methode om energie aan de geleider toe te voeren, teneinde de snelheid van de electronen zo op te voeren, dat deze uit de stof treden, is het toevoeren van warmte. Men brengt het materiaal op hoge temperatuur. Hoe hoger de temperatuur wordt, des te groter zal de snelheid van de electronen worden en des te groter het aantal, dat het materiaal verlaat. Bij kamertemperatuur treedt bijna geen enkel electron uit.

De gloeidraad van een brandende lamp heeft een temperatuur, die hoog genoeg is om vele electronen uit de gloeidraad te doen treden. Het was dan ook bij een gloeilamp, dat Edison het eerst de electronen ontdekte. We kunnen dus zeggen, dat een lichaam waarvan de temperatuur hoog is, electronen uitzendt of met andere woorden electronen emiteert. Het uitzenden van electronen wordt electronenemissie genoemd. Daar deze emissie bij hoge temperatuur plaats vindt, spreekt men van thermische emissie.

In de ballon van een vacuüm gloeilamp (dus een lamp, waarbij de ballon geen lucht of ander gas bevat en luchtledig genoemd kan worden), bevinden zich een groot aantal door de gloeidraad uitgezonden electronen. Deze electronen vormen als het ware een wolk om de gloeidraad heen. Men spreekt ook van electronenwolk. Daar de electronen een negatief electrische lading bezitten, vormen zij tezamen een negatief geladen wolk, men spreekt dan van ruimtelading.

De electronen stoten elkaar af (gelijksoortige electrische ladingen), dus worden de electronen, die later worden geëmitteerd, teruggestoten door de electronen, die vroeger werden geëmitteerd, terwijl de electronen tevens teruggetrokken worden door de positief achtergebleven gloeidraad. Er worden dus electronen weer naar de gloeidraad teruggedreven zodat ze weer in de gloeidraad komen.

Daar de gloeidraad, dank zij de hoge temperatuur, doorgaat met emitteren, wordt een evenwichtstoestand verkregen, waarbij evenveel electronen naar de gloeidraad worden teruggedreven als de gloeidraad emitteert.

Als we enige electronen uit de ballon zouden nemen, dan zou de bovenbedoelde evenwichtstoestand worden verbroken. Daar het aantal electronen, dat zich in de ruimtelading bevindt, even wordt verminderd, zullen minder electronen naar de gloeidraad terugkeren en zal de emitterende gloeidraad na korte tijd de evenwichtstoestand weer hebben hersteld. Gedurende deze korte tijd krijgt de gloeidraad dus minder electronen terug als hij uitzendt. We kunnen dus zeggen, dat ten gevolge van het wegnemen van enige electronen uit de ballon, de gloeidraad evenveel electronen meer gaat leveren als we wegnemen.

Om een bepaalde stof op een zodanige temperatuur te brengen, dat er emissie optreedt, is dus een hoeveelheid warmte nodig. Voor de ene stof is meer warmtetoevoer nodig als voor een andere stof om tot emitteren te komen.

Aanvankelijk zouden we denken, dat die stof het eerst in aanmerking komt, welke bij de kleinste warmtetoevoer reeds emitteert.

Er zijn echter nog andere factoren, die bij de keuze van de materiaalsoort een rol spelen: In de eerste plaats is dit de smelttemperatuur van het materiaal. De smelttemperatuur moet voldoende ver boven de emissietemperatuur liggen om het emitterende lichaam zijn vorm te doen behouden.

In de tweede plaats is het de grootte van de emissie, welke de stof kan leveren.

De metalen natrium, kalium, rubidium en caesium zijn ondanks het feit, dat deze stoffen een lage emissietemperatuur hebben, practisch onbruikbaar, daar hun smeltpunt te laag ligt en de verdampingssnelheid te groot is. Ook de metalen zirconium en platina hebben een nog te laag smeltpunt om ze voor emissie materiaal te gebruiken.

Alleen de metalen met een zeer hoog smeltpunt zoals bijvoorbeeld wolfram, tantaal en molybdeen komen in aanmerking.

Belangrijk voor de keuze van het emitterend materiaal zijn de gedragingen van het materiaal onder invloed van de gassen, welke in de omgeving voorkomen. Gassen als zuurstof, stikstof, kooldioxyde, waterdamp enz. vormen chemische verbindingen met het emitterende materiaal en veranderen het oppervlak hiervan, zodat de emissie achteruitgaat. Zuurstof bijvoorbeeld kan een oxydelaagje op het emitterend materiaal vormen, zodat de emissie nagenoeg ophoudt.

Oplossingen inzenden van de opgaven Ea, nr 1 t/m 4.

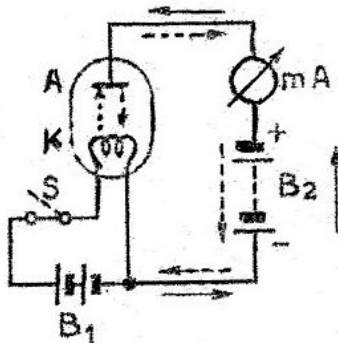
Electronica. Les 21,2. De diode

Fig. 1,1. Diode. K = gloeidraad (kathode); A = plaat (anode); B₁ = gloeistroombatterij; B₂ = anodestroombatterij; S = schakelaar; mA = milli-ampèremeter. De gestippelde pijlen geven de negatieve elektronenstroom aan. De getrokken pijlen geven de positieve elektrische stroom aan.

zich een ruimtelading en een deel van de electronen, welke geëmitteerd werden, wordt nu door de plaat A, welke positief ten opzichte van de gloeidraad is gemaakt door de batterij B₂, aangetrokken. De electronen bewegen zich naar A en treden in het materiaal van de plaat. Deze electronen vloeien vervolgens door de draad, buiten de ballon, de mA-meter, de batterij B₂ naar de gloeidraad terug om daar weer opnieuw geëmitteerd te worden.

Het orgaan, dat de electronen emitteert, wordt in het algemeen kathode genoemd, terwijl de plaat A de naam anode draagt.

De electronen doorlopen dus een gesloten baan van kathode door de ballon naar de anode, van anode buiten de ballon door de draad, meter en batterij B₂ terug naar de kathode enz. Deze electronenstroom is door de gestippelde pijlen in fig. 1,1 aangegeven.

Daar de electronenstroom een verplaatsing van negatieve lading is, zeggen we, dat de positieve elektrische stroom in de tegengestelde richting vloeit, aangegeven door de getrokken pijlen.

Dat er inderdaad een elektrische stroom vloeit, zien we op de meter, de wijzer vertoont een uitslag. Daar een elektrische stroom alleen maar kan vloeien in een gesloten keten, maakt het gedeelte tussen anode en kathode van de gloeilamp deel uit van de stroomketen. De ballon was luchtledig, dus een koude kathode zou een verbreking van de keten betekenen. Dank zij de emissie van de kathode treedt door dat luchtledige gedeelte een stroom op.

We moeten echter wel bedenken, dat in de ballon de electronen alleen van kathode naar anode kunnen vloeien, dus de elektrische stroom alleen van anode naar kathode. In de ballon kan dus slechts in één richting stroom vloeien.

Op de volgende wijze kunnen we het bovenbedoelde verschijnsel praktisch benutten.

We brengen in de ballon een metalen plaat aan, die met een draad is verbonden, die door het glas heen naar buiten is gevoerd (zie fig. 1,1). Van een batterij B₂ wordt de negatieve pool met de gloeidraad en de positieve pool met de draad, dus met de plaat verbonden. Om te kunnen waarnemen, wat er gebeurt, schakelen we een milli-ampèremeter in serie met de batterij. Met behulp van deze mA meter kunnen kleine stroompjes, van enige mA, worden afgelezen. De gloeidraad moet op hoge temperatuur gebracht worden. We veronderstellen gemakshalve, dat dit plaats vindt met behulp van een batterij B₁.

Zolang de schakelaar S niet gesloten is, blijft de gloeidraad koud, want er treedt geen stroom op. Nu vloeit in de keten, waarin de mA-meter is opgenomen geen stroom; de meter blijft nul aanwijzen.

Zodra de schakelaar gesloten wordt, zal de gloeidraad licht gaan geven dit wil zeggen, deze heeft een hoge temperatuur gekregen. Rond de gloeidraad vormt

Wanneer men een luchtledige ballon, waarin zich een kathode en een of meer naar buiten uitgevoerde geleiders bevinden een electronenbuis. De hier beschouwde buis wordt de twee-electrodenbuis of diode genoemd.

1.3. Direct en indirect verhitte kathodes

In de eerste electronenbuizen, die in de radiotechniek werden toegepast, werd voor de emissie van electronen gebruik gemaakt van een gloeiende metalen draad. Als materiaal paste men wolfram toe, een materiaal, dat ook voor gloeidraden van gloeilampen wordt gebruikt. Het vermogen van een zuiver metaal om electronen te emitteren is echter vrij beperkt. Het moet tot een hoge temperatuur (wit gloei-hitte) worden verhit om voldoende emissie op te leveren. Dank zij de hoge temperatuur gaven de gloeidraden vrij veel licht en was het dus geen wonder, dat men in die tijd sprak van radiolampen in plaats van de tegenwoordige naam: radiobuizen. Men gebruikte wolfram, omdat dit een zeer hoog smeltpunt heeft (3370 °C) en dus zonder grote bezwaren tot een hoge temperatuur kan worden verhit. Om die hoge temperatuur te verkrijgen heeft men echter een grote gloeistroom nodig en het spreekt vanzelf, dat men getracht heeft, materialen te vinden, die in staat zijn om bij een lagere temperatuur voldoende electronen te emitteren.

Een middel hiertoe is het toevoegen van een geringe hoeveelheid thoriumoxyde (een verbinding van zuurstof met het metaal thorium) aan het wolfram. Volgens een andere methode wordt de gloeidraad bedekt met een dun laagje van een stof, die bij lagere temperatuur dan het materiaal van de gloeidraad, voldoende emissie levert. De meest gebruikte stoffen hiervoor zijn bariumoxyde en strontiumoxyde (verbindingen van zuurstof met de metalen barium en strontium). De gloeidraad behoeft nu niet meer tot een zo hoge temperatuur te worden verhit en kan ook uit een ander materiaal worden gemaakt als wolfram (bv. nikkel).

De benodigde gloeistroom is nu ook veel lager, wat van veel belang is, wanneer de gloeistroom door een batterij (veelal een accumulatorenbatterij) wordt geleverd. De accumulator behoeft dan minder vaak te worden geladen en een eventuele droge batterij minder vaak te worden vervangen.

Het laden van de gloeistroomaccu of het vervangen van een droge gloeistroombatterij kan worden vermeden, indien de gloeidraad met wisselstroom kan worden gevoed, die van het wisselstroomnet, dat doorgaans wel aanwezig is, met behulp van een transformator kan worden verkregen. Een transformator is in het algemeen nodig, omdat de spanning welke voor de gloeidraden gebruikt wordt, veel lager is dan die van het net.

Met een electronenbuis, die is ingericht voor gloeidraadvoeding met een accu, is het zonder meer niet mogelijk deze te voeden met wisselstroom. De wisselstroom verandert sterk in waarde en wordt zelfs tweemaal per periode nul. De temperatuur van de gloeidraad zal eveneens tweemaal per periode nagenoeg tot nul dalen. Dit betekent dus, dat bij een wisselstroom van 50 Hz de gloeidraad 100 maal per seconde zal doven en dus evenveel per seconde veel minder gaan emitteren, waardoor dus ook veranderingen ontstaan in de stroom, welke de anodekoten voert.

Men heeft voor de voeding van gloeidraden met wisselstroom twee oplossingen gevonden, namelijk door de dikke gloeidraad of een afzonderlijk emitterend lichaam te gebruiken.

- a. Het construeren van electronenbuizen met een tamelijk dikke gloeidraad. Bij een dikke gloeidraad zal het iets langer duren, voordat deze een bepaalde temperatuur heeft gekregen dan bij een dunne gloeidraad. Het zal bij de dikke gloeidraad ook langer duren, voordat deze afgekoeld is. De dikke gloeidraad heeft, dank zij het grotere volume, een grotere warmtecapaciteit. Ondanks het feit, dat de gloeistroom tweemaal per periode nul wordt is de tijd te kort om de gloeidraad veel te doen



afkoelen en blijft de temperatuur hoog genoeg om de emissie normaal te doen doorgaan en dus wordt de stroom in de HILVERSUM anodeketen ook niet noemenswaard veranderd. In figuur 1,2 is een en ander grafisch weergegeven.

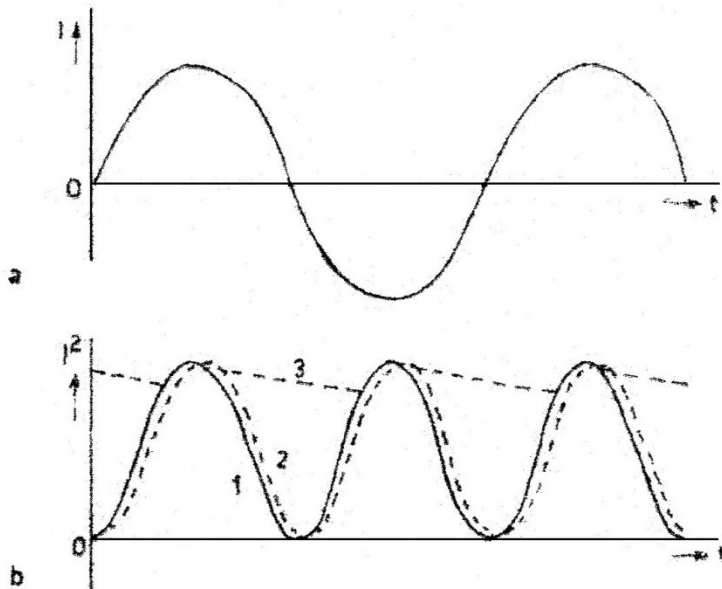


Fig. 1,2. Temperatuursverloop van een gloeidraad.

Het verloop van het kwadraat der momentele stroomwaarde is in fig. 1,2b door grafiek 1 weergegeven. (Zie hiervoor ook de fig. 1,13, Wt.) Deze figuur geeft dus ook een indruk hoe de warmte-ontwikkeling in de gloeidraden verandert.

Veronderstellen we een zeer dunne gloeidraad, dan zal bij toename van de warmte-ontwikkeling de temperatuur der draad ook direct stijgen en bij afname der warmte-ontwikkeling de temperatuur direct dalen. De temperatuur der gloeidraad volgt dan de grafiek 2 in fig. 1,2b. We veronderstellen hierbij, dat de stroom voor het getekende tijdstip $t = 0$ al enige tijd optrad.

Maken we de gloeidraad dik, dat wil zeggen, deze heeft een grote warmtecapaciteit, dan zal, ook alweer als de stroom al enige tijd voor het tijdstip $t = 0$ heeft gevloeid, de temperatuur van de gloeidraad verlopen als de grafiek (3) in fig. 1,2b. De temperatuur zal nu minder snel op de veranderingen in de warmteproductie reageren en het blijkt, dat de temperatuur een meer constante waarde behoudt.

Voor het verwarmen van een dikke gloeidraad is natuurlijk een grote stroom nodig, doch daar deze nu door het lichtnet kan worden geleverd, is dit geen bezwaar. Deze gloeidraad wordt natuurlijk weer bedekt met een materiaal dat gemakkelijk elektronen emitteert bij een niet te hoge temperatuur. Een boven omschreven uitvoering van het emitterend orgaan noemt men direct verhitte kathode.

- b. Een meer toegepaste methode is de volgende. De elektronen worden niet geëmitteerd door de gloeidraad zelf, maar door een dun metalen buisje, dat van binnen door de gloeidraad wordt verwarmd. Aan de buitenzijde wordt dit buisje bedekt door een dun laagje emitterend materiaal. De gloeidraad

Vloeit door de gloeidraad een sinusvormige wisselstroom, zoals fig. 1,2a dit weergeeft, dan kunnen we de elektrische energie, welke de stroom veroorzaakt, op ieder moment bepalen door de momentele waarde van de stroom in het kwadraat te vermenigvuldigen met de weerstand van de gloeidraad, dus I^2R .

Deze energie wordt volledig omgezet in warmte, dus is de warmteproductie in de gloeidraad ook evenredig met I^2R . Daar R voor alle waarden van de stroom constant gedacht wordt, kunnen we dus ook zeggen, dat de warmte-ontwikkeling evenredig is met de momentele waarde van de stroom in het kwadraat.

maakt geen electrisch contact met het buisje en moet dus geheel met isolatiemateriaal worden bedekt. De warmte moet nu eerst dit isolatiemateriaal doorlopen, alvorens het buisje te verwarmen. Hierdoor duurt het na het inschakelen steeds even (10 a 30 sec), voordat dit type electronbuis "warm" is.

Het dunne metalen buisje, dat als drager van de emitterende laag dienst doet, noemt men de kathode; en spreekt men in dit geval van een indirect verhitte kathode. Kortheidshalve spreekt men ook van direct- en indirect verhitte radiobuizen. De gloeidraad is in de regel binnen de kathode spiraalvormig opgewikkeld en bedekt met een isolatiemateriaal, dat, doordat het voortdurend sterk wordt verhit, aan hoge eisen moet voldoen.

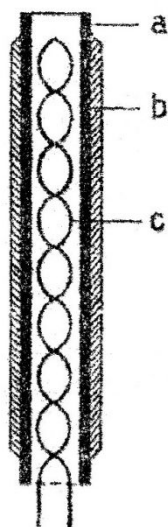


Fig. 1,3. Constructie van een indirect verhitte kathode.
a: metalen buisje;
b: emitterende laag;
c: geïsoleerde gloeidraad.

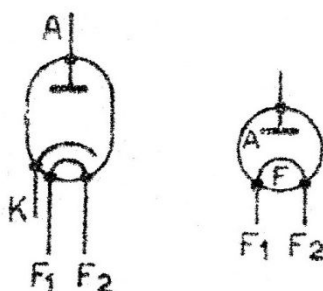


Fig. 1,4. Schemafiguur voor diode. a: indirect verhitte kathode; b: direct verhitte kathode.

In fig. 1,4 is weergegeven, hoe de direct verhitte en de indirect verhitte dioden in radioschema's wordt weergegeven, waarin dan A aansluiting anode, K aansluiting kathode en F₁, F₂ de aansluitklemmen van de gloeidraad betekenen. In gecompliceerde schema's tekent men bij de direct verhitte buis een deel van de gloeidraadleiding en bij de indirect verhitte buis laat men vooral de gehele gloeidraad weg. De schakeling van de gloeidraden geeft men bijvoorbeeld op een afzonderlijke plaats in het schema aan.

Het zal ook duidelijk zijn, dat de emissie geleverd wordt door de kathode en de gloeidraad alleen voor verwarming zorgt.

De electronen komen dus uit de kathode, gaan door de buis naar de anode en van de anode door de geleidende verbinding buiten de buis naar de kathode.

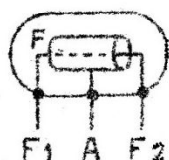
De gloeidraad komt dus niet in het stroomcircuit voor. De anodestroom (electrische stroom) vloeit dus van anode naar kathode en via de buitenketens terug naar de anode.

De kathode, welke gevormd wordt door de buis (meestal van nikkel) heeft een veel groter oppervlak dan de oppervlakte is van de direct verhitte kathode. De emissie kan dus bij een bepaalde temperatuur veel groter zijn dan bij de direct verhitte kathode.

In fig. 1,3 is de constructie van een indirect verhitte kathode geschetst. Door de grote warmtecapaciteit van het geheel (gloeidraad, isolatiemateriaal en kathode) zijn indirect verhitte buizen steeds geschikt om te worden gebruikt met een wisselspanningsbron voor voeding van de gloeidraad. In de meeste gevallen wordt de kathode evenals de andere electroden met een door de glaswand gevoerde draad of pen verbonden. Een indirect verhitte diode telt dus vier aansluitpennen, namelijk twee voor de gloeidraad, een voor anode en een voor kathode.

