

MICROFONIE VAN ELEKTRONENBUIZEN

door S. S. DAGPUNAR *) , E. G. MEERBURG **) en A. STECKER ***).

621.391.816.2:621.385

Onder microfonie verstaat men het optreden van een storend signaal doordat een onderdeel van een elektrische schakeling, b.v. een versterkbuis, is onderworpen aan mechanische of akoestische trillingen en deze omzet in elektrische trillingen. Het verschijnsel is al zo oud als de radiobuis zelf. Aanvankelijk kon men het nog baas blijven door de buizen te plaatsen in verende houders. Bij de tegenwoordig gebruikelijke versterkingen is zulk een eenvoudige maatregel verre van voldoende. Theoretisch en experimenteel onderzoek hebben geleerd hoe men buizen kan construeren die in veel mindere mate microfonie vertonen. Het onderstaande artikel, dat bijdragen beval uit een Engels, een Nederlands en een Duits laboratorium, geeft een beeld van dit onderzoek en van de vooruitgang die de laatste jaren met het tegengaan van microfonie is bereikt.

Inleiding

Onder de schakelementen waaruit radiotoestellen, versterkers, enz. zijn samengesteld, treft men er aan die in mechanisch opzicht niet één star geheel vormen maar uit delen bestaan die ten opzichte van elkaar kunnen trillen, met een frequentie die in het algemeen in het hoorbare gebied ligt. Bij het trillen varieert de afstand tussen de delen, en dit gaat gepaard met fluctuaties in de elektrische eigenschappen van het betrokken schakelement. Men denke b.v. aan een draaicapacitor: wanneer de platen hiervan ten opzichte van elkaar trillen, varieert periodiek de capaciteit. Is de condensator opgenomen in de trillingskring van een oscillator, dan zal dus ook de frequentie van de gegenereerde spanning periodiek variëren, d.w.z. onderhevig zijn aan frequentiemodulatie. Deze kan op hinderlijke wijze tot uiting komen in het uitgangssignaal. Dit optreden van een storend signaal als gevolg van mechanisch trillende onderdelen staat bekend als microfonie.

Meer nog dan draaicapacitors zijn elektronenbuizen aan microfonie onderhevig; uitsluitend met deze laatste zullen wij ons in dit artikel bezighouden. Trillen de elektrodes van een buis ten opzichte van elkaar, dan veroorzaakt dit niet alleen variaties in de capaciteiten tussen de elektrodes, maar ook fluctuaties van de anodestroom en de steilheid, dus rechtstreeks van de versterking.

De oorzaken die een buis in trilling kunnen brengen, zijn velerlei. Behalve aan toevallige trillingen

of schokken, denke men aan die waaraan autoradio's, mobilifoons, radioapparatuur in vliegtuigen, enz., blootstaan, verder aan de trillingen afkomstig van grammofoon- of magneetmotoren, aan de schokken veroorzaakt door het bedienen van schakelaars in diverse toestellen, en bovenal aan de luidspreker. Deze bevindt zich dikwijls in de onmiddellijke nabijheid van versterkbuisen en kan hieraan trillingen medelen zowel langs „akoustische" weg (via de lucht) als langs „mechanische" weg (via de kast, het chassis en de buishouders). De situatie is hierbij bovendien nog bijzonder gevaarlijk doordat de luidspreker het storende microfoniesignaal zelf weergeeft, zodat, bij voldoende grote versterking, „rondzingen" zal optreden. Is versterking voor dit laatste niet voldoende groot dan kan toch een hinderlijke nagalm ontstaan. Zeer storend kan de microfonie ook tot uiting komen in televisieontvangtoestellen. Trillingen van luidspreker kunnen hierbij worden overgebracht naar versterkbuisen in het hoogfrequentie-, middenfrequentie- of videofrequentiegedeelte van het toestel en hierdoor hinderlijke fluctuaties in de helderheid van het beeld veroorzaken. Microfonie in buizen die zijn opgenomen in de afbuigschakelingen, kan behalve helderheidsfluctuaties ook vervormingen in het beeld doen ontstaan.

In de laatste jaren zijn in vele laboratoria uitvoerige onderzoeken verricht, zowel naar de oorzaken die aan buizen moeten worden gesteld om in moderne apparaten geen ontoelaatbare microfonie te veroorzaken, als naar de middelen die kunnen worden aangewend om de buizen aan deze eisen te laten voldoen. De onderzoeken hierover in versch

*) Mullard Radio Valve Co., Ltd., Mitcham, Engeland.