Electronica. Les 31.4. Constructie van een diode

Een diode bestaat uit een cylindervormige glazen buis, die aan de einden is dichtgesmolten, waarbinnen zich de kathode en de anode bevinden. Een direct verhitte kathode is een recht- of V-vormig uitgespannen gloeidraad, waarvan de beide einden door het glas naar buiten zijn gevoerd. Een indirect verhitte kathode is in 1,3 reeds beschreven. De kathode bevindt zich gewoonlijk in de as van de glazen buis. De anode is in de regel een nikkelcylinder, die de kathode omhult en die met een draad naar buiten is gevoerd. Een direct verhitte diode heeft dus drie, een indirect verhitte diode vier aansluitpunten. De glazen ballon is luchtledig gepompt. Zou er zich lucht of een ander gas in de buis bevinden, dan zouden de electronen botsen tegen de gasmoleculen en daardoor minder gemakkelijk de anode kunnen bereiken. Bovendien zouden door deze botsingen de gasmoleculen kunnen ioniseren, dwz. een electron verliezen, dus een positieve lading verkrijgen. De positieve ionen zouden zich bewegen tegengesteld aan de richting waarin de electronen zich bewegen, ze zouden de kathode bereiken en deze kunnen beschadigen. Bij later te bespreken meer ingewikkelde buizen zullen we nog andere bezwaren van deze ionen ontmoeten. In fig. 1,5 is de constructie van een direct verhitte diode aangeduid.

1.5. De werking van een diode

Wanneer de gloeidraad van een diode door middel van een elektrische stroom tot gloeien wordt gebracht, dan zal zich rondom de kathode een ruimtelading vormen. Een gedeelte der zich daarin bevindende electronen komt op direct verhitte de anode terecht. Is deze geïsoleerd opgesteld, dus niet buiten de buis om met de kathode verbonden, dan zal zij een negatieve lading verkrijgen, daar de electronen de anode niet meer kunnen verlaten. (Hiervoor zou de anode tot emitteren en dus tot gloeiing gebracht moeten worden.)

Is echter de anode geleidend met de gloeidraad verbonden, dan kunnen de electronen langs de verbindingsdraad naar de gloeidraad terugkeren (fig. 1,6). Er zal dus een electronenstroom door deze draad van de anode naar de gloeidraad vloeien en daar men de stroomrichting positief noemt als zij tegengesteld aan de bewegingsrichting van de electronen is, zegt men de elektrische stroom in de verbindingsdraad vloeit van gloeidraad naar anode. Deze stroom kan worden aangetoond door in de verbindingsleiding een micro-ampere-meter op te nemen. Het verschijnsel, dat naar een metalen plaatje, dat in de nabijheid van een gloeidraad in een luchtledige ruimte is opgesteld een electronenstroom optreedt, is het eerst door Edison ontdekt en staat dan ook bekend als het Edison-effect. De stroom, die in fig. 1,6 door de micro-ampere-meter wordt aangewezen, noemt men de anodestroom of plaatstroom.

De anodestroom kan sterk vergroot worden, wanneer men aan de anode een positieve spanning geeft, wat bijvoorbeeld kan gebeuren met behulp van een anodebatterij. Hiervan wordt dan de negatieve pool met de gloeidraad en de positieve pool met de anode verbonden, eventueel via een stroommeter (zie fig. 1,1). Door de positieve spanning, die de anode nu krijgt, zullen de electronen, die zich in de ruimtelading bevinden, worden aangetrokken en als het ware worden "weggezogen". Doordat de ruimtelading verdwijnt, neemt de electronen emissie van de gloeidraad toe, wat dus een vergroting van de anodestroom betekent. Deze stroom zal

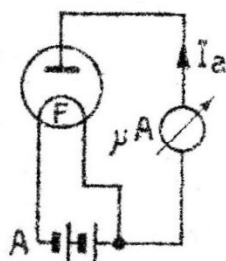


Fig. 1,6. Schakeling voor het waarnemen van het Edison-effect.

A = gloeistroombatterij; I_a = anodestroom.

des te meer stijgen, naarmate de positieve spanning op de anode groter wordt. (In fig. 1,1 is niet meer een micro-ampere-meter, maar een milli-ampere-meter aangegeven.)

Wanneer men echter de anodespanning steeds verder laat stijgen, zal de anodestroom niet steeds blijven toenemen. Het vermogen van een gloeidraad om electronen te emitteren is begrensd. Bij een bepaalde temperatuur kan de gloeidraad slechts een bepaalde hoeveelheid electronen leveren. Deze hoeveelheid electronen, de emissiewaarde van de gloeidraad, kan vergroot worden door deze een hogere temperatuur te geven. Is eenmaal de emissiegrens bereikt, dan heeft een verdere verhoging van de anodespanning geen toename van de anodestroom ten gevolge. We zeggen dan, dat de verzadiging optreedt. De verzadigingsgrens ligt dus hoger naarmate de temperatuur van de gloeidraad hoger is, hetgeen men met een grotere gloeistroom kan bereiken.

Wordt aan de anode een spanning gegeven, die negatief is ten opzichte van de gloeidraad (de batterij met de negatieve pool aan de anode en de positieve pool aan de kathode verbinden), dan zal de anodestroom afnemen, doordat de electronen door de anode worden afge-stoten. Wordt de negatieve spanning op de anode steeds groter gemaakt, dan wordt de anodestroom geheel onderdrukt. De anodestroom kan in de diode niet van gloeidraad naar anode vloeien; hiervoor zou de anode electronen moeten uitzenden, dus emitteren en dus op hoge temperatuur moeten zijn. Bij de gebruikelijke diodes is een negatieve anodespanning van ongeveer 1,5 V reeds voldoende om de anodestroom praktisch geheel te onderdrukken.

Bij diodes met een direct verhitte kathode (wolframgloeidraad) kan het verzadigingsverschijnsel goed worden waargenomen. Bij de tegenwoordig gebruikelijke diodes met indirect verhitte kathode is dit anders. Daar is de verzadigingsstroom zeer groot en is de buis gewoonlijk reeds beschadigd en onbruikbaar geworden voor de anodespanning zo ver is opgevoerd, dat de verzadigingsstroom is bereikt. De electronen, die de anode bereiken, botsen met een zekere snelheid tegen de anode. Daardoor wordt de anode verwarmd. Het vermogen, waarmee de anode op deze wijze wordt verwarmd, is het vermogen, dat de anodebatterij levert, dus gelijk aan het product van anodespanning en stroom. Het materiaal, waarvan de anode is vervaardigd, bevat insluitels van lucht. Door de temperatuursverhoging komt deze lucht vrij, waardoor het vacuüm van de ballon slecht wordt. Hierdoor wordt de buis onbruikbaar. Tenslotte zal er zoveel lucht in de ballon vrij zijn gekomen, dat in de buis zogenaamde gasontlading optreedt met een zachtblauwe kleur.

De warmte, welke op de anode wordt ontwikkeld, komt daar tot stand tengevolge van de electronenstroom door de buis. Anders gezegd heeft de elektrische stroom door de buis de warmte-ontwikkeling op de anode tot gevolg. Op de anode wordt dus elektrische energie omgezet in warmte. We noemen dit verschijnsel in de buis anodedissipatie (dissipatie is verkwisting). De elektrische energie, welke gedissipeerd wordt, wordt geleverd door de batterij, welke in de anodeketen voorkomt. De warmte-ontwikkeling op de anode mag een bepaalde grens niet overschrijden, daar de anode dan zou worden beschadigd. Op de anode mag niet meer warmte worden ontwikkeld als door de anode zonder schadelijke gevolgen kan worden uitgestraald of afgevoerd. Ook de elektrische energie, welke op de anode mag worden omgezet, mag dus een bepaalde grens niet overschrijden en de keuze van de spanning van de anodebatterij is dus ook beperkt.

1.6. De karakteristiek van een diode

In het voorgaande hebben we reeds gezien, dat de anodestroom van een diode afhangt van twee factoren, namelijk van de temperatuur van de kathode en van de anodespanning. We veronderstellen eerst, dat de kathode van onze diode een direct verhitte wolfram-gloeidraad is. De diode is geschakeld volgens fig. 1,7. De anodespanning kan worden ingesteld met het veranderlijke contact op de weerstand R , die verbonden is met de anodebatterij B_2 . Een dergelijke schakeling noemt men een spanningsdeler of potentiometer. De anodespanning lezen we af op de voltmeter V en de anodestroom op de milli-ampere-meter mA . De anodestroom vloeit nu van anode door de buis naar kathode, van de kathode door de batterij B_2 , het bovendeeel van de weerstand R , via het schuifcontact en de mA -meter terug naar de anode.

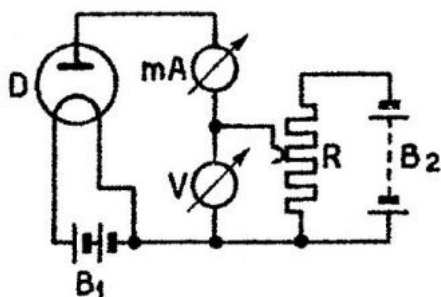


Fig. 1,7. Schakeling voor het opnemen van de karakteristiek van een diode.

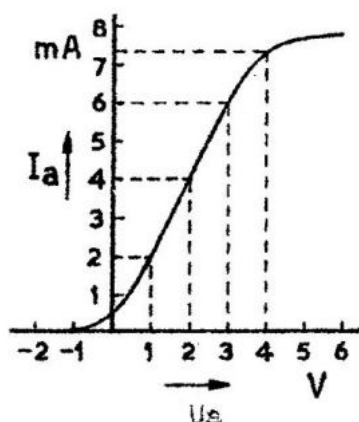


Fig. 1,8. Karakteristiek van een diode. U_a = anodespanning; I_a = anodestroom.

We geven de anodespanning aan met de letters U_a en de anodestroom met de letters I_a .

We gaan nu de anodestroom, welke op de mA -meter wordt afgelezer, bij verschillende waarden van U_a in een grafiek weergeven.

Daartoe tekenen we twee assen loodrecht op elkaar (zie fig. 1,8). Langs de horizontale as zetten we de anodespanning U_a uit. We kiezen langs deze as de eenheid van lengte welke dan de spanning van 1 volt aangeeft en geven vervolgens langs de as op onderling gelijke afstanden de spanningen 2, 3, 4 enz. volt aan. In het snijpunt van de assen ligt het nulpunt van de spanning. Links van het nulpunt geven we op gelijke wijze de spanningen - 1, - 2, - 3 enz. volt aan. De verticale as verdelen we in een zeker aantal milli-amperes.

Plaatsen we het contact, de loper, van de weerstand R geheel aan het onderste eind van de weerstand, dan is de anodespanning nul; de meter V wijst niets aan. De stroom die de buis voert, lezen we af op de mA meter; deze wijst 0,5 mA aan. Deze stroomwaarde tekenen we aan op de verticale as.

Vervolgens plaatsen we de loper zo, dat de meter V 1 volt aanwijst. De stroom, welke de buis voert, zal nu groter zijn. De waarde hiervan (2 mA) tekenen we op, door vanuit de waarde 2 mA een horizontaal lijntje en vanuit de spanning 1 volt een verticaal lijntje te tekenen. Het snijpunt geeft ons dan het verband aan tussen de anodespanning en de

daarbij optredende stroom. We schuiven de looper nu iets meer omhoog, totdat de voltmeter 2 volt aanwijst. De anodestroom, welke nu 4 mA wordt ondersteld, lezen we af en tekenen het betreffende punt door een horizontaal lijntje uit 4 mA en een verticaal lijntje uit 2 V te trekken. Zo kunnen we de anodespanning steeds verhogen en dan blijkt, dat bij een anodespanning van ongeveer 5 volt, de anodestroom ongeveer 8 mA is geworden. Een verdere stijging van de anodespanning heeft geen verdere toename van de anodestroom tengevolge. De verzadigingsstroom blijkt hier dus 8 mA te zijn. Indien we de batterij B_2 omkeren, dan zijn we in staat de anodespanning negatief ten opzichte van de kathode te maken. Bij een negatieve anodespanning van - 1 volt blijkt de anodestroom nul te zijn. We zeggen nu de buis is dicht.

Door de gevonden punten door een lijn te verbinden, verkrijgen we de karakteristiek, welke het verband tussen U_a en I_a bij de diode aangeeft. De karakteristiek is nu onder te verdelen in drie delen; het gedeelte waarvoor de anodespanning kleiner is dan ongeveer 3 volt, het gedeelte waarvoor de anodespanning tussen 3 en 5 volt ligt en het gedeelte waarvoor de anodespanning groter is dan 5 V.

In het eerste gedeelte, U_a kleiner dan 3 volt, het ruimteladingsgebied, is de anodestroom sterk afhankelijk van de anodespanning en is de stroom te berekenen uit de formule van Langmuir.

$$I_a = K U_a^{\frac{3}{2}}$$

Hierin is K een constante, die bepaald wordt door de constructie van de buis. In deze formule is geen rekening gehouden met de snelheid waarmee de electronen uit de kathode treden. Dat bij kleine negatieve waarde van de anodespanning reeds anodestroom optreedt is een gevolg van deze uittreedsnelheid.

In het verzadigingsgebied (U_a groter dan 5 volt) is de anodestroom onafhankelijk van de anodespanning. In dit gebied worden de electronen, die de kathode verlaten, zo sterk door de anode aangetrokken, dat zij allen de anode bereiken. De anodestroom is dan afhankelijk van het aantal electronen, dat de kathode kan emitteren, dus afhankelijk van het materiaal, waarvan de kathode is vervaardigd en de temperatuur daarvan, dus van de gloeidraadstroom.

In fig. 1,9 hebben we enkele karakteristieken van een diode met wolframgloeidraad, voor verschillende waarden van de temperatuur van de gloeidraad, weergegeven. Hoe hoger de temperatuur, des te groter de verzadigingsstroom.

Bij de tegenwoordige indirect verhitte kathodes wordt het gebied van de verzadigingsstroom niet bereikt. Bij het opvoeren van de anodespanning is de buis reeds beschadigd voor de verzadigingsstroom is bereikt.

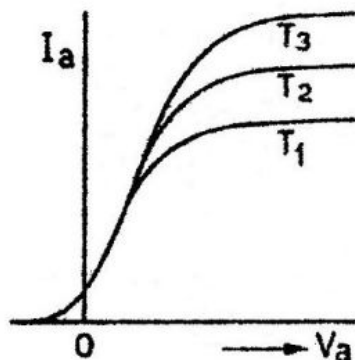


Fig. 1,9. Karakteristieken van een diode met wolframkathode bij verschillende temperaturen.

Electronica. Les 51.7. Steilheid en inwendige weerstand van een diode

In fig. 1,8 zien we, dat bij de diode, waar deze karakteristiek betrekking op heeft, de anodestroom begint te vloeien als $U_a = -1$ volt. Tussen -1 V en 0 V neemt I_a langzaam toe tot $0,5$ mA.

Wordt de anodespanning positief, dan neemt I_a aanvankelijk steeds sneller toe; de karakteristiek wordt geleidelijk steiler bij toename van U_a van 0 V tot $+1$ V. Tussen $U_a = +1$ V en $U_a = +3$ V is de karakteristiek vrijwel recht. Wordt U_a nog groter dan gaat de kromme steeds minder steil verlopen. Bij waarden van U_a groter dan $+5$ V verloopt de kromme horizontaal. De verzadigingsstroom is ongeveer 8 mA.

We zien, dat de toename van U_a van 0 tot $+1$ V een anodestroomtoename van $1\frac{1}{2}$ mA en de toename van U_a van $+1$ tot $+2$ volt een anodestroomtoename van 2 mA ~~toegevolg~~ heeft. Dat bij deze gelijke toenamen van U_a geen gelijke anodestroomtoenames optreden, is een gevolg van de kromming van de karakteristiek. Naarmate de karakteristiek steiler verloopt, zal bij een anodespanningstoename van 1 V de anodestroom meer stijgen.

We voeren nu in, de steilheid van de diodekarakteristiek, korthedshalve de steilheid van de diode, aangeduid met de letter S . Onder de steilheid van de diode wordt verstaan de verhouding van de anodestroomverandering en de bijbehorende anodespanningsverandering.

Daar de karakteristiek in fig. 1,8 tussen $U_a = +1$ V en $U_a = +3$ V recht verloopt, mogen we in dit gebied de steilheid bepalen door de anodestroomverandering van 4 mA (van 2 tot 6 mA) te delen door de anodespanningsverandering van 2 V. Dus $S = \frac{4 \text{ mA}}{2 \text{ V}} = 2 \text{ mA/V}$.

In de gebogen delen van de karakteristiek mogen we, indien we met enige nauwkeurigheid de steilheid willen bepalen, geen grote veranderingen van U_a en I_a gebruiken. In dit geval verkrijgen we de steilheid nauwkeuriger, naarmate de veranderingen van U_a en I_a kleiner gekozen worden. Een kleine verandering van I_a en U_a duiden we aan met de griekse hoofdletter delta voor U_a of I_a te plaatsen. De hoofdletter delta wordt aangegeven met het teken Δ . De steilheid wordt dan als volgt aangegeven. $S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_a} \text{ mA/V}$. We spreken dit uit: de steilheid van de diode is delta I_a gedeeld door delta U_a .

Het meest nauwkeurig kunnen we de steilheid bepalen door in het punt, waar we de steilheid wensen te kennen, een raaklijn aan de kromme te tekenen. Immers in elk punt van de gebogen karakteristiek is de steilheid weer anders. Een raaklijn aan een kromme is een rechte lijn, die slechts één punt met de kromme gemeenschappelijk heeft. De steilheid van de raaklijn is dus ook de steilheid van de karakteristiek in het raakpunt. Wensen we de steilheid in punt P van de karakteristiek volgens fig. 1,10 te bepalen, dan tekenen we de raaklijn AP. De loodlijn PB uit P op de horizontale as neergelaten, geeft de grootte van de anodestroom in het raakpunt aan. De steilheid van de raaklijn, dus ook die van de karakteristiek en punt P, is nu bepaald door de anodestroomverandering PB te delen door de bijbehorende anodespanningsverandering AB. Dus de steilheid in punt P is $S = \frac{PB}{AB} \text{ mA/V}$.

De steilheid kunnen we ook uitdrukken in de hoek φ , welke de raaklijn vormt met de horizontale as en wel in de tangens van hoek φ . De steilheid kan dus ook worden uitgedrukt als $S = \text{tg } \varphi = \frac{PB}{AB} = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_a} \text{ mA/V}$.

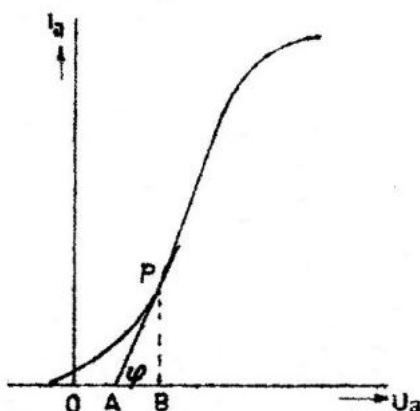


Fig. 1,10. Bepaling steilheid van een diode.

ring en kleine anodestroomverandering. Dus $R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \Omega$. Daar de karakteristiek een gebogen lijn is, is dus in elk ander punt de inwendige weerstand anders. We zien, dat de inwendige weerstand van de diode het omgekeerde is van de steilheid.

Is de diode in verzadigingstoestand, dan zal de inwendige weerstand van de diode oneindig groot zijn, daar een anodespanningsverandering geen anodestroomverandering tot gevolg heeft.

Het activeren van de oxydekathoden:

Bij de moderne buizen wordt de emitterende laag met een dikte van 20 - 80 micron (1 micron = 10^{-4} cm), op de metalen draad of het buisje aangebracht. Men gebruikt hiervoor een mengsel van barium- en strontiumcarbonaten. De op deze wijze gevormde kathoden noemt men oxydekathoden. De gloeidraad is dan meestal gemaakt van wolframdraad, nikeldraad of band en het buisje van nikkel. Voordat de oxydekathoden geschikt zijn voor hun functie, dat wil zeggen, een zo groot mogelijke emissie te leveren, moeten zij eerst geactiveerd worden.