**) Hoofdindustriegroep Elektronenbuizen, Eindhoven.

***) Ontwikkellaboratorium van de Valvo GmbH, Radioröhrenfabrik, Hamburg.

lende Philipslaboratoria en de hieruit voortgekomen uitataten vormen het onderwerp van dit artikel¹⁾.

Factoren die de sterkte van de microfonie bepalen

Een aan akoestische en of mechanische trillingen onderworpen buis ondervindt een periodiek wisselende versnelling. Het is allereerst de grootte hiervan die de sterkte van de microfonie bepaalt. Om een indruk van deze versnelling te geven, zij vermeld dat metingen met trillingsopnemers in radio-ontvangers en televisietoestellen hebben aangetoond²⁾ dat bij toevoeren van een vermogen van 50 mW aan de luidspreker de buizen versnellingen ondergaan van 0,1g a 0,25g (g — versnelling van de zwaartekracht). Bij een groter vermogen zijn de versnellingen uiteraard ook groter, en wel evenredig met de wortel uit het vermogen. In autoradio's zijn de versnellingen die de motortrillingen teweegbrengen nog belangrijker dan die, veroorzaakt door de luidspreker. Een grote invloed hebben hier natuurlijk het type auto, de toestand van de motor en de verdere omstandigheden. Metingen aan het instrumentenbord van een groot aantal automobielen hebben aangetoond dat hier onder bepaalde omstandigheden versnellingen tot 25g optreden.

Behalve de sterkte van de trillingen waaraan de Lehelc buis is onderworpen, is voor de microfonie ook van belang de mate waarin de trillingen worden overgebracht van de buisvoet of buiswand naar de elektrodes. Verder spelende stijfheid van de onderdelen en de starheid van hun bevestiging een rol.

Een ander punt dat bij de beoordeling van een buis uit een oogpunt van microfonie de aandacht vraagt, is de functie die deze buis in het desbetreffende apparaat vervult. Deze functie bepaalt namelijk de grootte waarvan eventuele fluctuaties het meest hinderlijk zijn. Zo zullen bij een buis in een laagfrequentieversterker de veranderingen van de onderlinge elektrodecapaciteiten zelden van

belang zijn, doch wèl de veranderingen in de anodestroom die ten gevolge van bewegingen van de elektrodes optreden. Immers, deze anodestroomvariatiën worden, meestal na versterking, aan de luidspreker toegevoerd en hoorbaar gemaakt. Capaciteitsvariatiën kunnen daarentegen zeer hinderlijk zijn bij de oscillatorbuis in een superheterodyne-ontvanger, speciaal wanneer de ontvanger op een hoge frequentie is afgestemd. In dit geval is immers de kringcapaciteit klein; hierdoor hebben de buiscapaciteiten een grote invloed op de frequentie van de door de oscillator opgewekte spanning. Een periodieke variatie van de laatstgenoemde capaciteiten veroorzaakt; dus frequentiemodulatie, wat in een frequentiemodulatie-ontvanger tot een hoorbaar geluid uit de luidspreker leidt. Dit kan trouwens ook het geval zijn in een ontvanger voor amplitudemodulatie, en wel wanneer het toestel iets „naast" het te ontvangen signaal is afgestemd. Bij een variërende frequentie van het middenfrequentiesignaal ontstaat dan namelijk amplitudemodulatie, die na detectie weer een storende laagfrequentie spanning veroorzaakt. Amplitude- en frequentiemodulatie kunnen ook ontstaan door capaciteitsvariatiën in één of meer hoogfrequentie- of middenfrequentiekringen van een ontvanger. Immers, in dit geval ontstaan fluctuaties in de grootte en de fase van de uitgangsspanningen van de desbetreffende versterktrappen.

Wanneer door microfonie fluctuaties van de steilheid ontstaan, kan hiervan hinder worden ondervonden indien de buis wordt gebruikt in het hoogfrequentie- of middenfrequentiegedeelte van een ontvangtoestel voor amplitudemodulatie, daar een periodiek variabele steilheid een veranderlijke versterking geeft, dus de hoogfrequentie of middenfrequentie signaalspanning in amplitude moduleert.