Nadat de buis volledig is gemonteerd, vindt het activeren plaats gedurende het pompen en uitbranden van de buis. Het pompen is nodig om de buis zo goed mogelijk luchtledig te maken. Tegelijkertijd worden alle onderdelen van de buis op rode gloei-hitte gebracht en een elektrische stroom door de gloeidraad gezonden, tengevolge waarvan de kathode op hoge temperatuur wordt gebracht ($\pm 1000^\circ \text{C}$). Alle ongewenste dampen, ook die, welke door de hoge verhitting ontstaan, worden nu weggezogen. Hierna wordt de buis dichtgesmolten. Ten slotte moet men de buis nog uitbranden. Dit vindt plaats door de gloeidraad nogmaals op zeer hoge temperatuur te brengen ($\frac{1}{2}$ of 2 maal de normale gloeispanning gebruiken). De emissie wordt opgevoerd door de anode van de diode een positieve spanning ten opzichte van de kathode te geven. De kathode emitteert dan electronen en de emissie wordt gedurende het activeren steeds beter. Na het uitbranden wordt de kathode lange tijd op hoge temperatuur gehouden, waarbij de emissie op lage waarde wordt gehouden door een lage anodespanning te gebruiken. De laatste bewerking om de kathode de gewenste emissiewaarde te geven noemt men "rustbranden".

Oplossingen inzenden van de opgaven Ea, nr 19 t/m 22.

Bepalen we de steilheid van de diode, indien deze in verzadigingstoestand verkeert, dan moeten we bedenken, dat nu de anodestroom niet verandert bij verandering van de anodespanning. De anodestroomverandering $\Delta I_a = 0$, dus is ook de steilheid $S = 0$.

Bij een diode kunnen we ook spreken van een inwendige weerstand. We mogen deze inwendige weerstand echter niet bepalen door zonder meer de anodespanning te delen door de anodestroom.

De inwendige weerstand van een diode is bepaald door het quotiënt van een kleine anodespanningsverande-

Hoofdstuk 2De triode2.1. Constructie en werking van een triode

In het voorgaande hebben we gezien, dat de anodestroom van een diode gewijzigd kan worden door verandering van de anodespanning en door wijziging van de gloeistroom. In de praktijk wordt de mogelijkheid, om de anodestroom te beïnvloeden door verandering van de gloeistroom, niet gebruikt, omdat een dergelijke regeling te traag werkt; er is te veel tijd nodig voor een gloeidraad bij verandering van de stroom de bijbehorende temperatuur heeft aangenomen. Een verandering van de anodespanning doet de anodestroom onmiddellijk veranderen.

Er is echter nog een ander middel, waarmee de grootte van de anodestroom kan worden veranderd. Daartoe wordt in de buis een derde electrode aangebracht, waardoor een buis met drie electroden wordt verkregen. Een dergelijke buis wordt triode genoemd. De meest gebruikelijke vorm voor deze derde electrode is een schroefvormig gewikkelde draad, die door een of meer staafjes wordt gesteund. Dit geheel, het rooster genaamd, wordt tussen de gloeidraad en de anode geplaatst. In fig. 2,1a is de constructie van een triode geschetst; in fig. 2,1b en c stellen de figuurtjes voor, op welke wijze de triode in schakelschema's wordt aangeduid. Het rooster (Engels: grid; Frans: grille) wordt gewoonlijk aangegeven met de letter g. In fig. 2,1a is de anode half weggesneden getekend om de constructie van het rooster te laten zien; in werkelijkheid bestaat de anode, evenals bij de diode, uit een metalen cylindertje, dat het rooster en de gloeidraad omhult.

Het rooster is aan een uiteinde verbonden met een door het glas gevoerde pen of draad. De triode bezit dus vier aansluitpennen: twee voor de gloeidraad, een voor het rooster en een voor de anode. De gloeidraadpennen worden aangegeven met F_1 en F_2 , de roosterpen met g en de anodepen met A.

Evenals bij de diode wordt ook bij de triode een indirect verhitte kathode gebruikt (fig. 1,3). In fig. 2,2 is het schemateken voor een triode met indirect verhitte kathode aangegeven. Een dergelijke triode bezit vijf aansluitpennen.

Worden aan een triode een gloeistroombatterij A en een anodespanningsbatterij B aangesloten, op dezelfde wijze als we dit bij een diode deden, dan zal een zekere anodestroom I_a vloeien. Doordat nu echter tussen anode en gloeidraad het rooster aanwezig is, zal een gedeelte der electronen, die onderweg zijn van kathode naar anode, op het rooster terecht komen. Wordt het rooster buiten de ballon met de gloeidraad verbonden (fig. 2,3), dan zullen deze electronen door deze verbindingsdraad naar de gloeidraad terugkeren. Er vloeit dus door deze draad een stroom, roosterstroom genaamd, van de gloeidraad naar het rooster. Een stroom kan alleen vloeien in een gesloten keten. Voor de roosterstroom wordt de keten gesloten door de ruimte

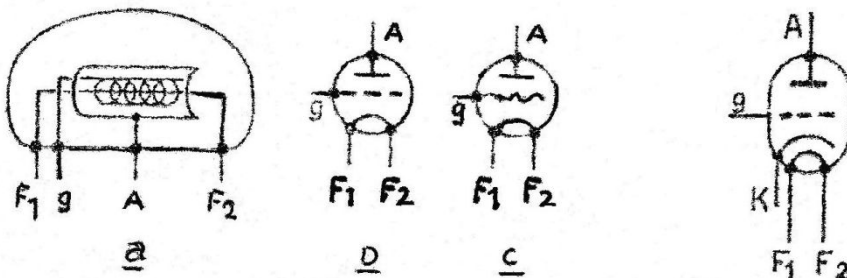


Fig. 2,1. a: Constructie van een triode; b en c: Schematekenen voor een triode.

Fig. 2,2. Schematekenen voor een triode met indirect verhitte kathode.

Evenals bij de diode wordt ook bij de triode een indirect verhitte kathode gebruikt (fig. 1,3). In fig. 2,2 is het schemateken voor een triode met indirect verhitte kathode aangegeven. Een dergelijke triode bezit vijf aansluitpennen.

tussen rooster en gloeidraad binnen in de buis. Deze ruimte tussen rooster en gloeidraad is dus een gemeenschappelijk deel van het roosterstroomcircuit en het anodestroomcircuit.

Het ontstaan van roosterstroom kan worden voorkomen door aan het rooster een negatieve spanning ten opzichte van de gloeidraad te geven. Dit kan geschieden door tussen rooster en gloeidraad een derde batterij, de rooster-spanningsbatterij of roosterbatterij C aan te brengen (fig. 2.4). De positieve pool van deze batterij wordt verbonden met de gloeidraad, de negatieve pool met het rooster. De (negatieve) electronen worden door het rooster afgestoten, waardoor er minder electronen op het rooster terecht komen. Wordt de negatieve roosterspanning voldoende groot gemaakt, dan wordt de roosterstroom

geheel onderdrukt. Tussen de roosterdraden door bereiken nog wel electronen de anode. Wordt aan het rooster een positieve spanning ten opzichte van de gloeidraad gegeven, door de polen van de batterij C te verwisselen, dan worden de electronen door het rooster aangetrokken en zal de roosterstroom groter worden. Daar voor de meeste toepassingen roosterstroom ongewenst is, wordt een triode meestal met een negatieve roosterspanning gebruikt.

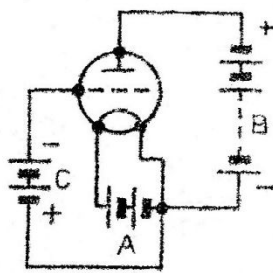
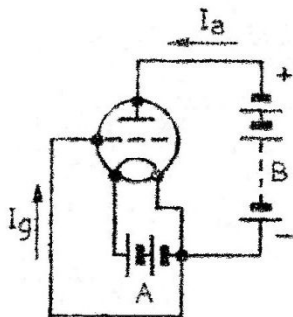


Fig. 2,3. Triode met
gloeistroombatterij
A en anodebatterij B.

Fig. 2,4. Triode met
gloeistroombatterij
A, anodebatterij B
en roosterbatterij C.

Behalve op de roosterstroom heeft de roosterspanning ook invloed op de anodestroom. Doordat de roosterdraden zich dicht bij de gloeidraad bevinden, wordt door een negatieve spanning op

het rooster ten opzichte van de gloeidraad de emissie van electronen tegengewerkt. De electronen, die door de hoge temperatuur van de gloeidraad uit deze draad ontsnappen en een electronenwolk tussen gloeidraad en rooster vormen, kunnen door de afstotende werking van het negatieve rooster moeilijker door de positieve anode door de openingen tussen de roosterdraden heen worden aangetrokken, zodat de anodestroom kleiner wordt. Hoe groter de spanning is van de batterij, die de negatieve roosterspanning levert, des te kleiner is de anodestroom. Bij een voldoende grote waarde van de negatieve roosterspanning vloeit er in het geheel geen anodestroom meer. Hiervoor is een grotere negatieve roosterspanning nodig dan voor het onderdrukken van alleen de roosterstroom.

Het verkleinen van de negatieve roosterspanning heeft dus op de anodestroom dezelfde invloed als het vergroten van de positieve anodespanning. Doordat het rooster zich dicht bij de gloeidraad bevindt dan de anode, is voor het tot stand brengen van een bepaalde anodestroomverandering een grotere variatie van de anodespanning nodig dan van de roosterspanning. Is bv. bij een triode de anodespanning 200 V, de negatieve roosterspanning - 3 V en de anodestroom 10 mA, en stijgt de stroom tot 12 mA, indien de anodespanning stijgt tot 220 V, dan zullen we dezelfde stroom van 12 mA kunnen verkrijgen bij 200 V anodespanning, door de roosterspanning van - 3 tot - 2 V te laten stijgen.

Electronica. Les 7

2.2. De karakteristieken van een triode

HILVERSUM

We spreken af, dat we onder de anodespanning U_a altijd verstaan: de spanning tussen anode en kathode, waarbij we U_a positief rekenen als de anode positief is ten opzichte van de kathode. Onder de roosterspanning U_g verstaan we de spanning tussen rooster en kathode, waarbij we U_g positief rekenen als het rooster positief is ten opzichte van de kathode. Is, zoals in de praktijk gewoonlijk het geval is, het rooster negatief ten opzichte van de kathode, dan is U_g een negatieve grootte. De positieve richting van de anodestroom I_a is van anode naar de kathode door de buis en van de roosterstroom I_g van rooster naar kathode door de buis. Bij een triode is de anodestroom I_a zowel van de anodespanning U_a als van de roosterspanning U_g afhankelijk. Om de eigenschappen van de triode goed te leren kennen geven we het verband tussen anodestroom I_a en anodespanning U_a of het verband tussen I_a en de roosterspanning U_g in grafieken weer. We noemen de krommen, die het bovengenoemde verband weergeven, de karakteristieken van de triode.

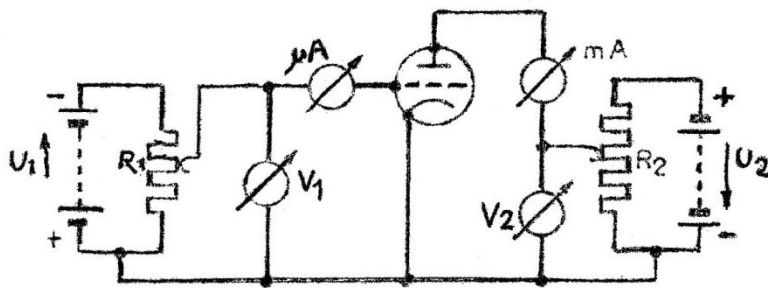


Fig. 2,5. Schakeling voor het opnemen van de karakteristieken van een triode.

In fig. 2,5 is een schakeling weergegeven, waarmee de karakteristieken van een triode opgenomen kunnen worden. In deze schakeling is een indirect verwarmde kathode verondersteld. In schema's tekenen we dan gewoonlijk de gloeidraad niet, daar de gloeistroomkaten alleen dient om de kathode de vereiste temperatuur te geven, doch verder op de schakeling geen invloed uitoefent.

Een batterij met spanning U_1 is aangesloten op een weerstand R_1 , voorzien van een schuifcontact (zogenaamde potentiometer). Hiermede kan de roosterspanning U_g , die wordt aangewezen door de voltmeter V_1 , worden ingesteld. In fig. 2,5 is de batterij zo aangesloten, dat het rooster een negatieve spanning verkrijgt ten opzichte van de kathode. Om het rooster een positieve spanning te geven ten opzichte van de kathode, moeten de aansluitingen van de batterij worden verwisseld. De anodespanning U_a wordt op overeenkomstige wijze verkregen van de batterij met de spanning U_2 . Deze spanning wordt ingesteld met het schuifcontact van de potentiometer R_2 en gemeten met de voltmeter V_2 . In serie met de verbinding met de anode is een milli-amperemeter opgenomen, die de anodestroom I_a aanwijst. Wenst men ook de roosterstroom te meten, dan plaatst men een micro-amperemeter in serie met de leiding naar het rooster. Bij triodes, die in ontvangers worden gebruikt, is de anodestroom hoogstens enkele tientallen milli-amperes; de roosterstroom blijft ver beneden een mA. Daarom nemen we voor het meten van de anodestroom een mA-meter en voor het meten van de roosterstroom een μA -meter. De voltmeter V_1 moet aan die zijde van de μA -meter worden aangesloten, die in fig. 2,5 is aangegeven. Zouden we de voltmeter aan de andere zijde van de μA -meter, dus direct aan het rooster, aansluiten, dan zou de stroom door de voltmeter ook door de μA -meter vloeien. Daar de roosterstroom in de regel kleiner is dan de stroom door de voltmeter, zouden we geheel onjuiste resultaten verkrijgen.

2.3. De anodestroom-roosterspanningskarakteristieken van een triode

Voor het opmeten van een I_a - U_g -karakteristiek, kiezen we eerst de anodespanning, waarbij we de karakteristiek willen opmeten. Gedurende het opmeten van de karakteristiek houden we de anodespanning steeds op de gekozen waarde. Hierdoor verkrijgen we een kromme, die het verband tussen I_a en U_g aangeeft, terwijl voor alle punten van de karakteristiek dezelfde anodespanning geldt.

Voordat we gaan meten, maken we eerst het assenstelsel klaar, waarin de karakteristiek getekend moet worden. We tekenen daartoe twee loodrecht op elkaar staande assen (zie fig. 2,6), en kiezen het snijpunt van de assen als nulpunt voor de roosterspanning op de horizontale as en eveneens als nulpunt voor de anodestroom op de verticale as. We kiezen de schaallengte voor 1 volt roosterspanning en zetten rechts van het nulpunt op de horizontale as enige volts uit, welke dan de positieve roosterspanning aanduiden. Voor het aangeven van de negatieve roosterspanning geven we links van het nulpunt enige volts aan. Op de verticale as nemen we enige milli-amperes aan. Spreken we af, dat we eerst een I_a-U_g -karakteristiek van een triode zullen opmeten bij een anodespanning van 150 V, dan stellen we U_g in op nul volt (schuifcontact onder aan R_1) en stellen het schuifcontact op R_2 zo in, dat de voltmeter V_2 150 V aanwijst. Nu lezen we de anodestroom van de milli-amperemeter af en tekenen deze op in onze figuur. We nemen aan hiervoor 5 mA af te lezen en geven deze waarde loodrecht boven $U_g = 0$, dus op de verticale as aan. Vervolgens stellen we de roosterspanning U_g in op - 1 V; regelen de anodespanning weer op 150 V en lezen opnieuw de mA-meter af. Veronderstel 2,7 mA, deze geven we weer in de figuur aan loodrecht boven $U_g = - 1$ V. Deze handeling herhalen we bij $U_g = - 2$ en - 3 V. Denk er om; bij nieuw ingestelde U_g eerst de anodespanning corrigeren alvorens de mA-meter wordt afgelezen. Bij $U_g = - 3$ V blijkt de anodestroom nul mA te zijn geworden. Bij deze negatieve roosterspanning blijkt het rooster geen electronen meer door te laten in de richting van de anode. We zeggen nu de buis is "dicht". Het punt $U_g = - 3$ V noemt men ook wel het afknijppunt. Dan stellen we de roosterspanning eerst weer op nul volt in; om deze daarna van richting om te keren, verwisselen we de klemmen aan bron U_1 . Het rooster wordt nu positief ten opzichte van de kathode gemaakt. We stellen de U_g op + 1 volt in, corrigeren de anodespanning zodat deze weer 150 volt is en lezen de anodestroom van de betreffende meter af. We geven de stroom (7 mA) in de grafiek aan. Hetzelfde herhalen we bij $U_g = + 2$ V, $U_g = + 3$ V en $U_g = + 4$ V. De aldus verkregen punten verbinden we door een vloeiende lijn en verkrijgen dan de I_a-U_g karakteristiek van de triode bij $U_a = 150$ V.

We zien, dat de karakteristiek een gebogen lijn is; aan de einden sterk gebogen en daartussen min of meer recht. Na het doorlopen van de bovenste bocht wordt de karakteristiek horizontaal. Bij verdere toename van U_g neemt de anodestroom niet meer toe, daar de buis in de verzadigingstoestand is gekomen. De

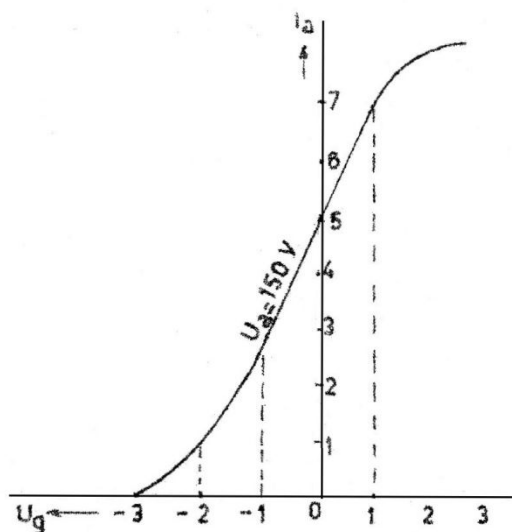


Fig. 2,6. Anodestroom-roosterspanningskarakteristiek van een triode.

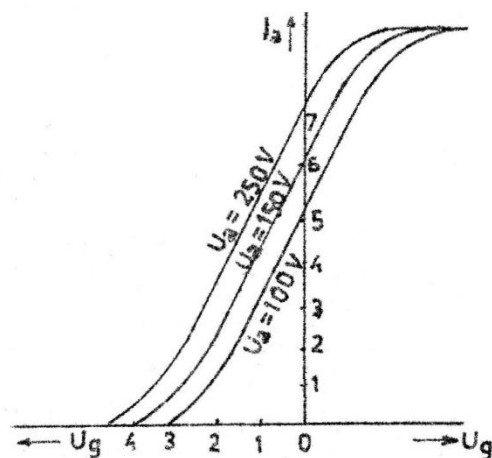


Fig. 2,7. Anodestroom-roosterspanningskarakteristieken van een triode.



waarde van de verzadigingsstroom is bepaald door de emissiewaarde van de kathode (zie ook de diode). De buiging van de karakteristiek voor het bereiken van de verzadigingsstroom is te danken aan het naderen van de verzadigingstoestand. Deze buiging wordt wel aangegeven als verzadigingsbocht. De onderste buiging in de karakteristiek is te danken aan de ruimtelading welke in de buis optreedt. Bij negatieve waarden van de roosterspanning worden de electronen door het rooster tegengehouden en verzamelen zich in de ruimte tussen rooster en kathode. Er vormt zich een ruimtelading. Deze buiging in de karakteristiek wordt wel ruimteladingsbocht genoemd. De negatieve roosterspanning, waarbij de stroom door de buis nul wordt, noemt men de roosterruimte van de buis. De anodestroom welke de buis voert bij nul volt roosterspanning, wordt ruststroom genoemd, en de maximale anodestroom welke de buis kan voeren, duidt men aan met verzadigingsstroom. We kunnen meerdere I_a-U_g -karakteristieken van een triode opnemen. Het verschil tussen de karakteristieken wordt dan bepaald door het verschil in anodespanning. In fig. 2,7 is wederom de karakteristiek volgens fig. 2,6 weergegeven en tevens twee karakteristieken welke op dezelfde wijze als in het voorgaande wordt aangegeven, zijn opgemeten, echter nu met anodespanningen van respectievelijk 200 en 250 volt. We zien, dat de karakteristieken bij hogere anodespanningen als het ware naar links verschuiven. In fig. 2,7 kunnen we duidelijk zien, dat naarmate de anodespanning hoger wordt, de roosterruimte groter wordt. De verzadigingsstroom is onafhankelijk van de anodespanning, dus is bij alle karakteristieken dezelfde. De ruststroom wordt bij toenemende anodespanning ook groter; deze ruststroom kan echter niet groter worden dan de verzadigingsstroom.

2.4. De karakteristieke grootheden van een triode

a. De steilheid

Indien we de roosterspanning U_g van een triode met een klein bedrag ΔU_g veranderen en hierbij de anodespanning constant houden, zal de anodestroom eveneens een kleine verandering ΔI_a ondergaan. Laten we de roosterspanning toenemen (dus minder negatief worden), dan zal de anodestroom toenemen. Laten we de roosterspanning afnemen, dus meer negatief worden, dan zal de anodestroom afnemen.

De verhouding tussen een kleine anodestroomverandering en de daarbij benodigde kleine roosterspanningsverandering bij constante anodespanning wordt de statische steilheid van de buis genoemd.

Duiden we de steilheid aan met de letter S, dan noteren we de steilheid als volgt: $S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g}$ (U_a constant).

Is de anodestroomverandering aangegeven in mA en de roosterspanning in volts, dan wordt de steilheid uitgedrukt in mA/V of indien de stroomverandering gemeten wordt in μA , dan wordt de steilheid in $\mu A/V$ uitgedrukt.

Bepalen we de steilheid van een triode in de karakteristiek volgens fig. 2,8, dan is deze 2 mA/V. De roosterspanningsverandering van - 2 tot - 1, dus $\Delta U_g = 1$ volt, heeft een anodestroomverandering van 4,8 tot 6,8 mA, dus $\Delta I_a = 2$ mA ten gevolge.

Evenals bij de diodekarakteristiek zal ook hier, dank zij het gebogen karakter van de karakteristiek de steilheid in verschillende punten verschillend zijn. Voor een nauwkeurige bepaling van de steilheid is het nodig, de verandering van U_g en I_a zo klein mogelijk te nemen. Nog nauwkeuriger kan dit gebeuren door de steilheid van de raaklijn, die in het punt waar de steilheid bepaald moet worden is getrokken, te bepalen. De steilheid van de raaklijn is gelijk aan de steilheid van de karakteristiek in het raakpunt.

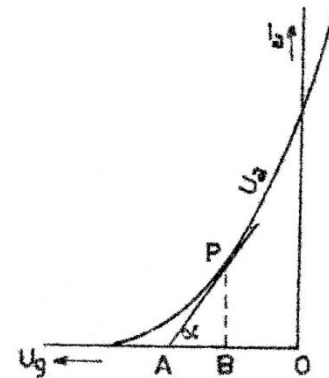
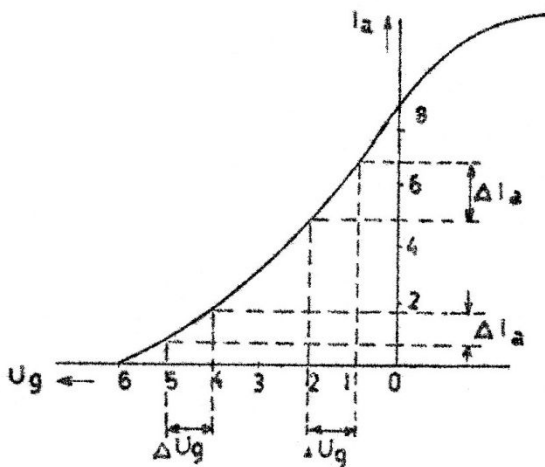


Fig. 2,8. Bepaling steilheid van een triode.

Fig. 2,9. De steilheid uitgedrukt in $\text{tg } \alpha$.

De steilheid van de karakteristiek in punt P (zie fig. 2,9) is nu bepaald door de anodestroomverandering PB gedeeld door de roosterspanningsverandering AB, dus $S = \frac{PB}{AB} \text{ mA/V}$. We kunnen ook hier de steilheid uitdrukken in de hoek α , welke de raaklijn maakt met de horizontale as.

Uit fig. 2,9 is gemakkelijk op te maken, dat $S = \text{tg } \alpha$. We moeten dus goed bedenken, dat indien de steilheid van een karakteristiek gegeven is, deze slechts geldt in één punt en voor één bepaalde anodespanning. Is de buis in verzadigingstoestand, dan is de steilheid nul. Eveneens is de steilheid nul voor een negatieve roosterspanning groter dan de rooster-ruimte, dus links van het afknijppunt.

We kunnen bij de triode dus niet spreken van de steilheid. Als bij een triode een steilheid wordt opgegeven, is dat in het algemeen de steilheid, die met een gunstige instelling kan worden verkregen.

De steilheid wordt zeer veel beïnvloed door de constructie van het rooster. Het rooster kan nl. zo gewikkeld zijn, dat de windingen van de roosterspiraal dicht of minder dicht naast elkaar liggen. Liggen de roosterdraden dicht naast elkaar, dan spreekt men van een rooster met nauwe spoed en anders van een wijde spoed.

Heeft het rooster een nauwe spoed, dan zal de roosterspanning een grotere invloed op de anodestroom hebben, dan indien het rooster gewikkeld is met een wijde spoed. Gaan we uit van de gedachte, dat de anodespanningen van twee trioden, waarvan de ene een rooster heeft met nauwe spoed en de ander een rooster met wijde spoed, gelijk zijn, dan zal de triode met het nauwe rooster een kleinere roosterspanning nodig hebben om de anodestroom nul te doen zijn als de andere triode. De eerste triode heeft dus een kleinere roosterruimte dan de tweede triode. Daar bij roosterspanningen van nul volt de anodestromen gelijk zijn, omdat de anodespanningen gelijk zijn, zal de triode met het rooster met een nauwe spoed een grotere steilheid hebben dan de triode met het rooster met wijde spoed.

Elektronica. Les 8

2.4. De karakteristieke grootheden van een triode (vervolg)

b. De inwendige weerstand van een triode

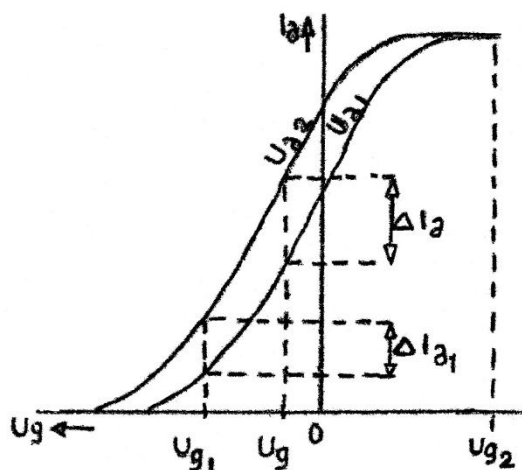


Fig. 2,10 Bepaling van de inwendige weerstand.

bepalen bij een roosterspanning U_{g1} , dan vinden we een grotere inwendige weerstand dan bij de roosterspanning U_g .

De inwendige weerstand is nu bepaald door $R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}$ ($U_g = \text{constant}$).

Daar de karakteristieken gebogen lijnen zijn, is ΔI_{a1} kleiner dan ΔI_{a2} , dus moet de inwendige weerstand bij U_{g1} groter zijn dan bij U_g . Zo zal dus bij elke andere waarde van U_g een andere inwendige weerstand voorkomen. Beschouwen we de rechte gedeelten van de karakteristieken, dan zal de inwendige weerstand bij verschillende waarden van U_g weinig veranderen.

Om de inwendige weerstand zo nauwkeurig mogelijk te bepalen, is het nodig, evenals bij de steilheid, gebruik te maken van kleine veranderingen, dus kleine waarden van ΔU_g en ΔI_a .

Naarmate we de inwendige weerstand bij meer negatieve waarde van de roosterspanning bepalen, verkrijgen we een groteren waarde. Bepalen we de inwendige weerstand bij een zodanige waarde van de positieve roosterspanning, dat de buis in verzadigingstoestand is, dan blijkt, dat een verandering van de anodespanning geen verandering van de anodestroom ten gevolge heeft. De inwendige weerstand is hier dus oneindig groot. Indien we bedenken, dat de inwendige weerstand gebaseerd is op veranderingen van U_a en I_a , dan zullen we inzien, dat de inwendige weerstand oneindig groot kan zijn, terwijl de buis nog stroom voert.

Voor de goede orde geven we nog de definitie voor de inwendige weerstand van een triode.

Onder de inwendige weerstand van een triode wordt verstaan de verhouding van een kleine anodespanningsverandering tot de kleine anodestroomverandering, die daarvan het gevolg is, bij constante waarde van de roosterspanning.

We kunnen de anodestroom ook een kleine verandering ΔI_a doen ondergaan door de anodespanning met een klein bedrag ΔU_a te veranderen en daarbij de roosterspanning U_g onveranderd laten.

In fig. 2,10 zijn twee karakteristieken weergegeven. Bij een bepaalde roosterspanning U_g laten we de anodespanning van U_{a1} toenemen tot U_{a2} . Deze anodespanningstoename duiden we aan met ΔU_a . Ten gevolge van de toename van ΔU_a zal de stroom met het bedrag ΔI_a toenemen. De inwendige weerstand van de triode is nu bepaald door:

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \quad (U_g = \text{constant}).$$

Daar de anodespanning in volts en de stroom in ampère is uitgedrukt, is de inwendige weerstand in ohms uitgedrukt.

Zouden we de inwendige weerstand

R.T.

20 Ea

c. De versterkingsfactor van een triode

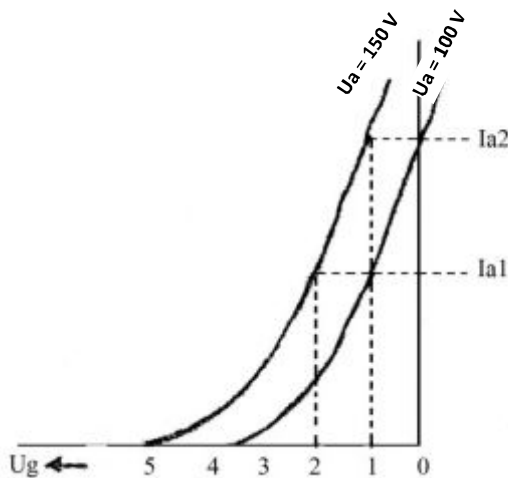


Fig. 2,11. Bepaling van de versterkingsfactor.

anodespanningsverandering ΔU_a en een kleine roosterspanningsverandering ΔU_g bij constante waarde van de anodestroom.

Dus $g = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_g}$ ($I_a = \text{constant}$).

In het gekozen voorbeeld volgens fig. 2,11 is de versterkingsfactor $g = \frac{50}{1} = 50$. Daar we hier volts delen door volts is de versterkingsfactor dus onbenoemd. Bij een nauwkeurige bepaling van de versterkingsfactor moeten we ook weer gebruik maken van een zo klein mogelijke verandering, dus kleine waarden van ΔU_a en ΔU_g .

d. Formule van Barkhausen

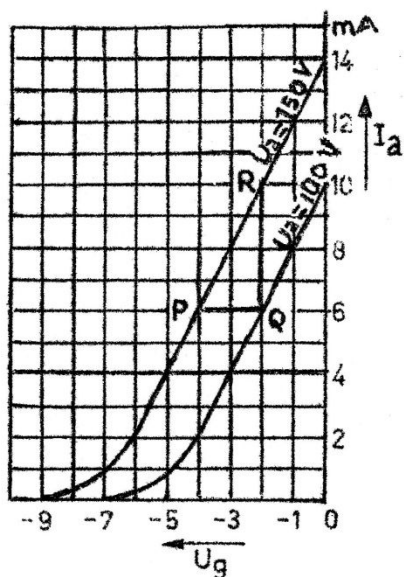


Fig. 2,12 Bepaling formule van Barkhausen.

Indien we bij $U_g = -1$ volt de anodespanning van 100 V laten toenemen tot 150 V, dan zal dit een stijging van de anodestroom ten gevolge hebben van I_{a1} tot I_{a2} . De roosterspanning moeten we van -1 V tot -2 V veranderen om de stroom weer tot I_{a1} te doen afnemen.

Laten we de verandering van U_a en U_g tegelijkertijd plaatsvinden, dan zal de stroom niet veranderen en dus I_{a1} blijven.

We zien, dat de toename van de anodespanning, $\Delta U_a = 50$ V, een even grote invloed op de anodestroom heeft als de toename van de negatieve roosterspanning $\Delta U_g = 1$ volt. Of omgekeerd geredeneerd: om een zekere anodestroomverandering tot stand te brengen, heeft men een grotere anodespanningsverandering dan een roosterspanningsverandering nodig.

Onder de versterkingsfactor g of μ van een triode wordt verstaan de verhouding van een kleine

anodespanningsverandering ΔU_a en een kleine roosterspanningsverandering ΔU_g bij constante waarde van de anodestroom.

In fig. 2,12 zijn enige karakteristieken van een triode getekend. Uit de driehoek PQR kunnen we afleiden dat $S = \frac{4 \text{ mA}}{2 \text{ V}} = 2 \text{ mA/V} = 0,002 \text{ A/V}$, $R_i = \frac{50}{4 \cdot 10^{-3}} = 12500$ en $g = \frac{50}{2} = 25$.

Indien we deze uitkomsten eens goed beschouwen, dan blijkt, dat:

$$0,002 \times 12500 = 25 \text{ of } g = S \times R_i$$

Dit is geen toeval, maar geldt altijd.

Om dit in te zien, het volgende:

We gaan de verhoudingen voor S en R_i met elkaar vermenigvuldigen:

$$\frac{\Delta I_a}{\Delta U_g} \times \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_g}$$

Hieruit blijkt, dat in algemene zin geldt:

$$g = s \times r_i.$$

Dit wordt de formule van Barkhausen genoemd.

Elektronica. Les 9

2.5. De anodestroom-anodespanningskarakteristieken van een triode

In het voorgaande hebben we de I_a - U_g -karakteristieken van een triode beschouwd. In deze karakteristieken werd de anodestroom bij verschillende waarden van de roosterspanning bij constante anodespanning opgenomen.

We kunnen ook karakteristieken van een triode opnemen, waarbij de anodestroom wordt opgetekend bij constante roosterspanning en bij verschillende waarden van de anodespanning. Deze karakteristieken, de anodestroom-anodespanningskarakteristieken, of korter I_a - U_a -karakteristieken kunnen met dezelfde schakeling worden opgenomen als de I_a - U_g -karakteristieken (zie fig. 2,5).

We stellen de roosterspanning op een bepaalde waarde in en bepalen de anodestroom bij verschillende waarden van de anodespanning. Wordt de roosterspanning op nul volt ingesteld, (het rooster geleidend met de kathode verbonden), dan gedragen de anode en kathode zich samen als een diode. Een klein gedeelte van de elektronen, die de kathode verlaten, bereiken het rooster, doch vergeleken met het grote aantal elektronen, dat de anode bereikt, is dat te verwaarlozen. Het karakter van de triode, met het rooster geleidend verbonden met de kathode, is dus praktisch gelijk aan dat van een diode.

De I_a - U_a -karakteristiek van de triode bij nul volt roosterspanning verloopt dus op dezelfde wijze als de diode karakteristiek (zie fig. 2,13 en fig. 1,8).

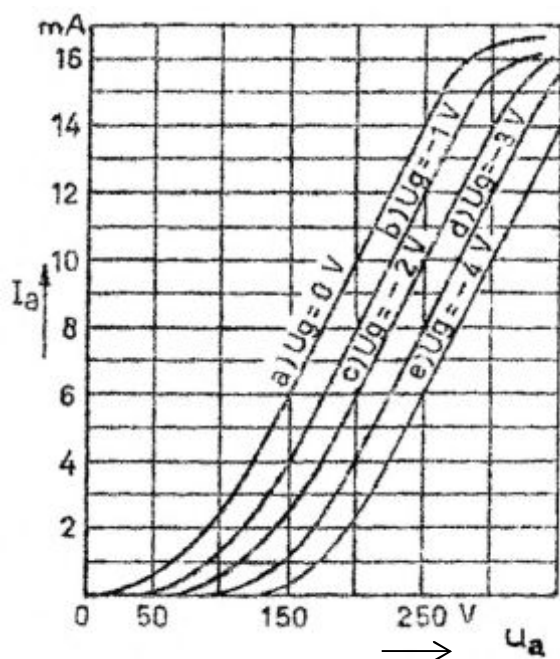


Fig. 2,13. Anodestroom-anodespanningskarakteristieken van een triode.

waarden van U_g worden getekend. We zien, dat alle karakteristieken nagenoeg hetzelfde verloop hebben, namelijk, de onderste buiging ten gevolge van de ruimtelading, welke zich in de buis voordoet, en de bovenste bocht ten gevolge van de verzadigingstoestand waarin de buis bij hoge anodespanningen komt.

Bij de vroeger gebruikelijke buizen, waar de kathode direct verhit werd, was het verzadigingsverschijnsel goed waar te nemen. De tegenwoordige triodes bezitten echter gewoonlijk een indirect verhitte kathode.

In fig. 2,13 is de kleine anodestroom, die bij $U_a = 0$ en $U_g = 0$ optreedt, verwaarloosd en tekenen we de karakteristiek bij $U_g = 0$ door de oorsprong van het assenstelsel.

Een tweede karakteristiek kunnen we opmeten, door het rooster op een bepaalde negatieve spanning in te stellen en dan de anodestroom bij verschillende waarden van de anodespanning op te meten.

Daar de negatieve roosterspanning de anodespanning vermindert, is dus een grotere anodespanning nodig om dezelfde anodestroom te verkrijgen.

Bij meer negatieve roosterspanning verschuift de I_a - U_a -karakteristiek dus naar rechts. Zie de karakteristieken a, b, c, d en e in fig. 2,13. Uit de figuur is duidelijk op te maken, dat bij meer negatieve roosterspanning een grotere positieve anodespanning nodig is om anodestroom te doen optreden.

Triodes worden veelal gebruikt bij negatieve roosterspanningen, vandaar, dat de I_a - U_a -karakteristieken alleen voor negatieve

Evenals bij een diode met indirect verhitte kathode is de verzadigingsstroom zeer groot. Zou men de verzadigingsstroom trachten te bereiken door U_a voortdurend groter te maken, dan is de buis gewoonlijk al ernstig beschadigd voor dat de verzadigingsstroom is bereikt.

Een stelsel I_a - U_a -karakteristieken (fig. 2,13) geeft het gedrag van de triode volledig weer. Het verband tussen I_a , U_a en U_g wordt er volledig mee aangegeven. Dit was ook het geval bij een stelsel I_a - U_g -karakteristieken (fig. 2,7). Hieruit volgt, dat beide stelsels karakteristieken niet onafhankelijk van elkaar zijn. Heeft men het ene stelsel dan kan het andere stelsel (voor dezelfde buis) daaruit worden afgeleid.

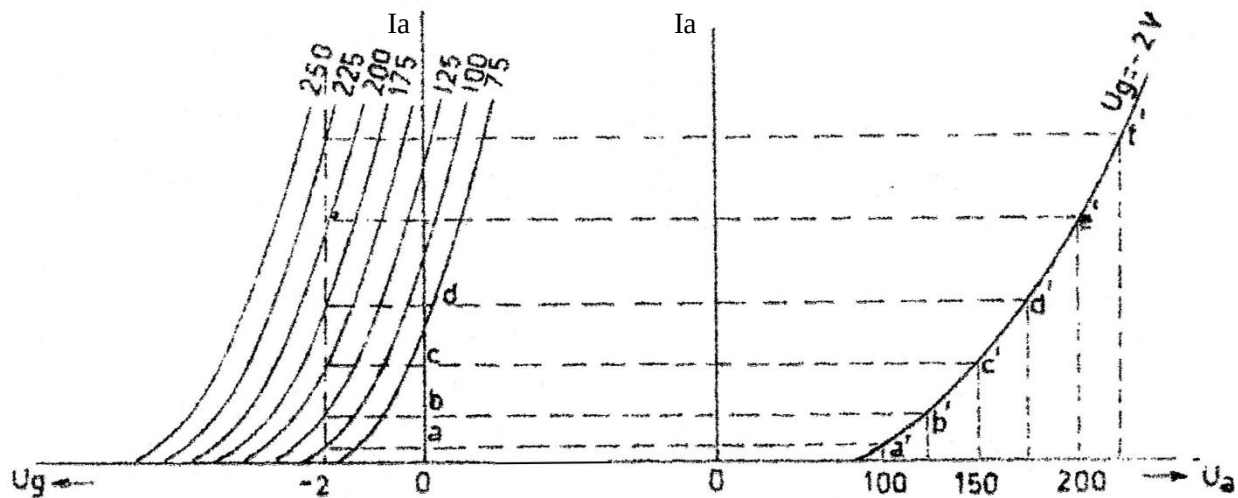


Fig. 2,14. Het construeren van een I_a - U_a -karakteristiek uit een stelsel I_a - U_g -karakteristieken.

In fig. 2,14 is een stelsel I_a - U_g -karakteristieken van een triode gegeven. Indien we een I_a - U_a -karakteristiek bij $U_g = -2$ V hieruit willen afleiden, dan tekenen we in de I_a - U_g -karakteristieken bij $U_g = -2$ V een lijn evenwijdig aan de verticale as van de grafiek. De snijpunten van deze lijn met de karakteristieken geven de anodestroom bij verschillende waarden van de anodespanning en bij $U_g = -2$ V weer. Deze punten zijn dus ook de punten van een I_a - U_a -karakteristiek bij een roosterspanning van -2 volt. Bij $U_a = 75$ V en $U_g = -2$ V is de anodestroom nul. Dit punt kunnen we in het I_a - U_a -assenstelsel reeds aangeven. Bij $U_a = 125$ V en $U_g = -2$ V is de anodestroom a mA. Deze stroomwaarde brengen we door een horizontale stippellijn over tot boven de waarde van $U_a = 75$ V (a'). Zo brengen we de stroomwaarde b , welke optreedt bij $U_a = 125$ V en $U_g = -2$ V over tot boven $U_a = 125$ V in het rechtse assenstelsel en verkrijgen daar het punt b' . Door dit achtereenvolgens ook te doen met de punten c , d , e , enz. verkrijgen we in het I_a - U_a -assenstelsel een reeks punten, die, na door een vloeiende lijn te zijn verbonden, de I_a - U_a -karakteristieken opleveren bij $U_g = -2$ V. Op gelijke wijze kunnen ook de I_a - U_a -karakteristieken bij andere waarden van U_g worden geconstrueerd.

Oplossingen inzenden van de opgaven Ea, nr. 35 en 36.

2.6. De karakteristieke grootheden uit de Ia-Ua-karakteristieken van een triode

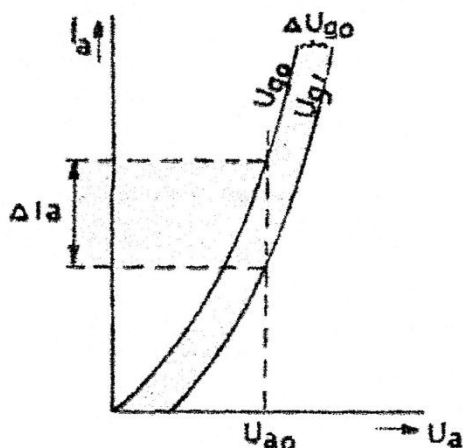


Fig. 2,15. Bepaling S uit de Ia-Ua-karakteristieken.

De karakteristieke grootheden van een triode welke in 2,4 reeds werden gedefinieerd, kunnen ook uit de Ia-Ua-karakteristieken worden afgeleid.

a. De steilheid S

Daar de steilheid gedefinieerd is bij constante waarde van U_{a0} tekenen we in fig. 2,15, waarin een tweetal Ia-Ua-karakteristieken zijn weergegeven, bij die anodespanning, waarbij S bepaald moet worden een loodlijn op de horizontale as.

De snijpunten met de karakteristieken U_{g0} en U_{g1} bepalen nu de grootte van ΔI_a , die ten gevolge van een verandering van de roosterspanning van U_{g0} tot U_{g1} (ΔU_g) optreedt. Het quotiënt van deze veranderingen levert de steilheid in het beschouwde punt op. Zoals reeds bekend is, moeten de veranderingen klein genomen worden.

b. De inwendige weerstand Ri

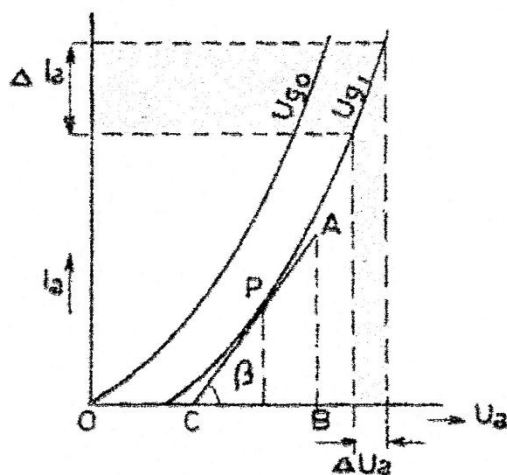


Fig. 2,16. Bepaling Ri uit de Ia-Ua-karakteristieken.

Zoals in het voorgaande werd gedefinieerd is De inwendige weerstand bepaald bij constante waarde van U_g .

Wensen we de inwendige weerstand te bepalen bij een roosterspanning U_{g1} , dan zal de anodespanningsverandering ΔU_a een anodestroom verandering ΔI_a ten gevolge hebben (zie fig. 2,16). De verhouding van deze ΔU_a en ΔI_a levert dan de inwendige weerstand R_i op.

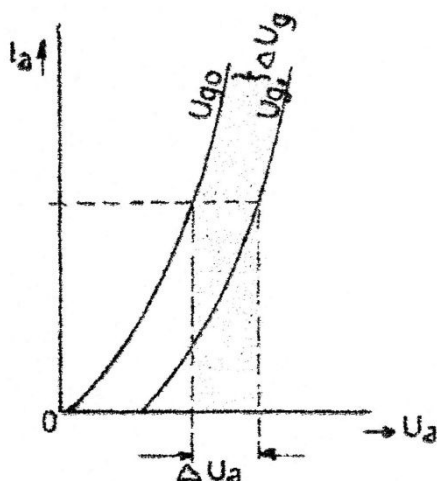
Zoals in het voorgaande reeds werd betoogd, moeten we ook hier kleine waarden van ΔU_a en ΔI_a genomen worden om R_i zo nauwkeurig mogelijk te bepalen. Maken we ΔU_a en ΔI_a steeds kleiner, dan kunnen we ons voorstellen, dat we uiteindelijk een zeer klein deeltje van de karakteristiek benutten om R_i te bepalen. Dit kleine deeltje is dan op te vatten als een recht stukje lijn.

Indien we in punt P van de karakteristiek een raaklijn daaraan tekenen, dan zal de raaklijn in punt P dezelfde richting hebben als het zeer kleine deeltje van de karakteristiek.

Voor deze raaklijn is bv. $AB = \Delta I_a$ en $BC = \Delta U_a$. Het quotiënt $\frac{\Delta U_a}{\Delta I_a}$ levert dan de inwendige weerstand van de triode in het punt P op de meest nauwkeurige wijze.

Ook is het mogelijk R_i uit te drukken in de hoek β , welke de raaklijn met de horizontale as maakt.

Daar $R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{BC}{AB}$ en $\frac{BC}{AB}$ gelijk is aan $\cotg \beta$, is dus ook $R_i = \cotg \beta$ en kunnen we ook duidelijk zien, dat in elk punt van de karakteristieken de inwendige weerstand een andere waarde heeft. Alleen in die gedeelten van de karakteristieken, welke recht zijn, behoudt R_i eenzelfde waarde.

c. De versterkingsfactor g of μ Fig. 2,17. Bepaling g uit de I_a - U_a -karakteristieken.

Ter bepaling van de versterkingsfactor g moeten we bedenken, dat deze is gedefinieerd bij constante waarde van I_a . Hiertoe tekenen we in fig. 2,17 een horizontale lijn, dus evenwijdig met de horizontale as.

De snijpunten met de karakteristieken geven nu aan, welke anodespanningsverandering ΔU_a nodig is om bij verandering van de roosterspanning van U_{g0} tot U_{g1} (ΔU_g) de anodestroom constant te houden.

Het quotiënt $\frac{\Delta U_a}{\Delta U_g}$ levert de versterkingsfactor van de triode op.

Voorbeeld.

Bepaal de karakteristieke grootheden van de triode, waarvan de karakteristieken in fig. 2,13 gegeven zijn, in de rechte gedeelten der karakteristieken.

Oplossing.

We zullen de steilheid S bepalen bij $U_a = 250$ V.

De roosterspanningsverandering van -2 tot -3 volt geeft een Anodestroomverandering van 10 tot 8 mA. $\Delta U_g = 1$ volt en $\Delta I_a = 2$ mA.

De steilheid is dus $S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g} = \frac{2}{1} = 2 \text{ mA/V}$ bij een anodespanning van 250 V.

De inwendige weerstand bepalen we bij $U_g = -2$ V. De anodespanningsverandering van 250 tot 200 volt geeft een anodestroomverandering van 10 tot 6 mA. $\Delta U_a = 50$ volt en $\Delta I_a = 4$ mA.

De inwendige weerstand $R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{50}{4 \cdot 10^{-3}} = 12500 \Omega$.

De versterkingsfactor bepalen we bij een anodestroom van 8 mA. De anodespanningsverandering van 200 tot 250 volt moet vergezeld gaan van een roosterspanningsverandering van -1 tot -3 volt om de anodestroom constant te houden.

$\Delta U_a = 50$ volt en $\Delta U_g = 2$ volt. De versterkingsfactor $g = \frac{50}{2} = 25$.

In gevallen zoals hierboven een als voorbeeld is uitgewerkt, kan ook worden volstaan met het bepalen van twee buisconstanten uit de karakteristieken en dan de derde constante met behulp van de formule van Barkhausen te berekenen.

In de Duitse literatuur gebruikt men dikwijls een andere grootheid als de versterkingsfactor bij elektronenbuizen. Men spreekt dan van "Durchgrif" D , de Durchgrif is het omgekeerde van de versterkingsfactor.

Dus $D = \frac{1}{g}$. Heeft een buis een versterkingsfactor $g = 20$, dan is de Durchgrif $D = \frac{1}{20} = 0,05$ of 5% .

De formule van Barkhausen kan ook in andere vorm worden geschreven als in het voorgaande werd gegeven.

$$g = S \times R_i \quad \text{of} \quad D = \frac{1}{S \cdot R_i} \quad \text{of} \quad S \cdot R_i = 1.$$

$$S = \frac{g}{R_i} \quad \text{of} \quad S = \frac{1}{D \cdot R_i}.$$

$$R_i = \frac{g}{S} \quad \text{of} \quad R_i = \frac{1}{S \cdot D}.$$

Elektronica. Les 11

2.7. De roosterstroom-roosterspanningskarakteristieken

Als het rooster van een triode een positieve spanning heeft ten opzichte van de kathode, trekt het rooster de elektronen, die de kathode verlaten, aan. Het grootste gedeelte van de elektronen gaat, dank zij de aantrekkende kracht van de positieve anode, tussen de mazen van het rooster door naar de anode. Een gedeelte komt echter op het rooster terecht en vormt een roosterstroom. Deze elektronen gaan in de buis van kathode naar het rooster en vloeien buiten de buis van het rooster terug naar de kathode. De elektrische stroom in dit circuit vloeit dus in tegengestelde richting.

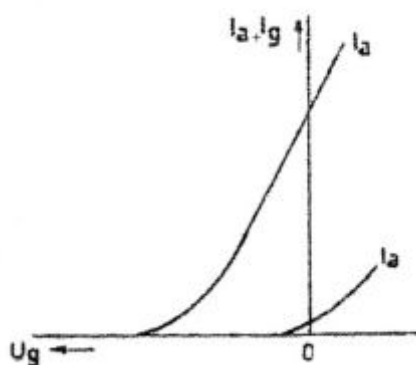


Fig. 2,18. Roosterstroom-roosterspanningskarakteristiek.

Het rooster vormt met de kathode een diode zoals deze in het voorgaande werd besproken. De roosterstroom bij een triode bij verschillende waarden van U_g verloopt dus op dezelfde wijze als de anodestroom bij een diode verloopt bij verschillende waarden van de anodespanning.

Ook bij kleine negatieve waarden van U_g komen nog elektronen op het rooster terecht, zodat bij negatieve waarden van U_g nog roosterstroom vloeit. Zo is bij negatieve rooster-spanning van 1 á 1,5 V nog roosterstroom mogelijk.

Bij verandering van de roosterspanning van $-1,5$ tot $+0$ volt neemt de roosterstroom langzaam toe om bij positieve rooster-spanning snel toe te nemen. Bij gebruik van de triode in ontvangers en versterkers wordt het optreden van roosterstroom meestal vermeden. De redenen hiertoe kunnen we pas later duidelijk maken. We zorgen er dus voor, dat de roosterspanning minstens 1,5 V negatief blijft. Bij oscillatoren en bij versterkers in zenders laat men echter gewoonlijk wel roosterstroom toe. In sommige gevallen is het optreden van roosterstroom, voor de goede werking van de schakeling, zelfs noodzakelijk.

2.8. De triode als versterker

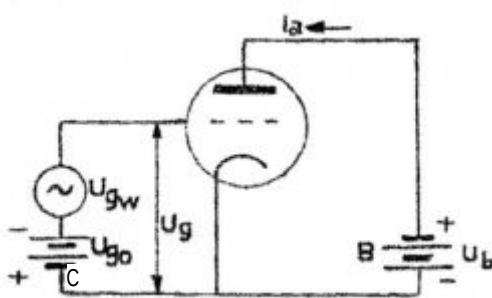


Fig. 2,19. Schakeling van de een triode.

We hebben gezien, dat we in de triode een middel bezitten om de sterkte van een bepaalde stroom, de anodestroom, te beïnvloeden door middel van een spanningsbron, welke niet in de anodekring is opgenomen. We beïnvloeden de anodestroom door middel van de roosterspanning.

Het gebruik van de triode als versterker berust hierop.

In fig. 2,19 is aangegeven, op welke wijze een triode als versterker kan worden geschakeld. De anodebatterij B levert de positieve anodespanning. Om te zorgen dat geen roosterstroom kan optreden neemt men een batterij C op, welke het rooster een negatieve spanning ten opzichte van de kathode geeft. Bij de in de praktijk gebruikelijke schakelingen worden positieve anodespanning en de negatieve roosterspanning wel

op andere manier als met behulp van batterijen verkregen,

maar dit heeft op de verklaring van de werking van de schakeling geen invloed.

Behalve de gelijkspanning van de batterij C, die we U_{g0} noemen, wordt aan het rooster ook een wisselspanning U_{gw} toegevoerd. In fig. 2,19 is hiertoe in serie met de batterij een wisselspanningsbron getekend.

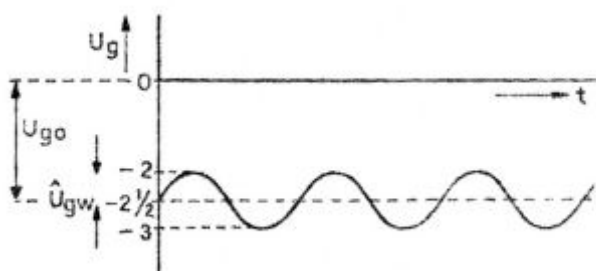


Fig. 2,20. De roosterspanning als functie van de tijd.

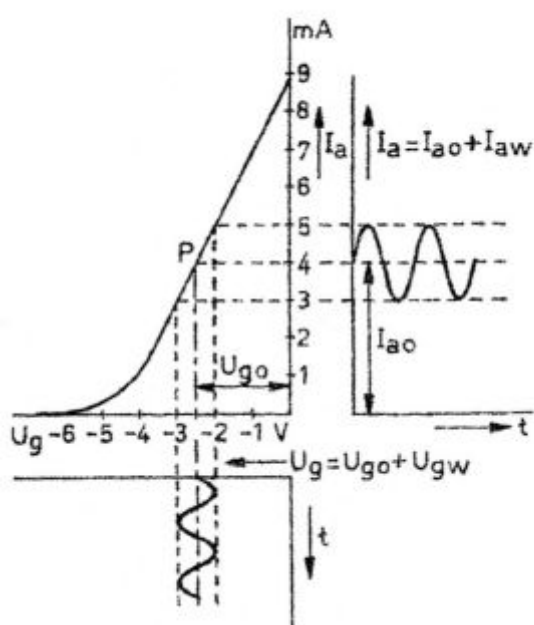


Fig. 2,21. De anodestroom bij veranderlijke roosterspanning en bij constante anodespanning.

Hier is de anodewisselstroom met amplitude van 1 mA gesuperponeerd op de gelijkstroom van 4 mA.

De negatieve klem van de anodebatterij B is direct met de kathode verbonden terwijl de positieve klem direct met de anode is verbonden.

Tussen rooster en kathode staan dus een gelijkspanning en een wisselspanning in serie. De totale roosterspanning is dus $U_g = U_{g0} + U_{gw}$. Is bv. de rooster gelijkspanning $U_{g0} = -2\frac{1}{5}$ V, en heeft de wisselspanning een amplitude $\hat{U}_{g0} = \frac{1}{2}$ V, dan varieert de rooster-spanning tussen -2 en -3 V (fig. 2,20).

In fig. 2,21 is wederom een I_a - U_g -

Karakteristiek van een triode weergegeven.

Deze karakteristiek denken we opgenomen met een anodespanning welke gelijk is aan de spanning van de batterij B. Door de spanning van de roosterbatterij C is de buis ingesteld bij $U_{g0} = -2\frac{1}{2}$ V. Korter gezegd:

het instelpunt is bij $U_{g0} = -2\frac{1}{2}$ V. De anodestroom is nu bepaald door punt P en blijkt 4 mA te zijn.

Dit wordt de ruststroom in het werkpunt genoemd.

Het werkpunt is het punt P op de I_a - U_g -karakteristiek.

Ten gevolge van de wisselspanning U_{gw} op het rooster zal de anodestroom om de waarde van 4 mA gaan variëren. De ruststroom I_{a0} neemt dus met 1 mA toe, om daarna 1 mA af te nemen. De amplitude van de anodewisselstroom is dus 1 mA.

Daar bij het bovenstaande in de anodeketen geen weerstand voorkomt, is de anodespanning constant en gelijk aan de spanning van de batterij B.

Tussen rooster en kathode is nu de som van twee spanningen werkzaam (zie fig. 2,20).

We zeggen, dat de wisselspanning gesuperponeerd is op de gelijkspanning. Onder superponeren wordt verstaan het vormen van een totale spanning door de momentele waarden van verschillende spanningen op elk tijdstip bij elkaar op te tellen. In de anodeketen treffen we dus ook superpositie aan.

Elektronica. Les 122.9 De triodevergelijking

Zouden we tussen de anode van de triode en de positieve klem van de anodebatterij B een weerstand R_a opnemen, dan zal ten gevolge van de anodestroom een spanning over deze weerstand vallen. Ondergaat de anodestroom een verandering, dan zal de spanning over deze weerstand een gelijksoortige verandering ondergaan. Daar in de anodekring een constante spanning U_b (fig. 2,22) werkzaam is, welke zich verdeelt over de weerstand R_a en de buis tussen anode en kathode, zal, als de spanning over R_a verandert, de spanning tussen anode en kathode een tegengestelde verandering ondergaan. Zo ontstaat ten gevolge van een verandering van U_g ook een verandering van U_a . Deze laatste verandering heeft natuurlijk ook invloed op de verandering van de anodestroom.

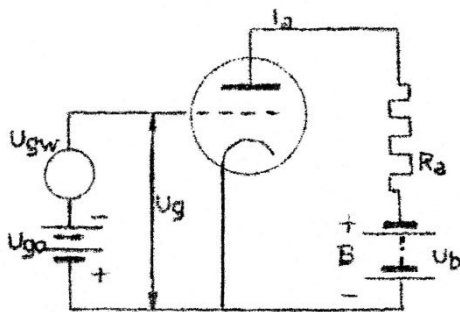


Fig. 2,22. Triode belast met een ohmse weerstand R_a

Over de weerstand R_a valt eveneens een gelijkspanning, ten gevolge waarvan de anodespanning lager zal zijn dan de batterijspanning.

Het uiteinde van R_a , dat met de anode is verbonden is lager in potentiaal, dus negatief ten opzichte van het uiteinde van R_a dat met de positieve klem van de anodebatterij is verbonden.

De gelijkspanning welke over R_a valt, is gelijk aan $I_{a0} \cdot R_a$. Wenst men voor het werkpunt dezelfde anodespanning en dezelfde anodestroom I_{a0} als er zou zijn zonder de weerstand R_a , dan neemt men de spanning van de anodebatterij B een waarde $I_{a0} \cdot R_a$ groter. De invloed van de weerstand op de anodegelijkspanning kan dus door de anodebatterij gecompenseerd worden.

Anders is het met de spanningsveranderingen, welke over R_a worden ontwikkeld. Deze veranderingen doen zich in tegengestelde zin ook tussen anode en kathode in de buis gevoelen.

Veronderstellen we een roosterspanningsverandering. Waardoor het rooster minder negatief wordt. De anodestroom zal dus toenemen en ook zal de spanningsval over R_a toenemen. De anodespanning neemt dus af, daar de som van U_a en de spanning over R_a constant is en gelijk aan U_b . Deze afnemende anodespanning zal gepaard gaan met een afname van de anodestroom. Hieruit volgt, dat de anodewisselspanning in de buis de roosterwisselspanning tegenwerkt. De anodewisselstroom zal dus kleiner uitvallen als deze zou zijn alléén ten gevolge van de roosterwisselspanning.

We zullen nu een uitdrukking bepalen, waaruit de anodewisselstroom bij aanwezigheid van een anodeweerstand R_a is te berekenen.

Indien het gedeelte van de I_a - U_g -karakteristiek, dat wordt doorlopen recht is, dan zijn de anodewisselstroom en anodewisselspanning een getrouw beeld van de roosterwisselspanning. Veronderstellen we het gedeelte van de I_a - U_a -karakteristiek, dat wordt doorlopen, eveneens recht, dan kunnen we van een bepaalde steilheid S en een bepaalde inwendige weerstand R_i spreken.

Om de juiste formule voor de anodestroom op te stellen, moeten we een uitdrukking vinden, die aangeeft, hoe de anodestroom verandert als zowel U_g al U_a veranderen. Tot nu toe hebben we steeds één der spanningen veranderd, terwijl de andere constant blijft.

Als de karakteristieken recht worden opgevat, dan zal een verandering van U_g met een bedrag ΔU_g een verandering van ΔI_a van de anodestroom ten gevolge hebben, die bepaald is door $S \cdot \Delta U_g = \Delta I_{a1}$ indien de anodespanning constant is. Verandert U_a met een bedrag ΔU_a dan zal dit een anodestroom ten gevolge, gelijk aan $\frac{\Delta U_a}{\Delta R_i} = \Delta I_{a2}$. Voert een buis bij roosterspanning U_g een anodestroom I_a , dan zal bij een roosterspanning $U_g + \Delta U_g$ een anodestroom van $I_a + \Delta I_{a1}$ vloeien. Laten we, terwijl de roosterspanning $U_g + \Delta U_g$ blijft de anodespanning met ΔU_a veranderen, dan zal de anodestroom nog met een waarde ΔI_{a2} veranderen. De anodestroom wordt hierdoor $I_a + \Delta I_{a1} + \Delta I_{a2}$.

De anodestroomverandering is dus: $\Delta I_a = \Delta I_{a1} + \Delta I_{a2}$ of $\Delta I_a = S \cdot \Delta U_g + \frac{\Delta U_a}{R_i}$.

Deze vergelijking noemen we de triodevergelijking.

Bij alle berekeningen betreffende de triode in haar schakelingen kunnen we er gebruik van maken. Door de triodevergelijking op bovengegeven wijze te schrijven, hebben we verondersteld, dat de aangenomen positieve richting van de spanningsveranderingen gelijklopend zijn, dit wil zeggen de spanningsveranderingen ondersteunen elkaar. Voeren we aan een triode tussen rooster en kathode een wisselspanning $U_{gw} = \hat{U}_{gw} \sin \omega t$ toe, dan verkrijgt de anodestroom een wisselspanningscomponent $I_{aw} = \hat{I}_{aw} \sin \omega t$ (zie ook fig. 2,21). Daar de anodewisselspanning ten gevolge van R_a in tegengestelde zin werkzaam is, kunnen we deze dus voorstellen door $U_{aw} = -\hat{U}_{aw} \sin \omega t$. De triodevergelijking wordt nu voor de momentele waarden: $I_{aw} = S \cdot U_{gw} + \frac{U_{aw}}{R_i}$. Voor de amplituden van de stroom en spanningen geldt: $\hat{I}_{aw} = S \cdot \hat{U}_{gw} - \frac{\hat{U}_{aw}}{R_i}$. Het minteken vindt dus zijn oorsprong in het feit, dat indien de roosterspanning en anodestroom hun maximale waarden in positieve richting hebben, de anodespanning de grootste negatieve waarde bereikt.

Voeren we onafhankelijk van elkaar aan het rooster en aan de anode van een triode een wisselspanning toe, dan volgt de anodestroom ook uit de triodevergelijking $I_{aw} = S \cdot U_{gw} + \frac{U_{aw}}{R_i}$. De anodestroom wordt in alle gevallen gegeven door de triodevergelijking, onafhankelijk van de wijze waarop de roosterspanning en anodespanning worden verkregen.

De enige voorwaarde is, dat de karakteristieken (I_a - U_g en I_a - U_a -karakteristieken) in het doorlopen gebied recht zijn. We kunnen de triodevergelijking ook als volgt herleiden:

$$I_{aw} = S \left(U_{gw} + \frac{U_{aw}}{S \cdot R_i} \right) = S \left(U_{gw} + \frac{U_{aw}}{g} \right).$$

Wordt in de anodeketen alleen een anodebatterij, zonder weerstand, opgenomen, dan is:

$$I_{aw} = S \cdot U_{gw}$$

$$\text{We noemen daarom: } U_s = U_{gw} + \frac{U_{aw}}{g}.$$

de stuurspanning van de triode.

De stuurspanning, welke dus werkzaam gedacht wordt tussen rooster en kathode van de triode, heeft dezelfde anodestroom ten gevolge, als de afzonderlijk, werkende roosterspanning U_{gw} en anodespanning U_{aw} gezamenlijk.

Uit de formule blijkt, dat de invloed van de anodespanning op de anodestroom g maal zo klein is als de invloed, die de roosterspanning op de anodestroom heeft.

Oplossingen inzenden van de opgaven Ea, nr. 44 t/m 48.



Elektronica. Les 13

2.10 De dynamische steilheid

In de schakeling volgens fig. 2,22 heeft een verandering ΔU_g in de roosterspanning een anodespanningsverandering ΔU_a tot gevolg, waarbij $\Delta U_a = -\Delta I_a \cdot R_a$. Door het minteken wordt aangegeven, dat een stijging van de anodestroom een vermindering van de anodespanning veroorzaakt. Substitueren we deze uitdrukking voor ΔU_a in de triodevergelijking, dan verkrijgen we:

$$\Delta I_a = S \cdot \Delta U_g - \Delta I_a \frac{R_a}{R_i} \quad \text{of} \quad \Delta I_a + \Delta I_a \frac{R_a}{R_i} = S \cdot \Delta U_g$$

En na ontbinding: $\Delta I_a \left(1 + \frac{R_a}{R_i}\right) = S \cdot \Delta U_g$

waaruit volgt: $\Delta I_a = \frac{S \cdot \Delta U_g}{1 + \frac{R_a}{R_i}} = \frac{S \cdot R_i \cdot \Delta U_g}{R_i + R_a}$.

De anodestroom is nu bepaald door $\Delta I_a + S \frac{R_i}{R_i + R_a} S \cdot \Delta U_g$.

Zou R_a niet in de anodeketen zijn opgenomen, dan was de variatie in de anodestroom, die ten gevolge van een roosterspanningsvariatie ΔU_g ontstaat, bepaald door $\Delta I_a = S \cdot \Delta U_g$.

De invloed van de weerstand R_a is dus, alsof de steilheid is afgenomen tot $S \frac{R_i}{R_i + R_a}$.

We noemende uitdrukking $S_d = S \frac{R_i}{R_i + R_a}$ de dynamische steilheid van de triode.

Ter onderscheiding hiervan noemt men de "gewone" steilheid (die hiervoor werd besproken) wel de statische steilheid. De anodestroomverandering kunnen we nu schrijven als $\Delta I_a = S_d \cdot \Delta U_g$.

Ter onderscheiding van de statische en dynamische steilheid geven we nog de volgende formulering:

Onder statische steilheid wordt verstaan de verhouding van een kleine anodestroomverandering en een kleine roosterspanningsverandering bij constante waarde van de anodespanning U_a .

Onder dynamische steilheid wordt verstaan de verhouding van een kleine anodestroomverandering en een kleine roosterspanningsverandering bij constante waarde van de voedingsspanning U_b .

Voorbeeld: Bepaal de anodewisselstroom van een triode, indien tussen rooster en kathode een wisselspanning met een amplitude van 0,1 volt werkzaam is. De anodeweerstand $R_a = 4 \cdot 10^4 \Omega$ en $R_i = 10^4 \Omega$. De steilheid van de triode is 4 mA/V.

Oplossing: De dynamische steilheid S_d waar de triodeschakeling mee werkt is bepaald door:

$$S_d = S \frac{R_i}{R_i + R_a} = 4 \cdot \frac{10^4}{10^4 + 4 \cdot 10^4} = 4 \cdot \frac{1}{5} = 0,8 \text{ mA/V}.$$

De roosterspanningsverandering is gelijk aan de amplitude van de roosterwisselspanning, dus:

$$I_{a_w} = S_d \cdot U_{g_w} = 0,8 \times 10^{-3} \times 10^{-1} = 8 \times 10^{-5} \text{ A} = 80 \mu\text{A}.$$

2.11. De spanningsversterking van een triode

In het voorgaande hebben we bij een roosterspanningsverandering ΔU_g gevonden, dat de anodespanningsverandering dan te berekenen is uit $\Delta U_a = -\Delta I_a \cdot R_a$. het minteken geeft dus aan, dat de anodespanning en roosterspanning in tegengestelde zin veranderen. Voor de anodestroomverandering vonden we $\Delta I_a = S_d \cdot \Delta U_g$. De anodespanningsvariatie wordt nu:

$$\Delta U_a = -S_d \cdot R_a \cdot \Delta U_g \quad \text{of} \quad \Delta U_a = -S \frac{R_i \cdot R_a}{R_i + R_a} \Delta U_g.$$

Een wisselspanning U_{g_w} , welke in de roosterkring werkzaam is, en die eigenlijk niets anders is dan een opeenvolging van roosterspanningsvariates veroorzaakt nu een anodewisselstroom I_{a_w} :

$$I_{a_w} = S_d \cdot U_{g_w} = S \frac{R_i}{R_i + R_a} U_{g_w}.$$

Hierdoor ontstaat een wisselspanning U_{a_w} tussen de uiteinden van de weerstand R_a

$$U_{a_w} = -I_{a_w} \cdot R_a = S_d \cdot R_a \cdot U_{g_w} = -S \frac{R_i \cdot R_a}{R_i + R_a} U_{g_w}.$$

Het minteken geeft aan, dat de positieve helft van de periode van de roosterwisselspanning samenvalt met de negatieve helft van de periode van de anodewisselspanning. In fig. 2,23 is het verloop van de rooster spanning, anodestroom anodespanning, zoals dat bij een triode voorkomt, weergegeven.

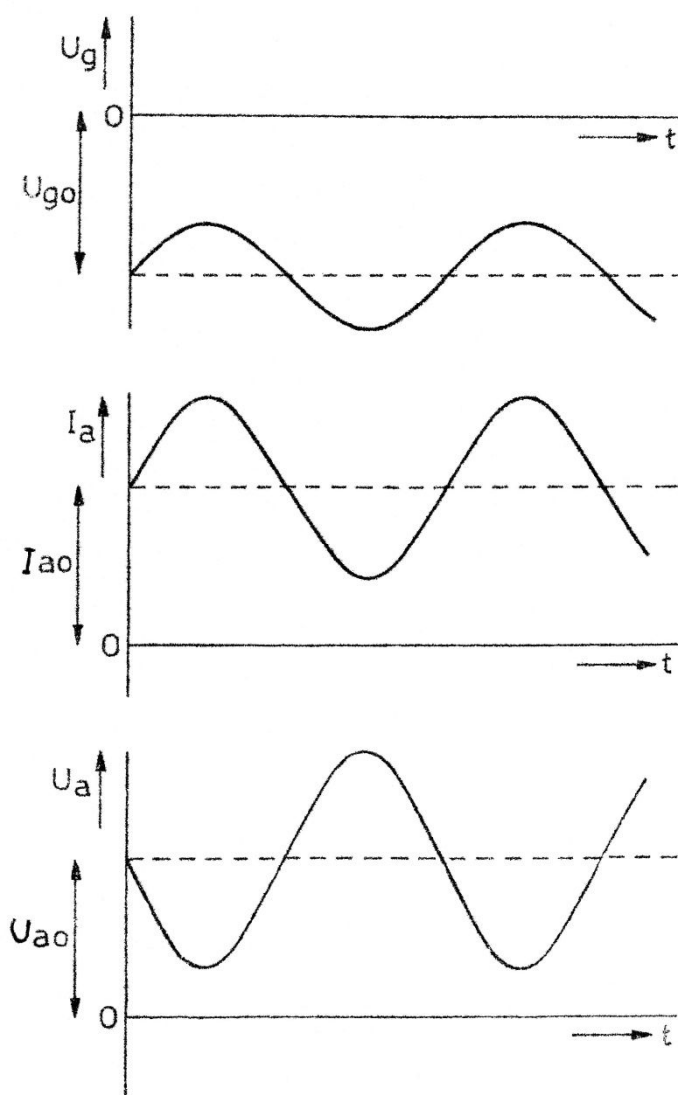


Fig. 2,23. U_g , I_a en U_a bij een triode met belastingsweerstand.

een weerstand $R_a = 6 \cdot 10^4 \Omega$. Bepaal eveneens I_{aw} , S_d en U_{aw} als $U_{gw} = 0,1$ volt.

Oplossing: De dynamische steilheid is $S_d = S \frac{R_i}{R_i + R_a} = 4 \cdot \frac{2 \cdot 10^4}{2 \cdot 10^4 + 6 \cdot 10^4} = \frac{1 \text{ mA}}{V}$. De anodewisselstroom is nu: $I_{aw} = S_d \cdot U_{gw} = 10^{-3} \cdot 10^{-1} = 10^{-4} \text{ A}$ of $100 \mu\text{A}$. $U_{aw} = I_{aw} \times R_a = 10^{-4} \times 6 \cdot 10^4 = 6 \text{ volt}$. De versterking is dus $\frac{U_{aw}}{U_{gw}} = \frac{6}{0,1} = 60$. De versterking hadden we ook direct kunnen berekenen uit:

$$V = g \frac{R_a}{R_i + R_a} = S \cdot R_i \frac{R_a}{R_i + R_a} = 4 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^4 \frac{6 \cdot 10^4}{2 \cdot 10^4 + 6 \cdot 10^4} = 80 \times \frac{6}{8} = 60.$$

Onder de versterking van een triode wordt verstaan de verhouding tussen U_{aw} en U_{gw} , waarbij dan niet gelet wordt op het minteken.

De versterking wordt dus $V = \frac{\dot{U}_{aw}}{\dot{U}_{gw}} = \frac{S_d \cdot R_a \cdot \dot{U}_{gw}}{\dot{U}_{gw}} = S_d \cdot R_a$. $V = S \frac{R_i \cdot R_a}{R_i + R_a}$. Daar $S \cdot R_i = g$ kunnen we ook schrijven: $V = g \frac{R_a}{R_i + R_a}$.

Daar de breuk $\frac{R_a}{R_i + R_a}$ altijd kleiner is dan 1, is de versterking altijd kleiner dan g , de versterkingsfactor.

We kunnen van de breuk $\frac{R_a}{R_i + R_a}$ teller en noemer delen door R_a en verkrijgen dan $V = g \frac{1}{1 + \frac{R_i}{R_a}}$. Maken we R_a

veel groter dan R_i , dan verkrijgt de breuk een waarde, die weinig van 1 afwijkt en zal V niet veel van g afwijken. De versterkingsfactor geeft dus de maximum grens aan, welke de versterking kan bereiken. Is de toegepaste weerstand R_a veel kleiner dan R_i , dan kan met kleine benadering de noemer van de breuk $\frac{R_a}{R_i + R_a}$ gelijkgesteld worden aan de waarde R_i .

De versterking wordt dan $V = g \frac{R_a}{R_i} = \frac{g}{R_i} R_a$. Daar $\frac{g}{R_i} = S$ wordt de versterking in dit geval dus:

$$V = S \cdot R_a.$$

Voorbeeld: Bereken de versterking van een triode, waarvan $S = 4 \text{ mA/V}$ En $R_i = 2 \cdot 10^4 \Omega$, welke belast is met

2.12. De dynamische I_a - U_g -karakteristiek

In het voorgaande hebben we reeds gezien, dat, indien een buis belast is met een weerstand, de anodespanning niet gelijk is aan de spanning van de anodebatterij.

De anodespanning is nu gelijk aan $U_{a0} = U_b - I_{a0} \cdot R_a$, waarin U_b de batterijspanning is en I_{a0} de anodeglijkstroom, welke de buis voert, dus ook afhankelijk van de roosterspanning.

Indien we een wisselspanning op het rooster aansluiten, dan zullen de hierdoor ontstane veranderingen in de anodestroom niet een bepaalde I_a - U_g -karakteristiek doorlopen, doch gaan bij elke verandering van I_a op een andere karakteristiek over, daar dan een andere anodespanning in rekening moet worden gebracht. Een en ander zullen we aan de hand van fig. 2,24 toelichten. In deze figuur is een aantal I_a - U_g -karakteristieken van een triode getekend.

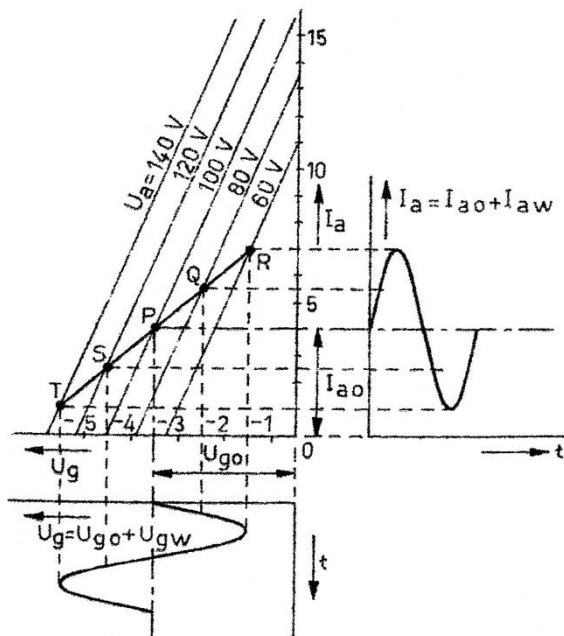


Fig. 2,24. Statische en dynamische karakteristieken van een triode.

Ter vereenvoudiging van de volgende beschouwing zijn deze voorgesteld door rechte lijnen.

We veronderstellen een schakeling volgens fig. 2,22 met $R_a = 13333 \Omega$.

De roostergelijkspanning maken we $U_{g0} = -3\frac{1}{2} \text{ V}$. De spanning U_b van de anodebatterij stellen we zo in, dat de anodeglijkstroom $I_{a0} = 4 \text{ mA}$ bedraagt. In fig. 2,24 zien we, dat bij $U_{g0} = -3\frac{1}{2} \text{ V}$ en $I_{a0} = 4 \text{ mA}$, de anodeglijks spanning $U_{a0} = 100 \text{ V}$ bedraagt. De spanning welke over R_a valt, is hierbij $I_{a0} \cdot R_a = 4 \cdot 10^{-3} \times 13333 = 53\frac{1}{3} \text{ V}$; de spanning van de anodebatterij is dus: $100 + 53\frac{1}{3} = 153\frac{1}{3} \text{ V}$. Het punt P op de karakteristiek voor $U_a = 100 \text{ V}$ ($U_{g0} = -3\frac{1}{2} \text{ V}$ en $I_{a0} = 4 \text{ mA}$) is het werkpunt of instelpunt. Wordt de roosterspanning nu gewijzigd van $-3\frac{1}{2} \text{ V}$ in $-2\frac{1}{2} \text{ V}$, dan zou, indien de anodespanning 100 V bleef, de anodestroom stijgen van 4 tot 8 mA .

Doch als de anodestroom stijgt, wordt de spanning over de weerstand R_a groter. De batterijspanning U_b blijft dezelfde; de anodespanning U_a daalt dus; in ons aangenomen geval tot 80 V .

De anodestroom zal dus slechts stijgen tot die waarde, die op de karakteristiek voor $U_a = 80 \text{ V}$ met $U_g = -2\frac{1}{2} \text{ V}$ overeenkomt, dit is $5\frac{1}{2} \text{ mA}$ (het punt Q). De anodestroom is toegenomen met $1\frac{1}{2} \text{ mA}$.

De anodespanning is daardoor gedaald met $1\frac{1}{2} \times 10^{-3} \times 13333 = -2\frac{1}{2} \text{ V}$ en dus op 80 V gekomen.

Een verdere vermindering van de negatieve roosterspanning tot $-1\frac{1}{2} \text{ V}$ doet de anodestroom verder toenemen en dus de anodespanning verder afnemen. Hierbij gaan we dus weer naar een andere I_a - U_g -karakteristiek, voor een nog lagere anodespanning (het punt R).

Bij vergroten van de negatieve roosterspanning neemt de anodestroom af. Daarbij gaan we over op I_a - U_g -karakteristieken voor hogere anodespanning (de punten S en T). Hieruit volgt: wanneer in de anodeketen van een triode een weerstand is opgenomen met het doel, deze buis als versterker te laten werken, en we brengen in de roosterketen een wisselspanning aan, dan gedraagt de triode zich, alsof de I_a - U_g -karakteristiek was niet de lijn voor de anodespanning $U_a = 100$ V, doch de minder steil verlopende lijn TSPQR. Met behulp van deze lijn kunnen we dus op dezelfde wijze de grafiek voor de anodestroom construeren als we dit in fig. 2,21 deden, waarbij we veronderstelden, dat er geen weerstand in de anodeketen voorkwam. In fig. 2,24 is deze constructie uitgevoerd voor een roosterwisselspanning met een amplitude van 2 V.

De lijn TSPQR noemt men een dynamische karakteristiek. Ter onderscheiding worden de karakteristieken voor constante anodespanning de statische karakteristieken genoemd. We kunnen dit als volgt schrijven:

Onder de statische karakteristiek van een triode verstaan we de karakteristiek, welke het verband aangeeft tussen I_a en U_g bij constante anodespanning.

Onder de dynamische karakteristiek van een triode verstaan we de karakteristiek welke het verband aangeeft tussen I_a en U_g bij constante voedingsspanning.

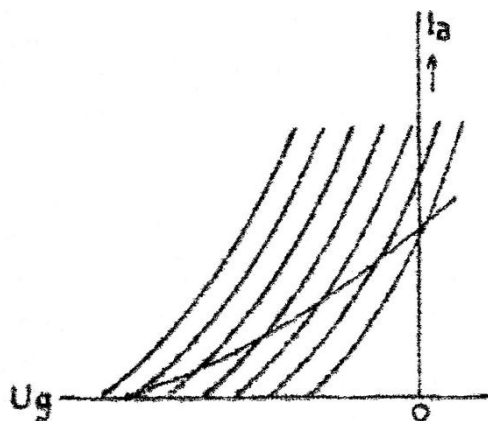


Fig. 2,25. Dynamische karakteristiek van een triode bij gebogen I_a - U_g -karakteristiek.

gebogen lijnen. De dynamische karakteristiek is dan ook een gebogen lijn (zie fig. 2,25).

We kunnen de dynamische karakteristiek verlengen totdat deze de horizontale as snijdt. Dit snijpunt zal nu samenvallen met het afknijppunt van die statische karakteristiek, die opgenomen is met een anodespanning, welke gelijk is aan de batterijspanning.

We kunnen dit als volgt beredeneren: het afknijppunt betekent een anodestroom van nul mA en een anodespanning van $U_{a0} = U_b$, daar bij een anodestroom $I_a = 0$ geen spanning over R_a valt. De dynamische karakteristiek moet eveneens door dit punt gaan, daar deze het verband tussen anodestroom en anodespanning aangeeft. Zouden we de waarde van R_a veranderen, terwijl U_b niet wordt veranderd, dan moeten de dynamische karakteristiek door ditzelfde punt gaan. Hadden we R_a groter gekozen, dan in het eerste geval, dan zou de dynamische karakteristiek minder steil verlopen. We kunnen ons dus een groot aantal dynamische karakteristieken voorstellen, die alle door hetzelfde punt gaan en welke alle andere anodewestanden voorstellen.

We kunnen uit fig. 2,24 direct constateren dat de steilheid van de dynamische karakteristiek kleiner is dan de statische steilheid.

Zoals in het voorgaande reeds werd bepaald is de dynamische steilheid te berekenen uit:

$S_d = S \frac{R_i}{R_i + R_a}$. Daar een verandering van de anodestroom een grotere variatie van de anodespanning veroorzaakt, naarmate de anodeweerstand R_a groter is, geldt de dynamische karakteristiek slechts voor één waarde van R_a . Naarmate R_a groter is, is de dynamische karakteristiek kleiner.

Wordt R_a steeds kleiner gemaakt, dan heeft dit dus een toenemen van de dynamische steilheid tot gevolg. Wordt R_a nul gemaakt, dan is de dynamische gelijk aan de statische steilheid. De statische karakteristieken in fig. 2,24 hebben we recht verondersteld en dientengevolge is de dynamische karakteristiek ook recht. In werkelijkheid zijn karakteristieken

2.13. De belastingslijn

Ook in de I_a-U_a – karakteristieken kan de invloed van een weerstand in de anodeketen worden weergegeven. In fig. 2,26 is een aantal I_a-U_a -karakteristieken weergegeven. Ter wille van de eenvoud hebben we ook deze karakteristieken door rechte lijnen voorgesteld. Is de anodegelijkspanning $U_{a0} = 200\text{ V}$ en veronderstellen we in de roosterkring een gelijkspanning werkzaam, zodat $U_g = -4\text{ V}$, dan is punt P het werkpunt.

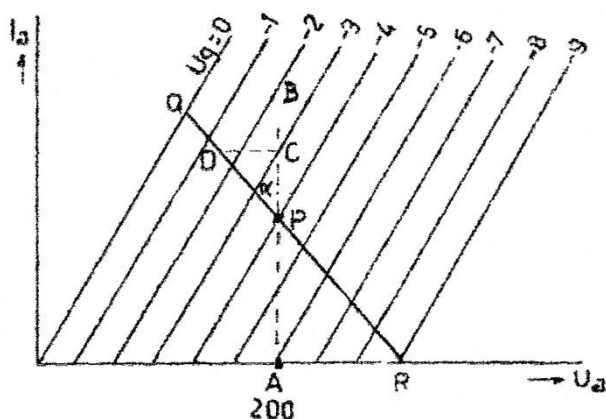


Fig. 2,26. Bepaling belastingslijn.

Veronderstellen we in de anodeketen geen weerstand, dan zullen bij verandering van de roosterspanning de waarden van de anodestroom de verticale lijn AB doorlopen, daar nu de anodespanning onafhankelijk is van de anodestroom.

Is echter een weerstand in de anodeketen aanwezig, dan zal bij toenemende anodestroom de anodespanning dalen.

Is het bedrag waarmee de anodestroom toeneemt ΔI_a , dan is de daling van de anodespanning gelijk aan het product van de anodestroomtoename en R_a of $\Delta U_a = -\Delta I_a \cdot R_a$. Laten we nu in fig. 2,26 de anodestroom toenemen met een bedrag

$\Delta I_a = PC$, dan zal een daling van de anodestroom ontstaan $\Delta U_a = -\Delta I_a \cdot R_a = CD$.

We kunnen dit doen voor elke waarde van ΔI_a , of dit nu een toename of een afname van de anodestroom betekent. Bij een afname van de anodestroom moeten we bedenken, dat hiermede een stijging van de anodespanning gepaard gaat. Is de anodestroom nul geworden, dan zal er geen spanning over R_a staan en de anodespanning U_a gelijk zijn aan de voedingsspanning U_b .

Daar de anodespanningsverandering ΔU_a evenredig is met de anodestroomverandering ΔI_a , dat wil zeggen: indien ΔI_a 2x groter wordt, ook ΔU_a 2x groter wordt, zal het verband tussen ΔU_a en ΔI_a door een rechte lijn worden voorgesteld welke door het instelpunt P loopt.

In fig. 2,26 geeft de lijn QR het verband tussen ΔU_a en ΔI_a aan en we noemen deze lijn de Belastingslijn.

Naarmate R_a kleiner is en dus $\Delta U_a = \Delta I_a \cdot R_a$ kleiner is, zal de belastingslijn steiler verlopen. Is $R_a = 0$, dan wordt de belastingslijn voorgesteld door een verticale lijn door P (zie ook de lijn AB in fig. 2,26).

Maken we R_a voortdurend groter, dan gaat de belastingslijn meer en meer horizontaal door punt P lopen. Evenals we de inwendige weerstand uitgedrukt hebben, in fig. 2,16 in $R_i = \cot \beta$, kunnen we ook R_a in een hoek uitdrukken en wel in hoek α .

Uit $\Delta U_a = \Delta I_a \times R_a$ of $CD = PC \times R_a$ volgt: $R_a = \frac{CD}{PC} = \tan \alpha$.

de belastingslijn in de I_a-U_a – karakteristieken geeft hetzelfde verband tussen I_a , U_a en U_g aan als de dynamische karakteristiek in de I_a-U_a – karakteristieken.

In fig. 2,27a is een stelsel $I_a - U_g$ – karakteristieken weergegeven, waarin tevens de dynamische karakteristiek QR getekend is, welke ontstaat ten gevolge van een ohmse weerstand R_a in de anodeketen. Ter wille van de eenvoud tekenen we karakteristieken recht. De buis is ingesteld in punt P , dat wil zeggen bij een anodeglijkspanning U_{a0} en een negatieve spanning U_{g0} op het rooster van de buis.

Aan het rooster van de buis wordt een wisselspanning U_{gw} toegevoerd. Gedurende het tijdvak $a - b$, dat deze wisselspanning aanwezig is, ontstaat de anodewisselstroom I_{aw} , welke op de bekende wijze uit de karakteristieken kan worden afgeleid.

In fig. 2,27b is een stelsel $I_a - U_a$ – karakteristieken van dezelfde buis weergegeven. Uitgaande van dezelfde U_{a0} en U_{g0} als in fig. 2,27a, is hierin de belastingslijn AB voor R_a , door het instelpunt P , getekend.

Gedurende hetzelfde tijdvak $a - b$, dat U_{gw} en I_{aw} optreden, zal er ook een anodewisselspanning U_{aw} aanwezig zijn.

Door de verschillende punten van I_{aw} naar rechts op de belastingslijn over te brengen, vinden we het verloop van U_{aw} . Het punt c , de amplitudewaarde U_{gw} , dus loodrecht omhoog tot op de dynamische karakteristiek geeft daar punt C_1 . Dit punt C_1 , horizontaal naar rechts gebracht, geeft eerst punt C_2 , de amplitude van I_{aw} en verder punt C_3 op de belastingslijn.

Door nu punt C_3 loodrecht naar beneden en punt C horizontaal naar rechts, ontstaat een punt C_4 , dat de amplitudewaarde van de U_{aw} weergeeft. Worden deze bewerkingen voor verschillende punten uitgevoerd, dan verkrijgen we het gehele verloop van I_{aw} en U_{aw} , die zich bij deze triode in de anodeleiding voordoen.

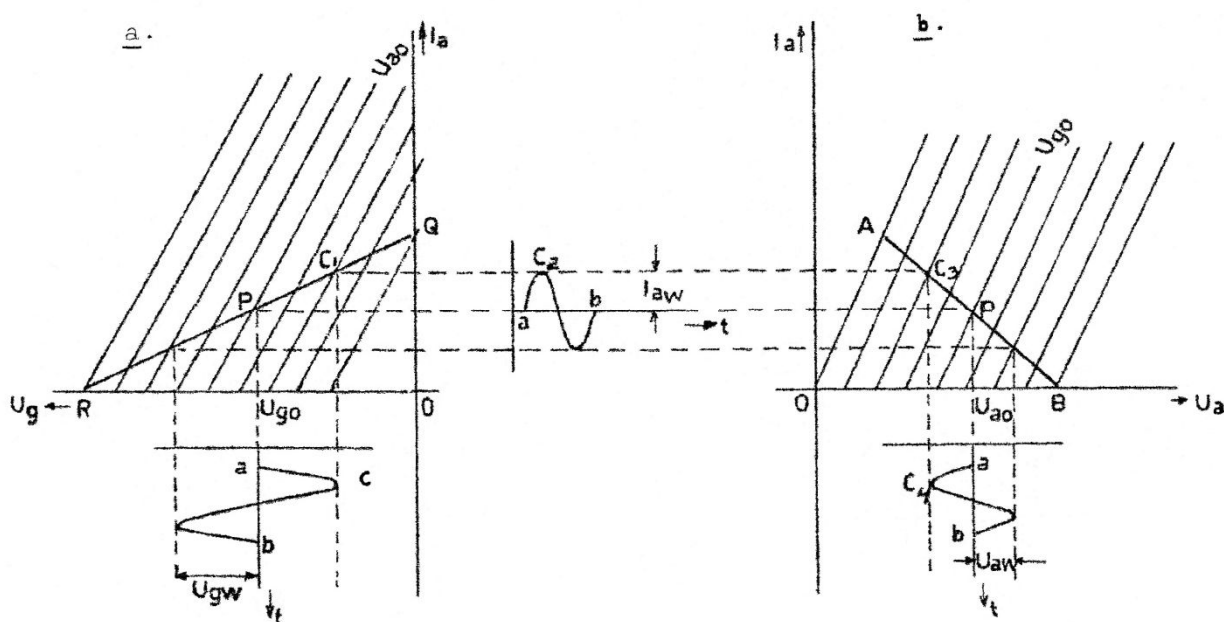


Fig. 2,27. Constructie van de belastingslijn uit de dynamische karakteristiek.

Dezelfde constructie kan ook worden uitgevoerd om de belastingslijn uit de dynamische karakteristiek af te leiden. Immers, de waarden van I_a , U_a en U_g , waaraan bijvoorbeeld punt C voldoet, moeten dezelfde zijn als de waarden waaraan I_a , U_a en U_g in punt C_3 voldoen.

Hetzelfde geldt natuurlijk ook voor alle andere punten van de dynamische karakteristiek en de belastingslijn. Ook omgekeerd kan de dynamische karakteristiek uit de belastingslijn worden afgeleid.

In fig. 2,27 zijn beide soorten karakteristieken aangegeven, als mede U_g , U_a en I_a als functie van de tijd bij een sinusvormig verloop van deze grootheden.

In de meeste gevallen wensen we het optreden van roosterstroom te voorkomen.

De belastingslijn tekenen we daarom gewoonlijk niet verder dan tot het snijpunt Q met de I_a-U_g - karakteristiek voor $U_g = 0$ V.

Veronderstellen we, dat een stelsel I_a-U_a - karakteristieken van een triode, als rechte lijnen gegeven is en dat verder bekend is de anodespanning U_a en de roostervoorspanning U_{g0} (zie fig. 2,28) dan kunnen we de belastingslijn construeren, welke bijvoorbeeld moet voldoen aan $R_a = 2R_i$.

Het instelpunt is bijvoorbeeld P . de inwendige weerstand R_i is nu bepaald door:

$$R_i = \frac{AB}{BP} = \tan \delta. \text{ De anodeweerstand } R_a \text{ is bepaald door } R_a = \tan \alpha = \frac{BC}{BP}.$$

Daar R_a tweemaal zo groot moet zijn als R_i , moet dus voldaan worden aan:

$$R_a = \frac{BC}{BP} = 2 \tan \delta = 2 \frac{AB}{BP}, \text{ dus } \frac{BC}{BP} = 2 \frac{AB}{BP}. \text{ Hieruit volgt, dat } BC = 2AB \text{ moet worden.}$$

Door het op deze wijze gevonden punt C en punt P trekken we de belastingslijn CD , welke nu voldoet aan de voorwaarde $R_a = 2R_i$.

In fig. 2,25 werd reeds een dynamische karakteristiek getekend in de I_a-U_g - karakteristieken zoals ze in werkelijkheid zijn, dat wil zeggen, gebogen lijnen dus. De dynamische karakteristiek is dan eveneens gebogen. In werkelijkheid zijn de I_a-U_a - karakteristieken ook gebogen. In fig. 2,29 is een dergelijk stelsel weergegeven. De belastingslijn is, indien in de anodeketen een ohmse weerstand voorkomt, echter een rechte lijn. Immers, de belastingslijn geeft alleen het verband aan tussen de spanning daarover en de stroom er door. Deze beide grootheden zijn evenredig met elkaar.

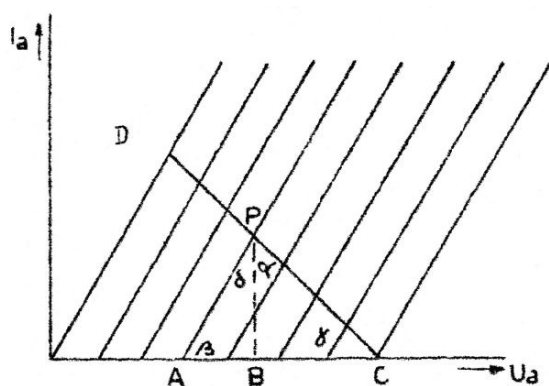


Fig. 2,28. Constructie belastingslijn als R_a gegeven is.

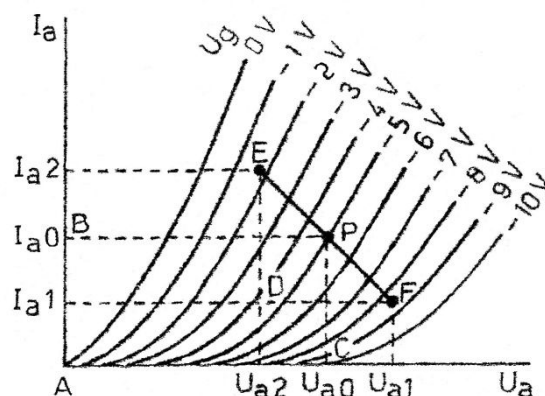


Fig. 2,29. Belastingslijn in gebogen I_a-U_a - karakteristieken.

Indien we de belastingslijn doortrekken tot op de horizontale as, dan zal deze de horizontale as snijden in een punt, waar U_a overeenkomt met U_b , daar in dit punt de anodestroom nul mA is en er dus geen spanning over R_a valt. Indien we dezelfde anodespanning handhaven, dan zullen de belastingslijnen behorende bij verschillende anodeweertstanden, alle door ditzelfde punt moeten gaan. De belastingslijn behorende bij de grootste weerstand R_a zal dan het minst steil verlopen. Het is ook mogelijk op een andere manier de belastingslijn te construeren.

In de eerste plaats ligt één punt van de belastingslijn al vast, als we bedenken, dat het punt, waar $U_a = U_b$ een punt van de belastingslijn moet zijn. Laten we de roosterspanning vanuit dit punt voortdurend groter worden, zodat dus ook de anodestroom groter wordt, dan kunnen we ons voorstellen, dat bij hoge roosterspanning (U_g positief) de anodestroom zo groot is, dat alle spanning van de batterij U_b over de anodeweertstand valt en dus de anodespanning nul volt is.

Door de anodeketen moet dan een stroom vloeien, welke gelijk is aan $I_a = \frac{U_b}{R_a}$.

Bij gegeven getallenwaarden is deze stroom te berekenen. Deze stroom treedt op bij een anodespanning van nul volt en is te vinden op de verticale as van de grafiek van de $I_a - U_a$ karakteristieken. Immers, de anodestroom moet bij $U_a = 0$ volt worden opgetekend, dus loodrecht boven de oorsprong van het assenstelsel. Door nu het punt op de verticale as door een rechte lijn te verbinden met het punt bij U_b op de horizontale as krijgen we de belastingslijn. Gaan we de versterking bij verschillende waarden van R_a een na, dan zullen we constateren, dat deze niet evenredig met R_a toeneemt. Voor verschillende waarden van R_a zullen we de versterking berekenen en in een grafiek optekenen. Voor het geval, dat $R_a = 0$ is ook de spanningsversterking nul.

Voor $R_a = R_i$ wordt de versterking:

$$V = g \frac{R_a}{R_i + R_a} = g \frac{R_i}{2R_i} = \frac{1}{2} g.$$

$$\text{Voor } R_a = 2R_i: \quad V = g \frac{2R_i}{3R_i} = \frac{2}{3} g.$$

$$\text{Voor } R_a = 3R_i: \quad V = g \frac{3R_i}{4R_i} = \frac{3}{4} g.$$

$$\text{Voor } R_a = 4R_i: \quad V = g \frac{4R_i}{5R_i} = \frac{4}{5} g.$$

$$\text{Voor } R_a = 5R_i: \quad V = g \frac{5R_i}{6R_i} = \frac{5}{6} g.$$

$$\text{Voor } R_a = 10R_i: \quad V = g \frac{10R_i}{11R_i} = \frac{10}{11} g.$$

$$\text{Voor } R_a = \infty: \quad V = g \frac{R_a}{R_i + R_a} = g \frac{1}{\frac{R_i}{R_a} + 1} = g.$$

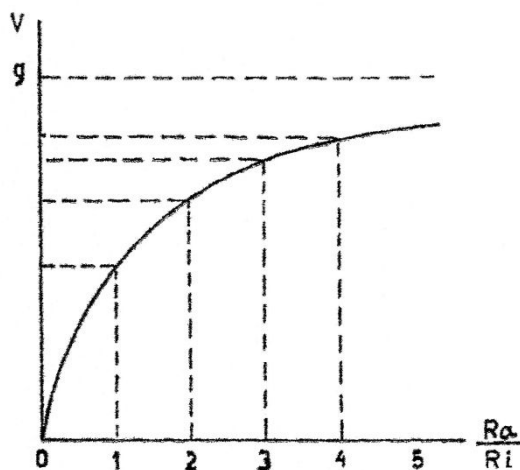


Fig. 2,29a. de versterking als functie van $\frac{R_a}{R_i}$.

We zien, dat de versterking maximaal gelijk aan g kan worden.

In fig. 2.29a hebben we de versterking in een grafiek opgetekend. Op de horizontale as hebben we de verhouding $\frac{R_a}{R_i}$ uitgezet en op de verticale as de versterking.

Elektronica. Les 162.14. Automatische negatieve roosterspanning

In de schakelingen welke tot nu toe werden gegeven, werden in de schema's de voedingsspanningsbronnen voor anodegelijkspanning en roostergelijkspanning door een batterij weergegeven. In verreweg de meeste gevallen wordt de gelijkspanning op andere manier verkregen. De wisselspanning uit het lichtnet wordt omgezet in een gelijkspanning, welke geschikt is voor anodegelijkspanning voor de buizen.

Bij toepassing van indirect verhitte buizen, worden de gloeidraden met wisselspanning, welke verkregen wordt door spanning uit het lichtnet omlaag te transformeren, gevoed. Om de roosterspanning, die een gelijkspanning van geringe waarde moet zijn, te verzorgen, heeft men bij indirect verhitte buizen een andere oplossing gevonden.

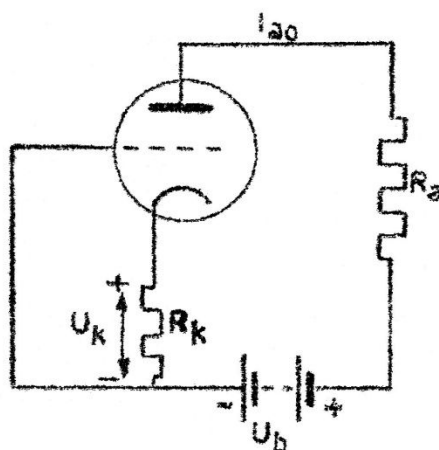


Fig. 2,30. Automatische negatieve Roosterspanning.

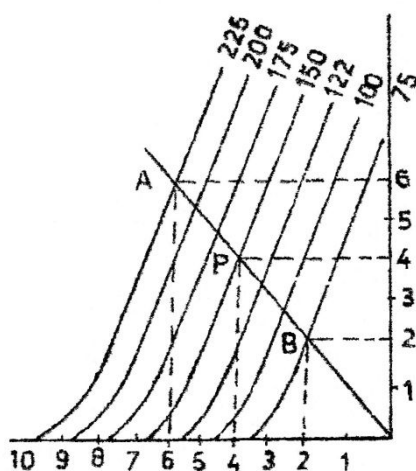


Fig. 2,31. Bepaling grafiek van de kathodeweerstand

Indien we in de kathodeleiding van een buis een weerstand R_k opnemen (fig. 2,30), dan wordt deze weerstand doorlopen door de anodestroom I_{a0} van de buis.

De anodegelijkstroom veroorzaakt een spanning $U_k = I_{a0} \cdot R_k$ over deze weerstand, waarbij de bovenkant positief wordt ten opzichte van de onderkant.

Aan de onderzijde van R_k is het rooster verbonden en aan de bovenzijde de kathode. Hierdoor wordt de kathode dus positief gemaakt ten opzichte van het rooster. Omgekeerd kunnen we dus ook zeggen, dat het rooster negatief wordt ten opzichte van de kathode. De roostergelijkspanning is nu $U_{g0} = -U_k = -I_{a0} R_k$. Op deze wijze wordt dus een klein deel van U_b gebruikt voor de negatieve roosterspanning.

In fig. 2,31 hebben we een bundel $I_a - U_{g0}$ - karakteristieken van een triode weergegeven. Veronderstellen we, dat de buis ingesteld moet worden in punt P, dus bij $U_{g0} = -4 V$ en $I_{a0} = 4 mA$, dan zullen we nagaan hoe groot de kathodeweerstand moet worden om deze instelling te verzorgen.

Uit het instelpunt volgt, dat de kathodeweerstand doorlopen wordt door een stroom $I_{a0} = 4 mA$ en de spanning, welke over de kathodeweerstand moet worden ontwikkeld is $U_{g0} = -4 V$.

De grootte van de kathodeweerstand is nu bepaald door $R_k = \frac{U_{g0}}{I_{a0}} = \frac{4}{4 \cdot 10^{-3}} = 1000 \Omega$. Deze zelfde weerstand zou bij een stroom van 6 mA een spanning veroorzaken:

$U_{g0} = I_{a0} \times R_k = 6 \times 10^{-3} \times 1000 = 6 \text{ volt}$ (zie punt A in fig. 2,31).

Bij een stroom van 2 mA een spanning van $U_{g_0} = I a_0 \times R_k = 2 \times 10^{-3} \times 1000 = 2$ volt (punt B).

Deze punten liggen alle op de rechte lijn, die we door P en de oorsprong van het anodestelsel kunnen trekken. Deze lijn geeft bij een bepaalde waarde van R_k dus het verband tussen U_{g_0} en $I a_0$ aan. Naarmate de kathodeweerstand kleiner wordt, zal deze lijn steiler gaan verlopen.

Wordt nu tussen rooster en kathode een wisselspanning aangesloten, dan zal door de kathodeweerstand R_k niet alleen een gelijkstroom maar ook een wisselstroom vloeien. Deze wisselstroom veroorzaakt een wisselspanning over R_k .

Wordt de roosterspanning ten gevolge van de wisselspanning minder negatief, dan zal de anodestroom toenemen en daarmee de spanning over R_k . Deze toenemende spanning over R_k zal het rooster meer negatief instellen, waarmee dus de spanningsverandering, waar we van uitgingen tussen rooster en kathode wordt tegengewerkt en dus wordt verminderd. Bij meer negatief worden van de roosterspanning, dus afname van de anodestroom en afname van de spanning over de kathodeweerstand zal de spanning over R_k de buis minder negatief trachten in te stellen en dus ook de verandering van de ingangsspanning tegenwerken.

Wordt aan het rooster een wisselspanning toegevoerd, dan zal een wisselspanning over R_k worden ontwikkeld, welke tussen rooster en kathode het ingangssignaal verzwakt. Dientengevolge resteert tussen rooster en kathode een kleinere wisselspanning dan werd toegevoerd. De invloed van de kathodeweerstand op de anodewisselstroom en anodewisselspanning zal dus zijn, dat deze met aanwezigheid van een kathodeweerstand kleiner zullen zijn dan zonder kathodeweerstand. De versterking van de schakeling wordt dus kleiner.

We kunnen dit als volgt aantonen.

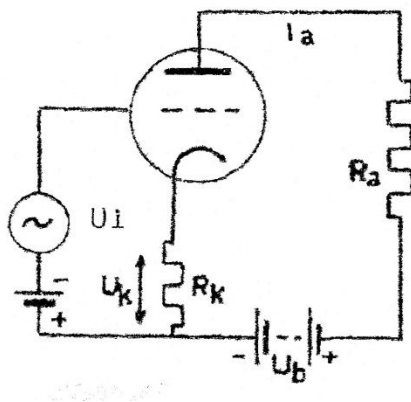


Fig. 2,32. Invloed van de kathodeweerstand op de versterking.

Uit fig. 2,32 blijkt, dat de totale weerstand, welke in de anodeketen voorkomt gelijk is aan $R_a + R_k$.

Volgens par. 2,11 is de anodewisselstroom nu bepaald door:

$$I a_w = S \frac{R_i}{R_i + R_a + R_k} U_{g_w},$$

Waarin U_{g_w} is de wisselspanning tussen rooster en kathode. De kathodeweerstand heeft nu tot gevolg, dat de wisselspanning tussen rooster en kathode niet gelijk is aan de toegevoerde wisselspanning U_i , maar kleiner zal zijn ten gevolge van de tegenwerkende spanning over R_k .

$$U_{g_w} = U_i - I a_w R_k.$$

de anodestroom wordt:

$$I a_w = S \frac{R_i}{R_i + R_a + R_k} (U_i - I a_w R_k)$$

$$\text{of: } I a_w = S U_i \frac{R_i}{R_i + R_a + R_k} - S \frac{R_i}{R_i + R_a + R_k} (I a_w R_k)$$

De laatste term voor het = teken gebracht, geeft:

$$I a_w + S \frac{R_i}{R_i + R_a + R_k} I a_w R_k = S U_i \frac{R_i}{R_i + R_a + R_k} \text{ of:}$$

$$I a_w \left(1 + S \frac{R_i R_k}{R_i + R_a + R_k} \right) = S U_i \frac{R_i}{R_i + R_a + R_k}$$

Alle termen vermenigvuldigd met: $(R_i + R_a + R_k)$ geeft:

$$I a_w = (R_i + R_a + R_k + S R_i R_k) = S U_i R_i \text{ of: } I a_w = \frac{S R_i U_i}{R_i + R_a + R_k + S R_i R_k} \dots \dots \dots (1)$$

R.T.

39 Ea

Nadruk verboden

Daar $SR_i = g$ wordt de uitdrukking

$$Ia_w = \frac{gU_i}{R_i + R_a + (1+g)R_k}.$$

De anodewisselspanning $Ua_w = -Ia_w R_a$ wordt nu:

$$Ua_w = -gU_i \frac{R_a}{R_i + R_a + (1+g)R_k}.$$

Indien we deze uitdrukkingen voor Ia_w en Ua_w vergelijken met die volgens par. 2,11, dan zien we, dat in geval van aanwezigheid van een kathodeweerstand de noemers van Ia_w en Ua_w zijn toegenomen met $(1+g)R_k$; de anodestroom zowel als de versterking zijn dus afgenomen.

De invloed van de kathodeweerstand kan ook tot uitdrukking worden gebracht in de dynamische steilheid van de schakeling.

Ten gevolge van de aanwezigheid van de kathodeweerstand R_k in de anodeleiding, kunnen we voor de dynamische steilheid schrijven $S_d = S \frac{R_i}{R_i + R_a + R_k}$.

De anodewisselstroom zou nu, zonder rekening te houden met de tegenwerkende spanning $Ia_w R_k$ in de roosterkring zijn: $Ia_w = S_d U_i$.

Brengen we de tegenwerking van $Ia_w R_k$ in de roosterkring in rekening dan wordt de rooster-spanning $Ug_w = U_i - Ia_w R_k$ en de wisselstroom

$$Ia_w = S_d(U_i - Ia_w R_k) \text{ of} \\ Ia_w = S_d U_i - S_d Ia_w R_k.$$

De laatste term voor het = teken gebracht geeft:

$$Ia_w + S_d Ia_w R_k = S_d U_i \text{ en} \\ Ia_w(1 + S_d R_k) = S_d U_i \text{ dus:} \\ Ia_w = \frac{S_d}{1 + S_d R_k} U_i.$$

De breuk $\frac{S_d}{1 + S_d R_k}$ kunnen we nu opvatten als de werkzame steilheid bij aanwezigheid van een kathodeweerstand $Sd_t = \frac{S_d}{1 + S_d R_k}$.

Voorbeeld: Een triode waarvan $S = 4mA/V$ en $R_i = 10^4 \Omega$ is belast met een weerstand $R_a = 2 \cdot 10^4 \Omega$. In de kathodeleiding is een weerstand R_k opgenomen van 1000Ω . als het toegevoerde signaal tussen rooster en kathode is $U_i = 0,1 V$, bepaal dan de anodewisselstroom, de versterking en de wisselspanning over R_k .

Oplossing:

De anodewisselstroom is: $Ia_w = \frac{gU_i}{R_i + R_a + (1+g)R_k}$ dus:

$$Ia_w = \frac{SR_i U_i}{R_i + R_a + (1+SR_i)R_k} = \frac{4 \cdot 10^{-3} \cdot 10^4 \cdot 10^{-1}}{10^4 + 2 \cdot 10^4 + (1 + 4 \cdot 10^{-3} \cdot 10^4)10^3} = \frac{4}{3 \cdot 10^4 + 41 \cdot 10^3} \cdot Ia_w = \frac{4}{71 \cdot 10^3} = \frac{4}{71} mA.$$

De anodewisselspanning over R_a is $Ur_a = -Ia_w R_a$. $Ur_a = -\frac{4}{71 \cdot 10^3} \times 2 \cdot 10^4 = -\frac{80}{71}$ volt.

De versterking is $V = \frac{Ur_a}{U_i} = \frac{\frac{80}{71}}{0,1} = \frac{800}{71} = 11,3$. De wisselspanning over R_k is nu:

$Uk_w = Ia_w R_k = \frac{4}{71 \cdot 10^3} \times 10^3 = \frac{4}{71}$ volt. In deze versterker was zonder kathodeweerstand de versterking: $V = g \frac{R_a}{R_i + R_a} = 40 \times \frac{2 \cdot 10^4}{10^4 + 2 \cdot 10^4} = 40 \times \frac{2}{3} \approx 27$.

We zien dus, dat de versterking beduidend is verminderd ten gevolge van het aanbrengen van een kathodeweerstand.

Om de nadelige invloed van de kathodeweerstand op de versterking op te heffen en deze weerstand toch de negatieve roosterspanning te doen leveren is het nodig, dat parallel aan de weer-

stand R_k een condensator wordt geschakeld.

Deze condensator moet voor de wisselstroom een zo klein mogelijke reactantie bezitten dat deze voor de wisselstroom als een kortsluiting van R_k kan worden opgevat (fig. 2,33).

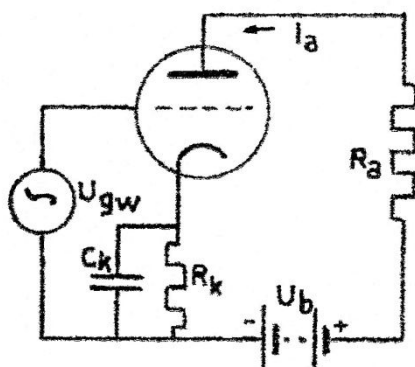


Fig. 2,33. Condensator C_k parallel aan R_k .

Op deze wijze zal de anodewisselspanning geen wisselspanning over de parallelschakeling van R_k en C_k veroorzaken en dus ook geen vermindering van de versterking ten gevolge hebben.

Daar de anodegelijkstroom door de condensator geblokkeerd wordt, en dus onveranderd door R_k blijft vloeien, verandert de condensator C_k niets aan de negatieve instelling. De reactantie van de condensator C_k is groter naarmate de frequentie van U_i en I_a lager is.

Voor lage waarden van de frequentie moet dus een grote condensator worden gebruikt en wordt veelal een elektrolytische condensator geschakeld. Dient de versterker om wisselspanningen van verschillende frequenties te versterken, dan moet de capaciteit van C_k zo worden gekozen dat de reactantie daarvan voor de laagste van de te versterken frequenties nog voldoende klein is te opzichte van R_k .

Moet een versterker signalen versterken, waarvan de frequenties liggen tussen $30 - 10^4$ Hz, dan moet de reactantie van C_k bij 30 Hz nog voldoende klein zijn ten opzichte van R_k . Is de kathodeweerstand 1000Ω en achten we $\frac{1}{\omega C_k}$ bij 30 Hz voldoende klein als deze $\frac{1}{20} R_k$ is, dan moet dus worden voldaan aan $\frac{1}{\omega C_k} = 50 \Omega$ of $C_k = \frac{1}{50 \cdot \omega} = \frac{1}{50 \times 2\pi \cdot 30} \approx 106 \mu F$.

Het is natuurlijk van belang, dat de kwaliteit van de ontkoppelcondensator zo hoog mogelijk is. Is de serieweerstand, welke de condensator, dankzij de verliezen, bezit, vrij groot, dan is de minimale impedantie, welke de condensator kan leveren, dus bij de hoogste frequentie nagenoeg gelijk aan de weerstand. De vervanging van deze serieweerstand en de kathodeweerstand bepaalt dan de wisselspanning, welke over de kathodeweerstand wordt ontwikkeld. Naarmate de vervangingsweerstand groter wordt, zal de versterking van de schakeling meer afnemen.

Voorbeeld: De triode, waarvan de $I_a - U_g$ - karakteristieken gegeven zijn in fig. 2,12 wordt met behulp van een kathodeweerstand ingesteld bij $U_{g0} = -4 V$, terwijl de voedingsspanning U_b zo gekozen moet worden, dat $U_{a0} = 150 V$. De anodeweerstand R_a is $3 \cdot 10^4 \Omega$. Bereken de benodigde kathodeweerstand en de spanning U_b .

Oplossing: Uit de karakteristieken volgt, dat bij $U_{g0} = -4 V$ en $U_{a0} = 150 V$ de ruststroom $6 mA$ is. De kathodeweerstand moet dus zijn: $R_k = \frac{U_{g0}}{I_{a0}} = \frac{-4}{6 \cdot 10^{-3}} = 667 \Omega$. Bij een anodegelijkstroom $I_{a0} = 6 mA$ valt een spanning over de anodeweerstand R_a , welke te berekenen is uit $U = I_{a0} \times R_a = 6 \cdot 10^{-3} \times 3 \cdot 10^4 = 180 volt$. De spanning U_b welke de batterij nu moet leveren is gelijk aan de som van de anodegelijkspanning U_{a0} , de gelijkspanning over de kathodeweerstand en de gelijkspanning over R_a . Dus $U_b = 150 + 4 + 180 = 334 V$. Naarmate we de buis meer negatief instellen (de kathodeweerstand dus groter en de anodegelijkstroom kleiner maken) wordt de spanningsval over R_a kleiner, dus ook de benodigde voedingsspanning U_b . Bij $U_{g0} = -6 V$ en $U_{a0} = 150 V$ zou de kathodeweerstand moeten zijn: $R_k = \frac{6}{2 \cdot 10^{-3}} = 3000 \Omega$ ($I_{a0} = 2 mA$) en de spanningsval over R_a wordt: $U = I_{a0} \times R_a = 2 \cdot 10^{-3} \times 3 \cdot 10^4 = 60 V$. De benodigde voedingsspanning is nu: $U_b = 150 + 6 + 60 = 216 volt$.

Oplossingen inzenden van de opgaven Ea, nr. 64 t/m 69.