Het optreden van microfonie in een buis is hinderlijker naarmate de beschouwde buis door meer versterktrappen wordt gevolgd. Immers, dan zal een des te kleinere variatie van één der buisgrootheden voldoende zijn om een ontoelaatbare luidsprekerwisselstroom te doen ontstaan.

Grilligheid van de microfonie

Door het vrij grote aantal factoren dat de sterkte van de optredende microfonie beïnvloedt, vertoont dit verschijnsel in de praktijk een grillig karakter. Een buis die in een bepaalde functie in een bepaald toestel geen moeilijkheden geeft, kan in een andere functie of in een ander apparaat een ontoelaatbare microfonie vertonen. Ook de plaats van de buis, en de stand waarin deze is gemonteerd, hebben een grote invloed. Verder kunnen bij een bepaald buis-

¹⁾ Zie ook de volgende publikaties:

B. G. Dammers, On the microphony of the EF 86, F., *Electronic Appl.* 16, 125-134, 1955/56;

B. G. Dammers, A. G. W. Uitjens, E. G. Meerburg en M. A. de Pijper, Reflections on microphony, *Electronic Appl.* 18, 15-18, 1957/58;

B. G. Dammers, A. G. W. Uitjens, K. Hoefnagel, E. G. Meerburg en M. A. de Pijper, Causes and effects of microphony in the R.F. and I.F. stages of television receivers, *Electronic Appl.* 18, 18-56, 1957/58;

A. Stecker, Die Mikrofonie der Elektronenröhre — Theorie und Analyse. *Valvo Berichte* 4, 1-21, 1958 (zie ook *Electronic Appl.* 18, 99-117, 1957/58);

H. Hellmann, Die Priiffeldmessung der Mikrofonie von Elektronenröhren, *Valvo Berichte* 4, 22-35, 1958;

D. Hoogmoed, Microphonic effects in electron tubes, *Electronic Appl.* 19, 25-44, 1958/59.

²⁾ Zie het in aangehaalde artikel van Hellmann.

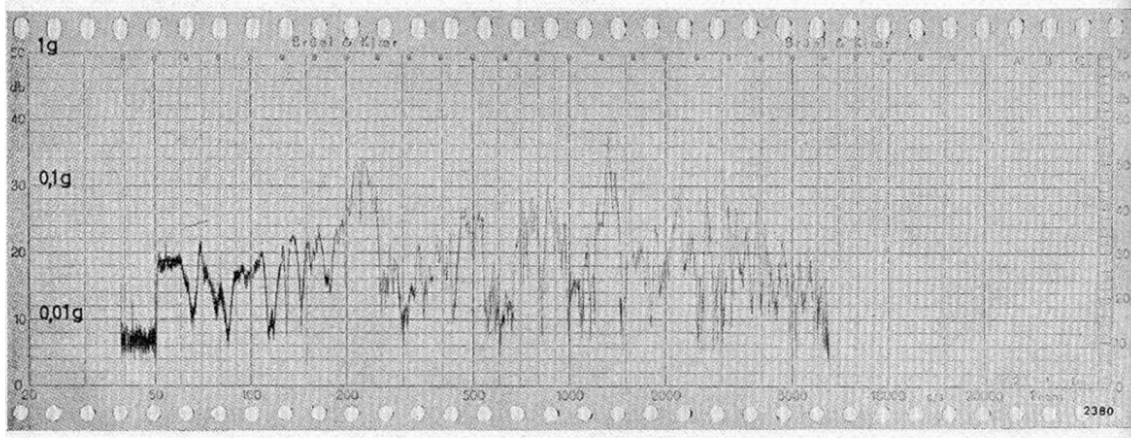


Fig. 1. Frequentiespectrum van de versnelling waaraan een buis in een bepaald type televisieontvanger is onderworpen wanneer aan de luidspreker een constant vermogen van 50 mW wordt toegevoerd bij een variërende frequentie.

type de verschillende exemplaren onderling grote verschillen vertonen. Ondanks de uiterst kleine toleranties die bij de fabricage van de onderdelen in acht worden genomen, is het namelijk niet te voorkomen dat de beweeglijkheid van de onderdelen ten opzichte van elkaar van buis tot buis een weinig verschilt. Op de elektrische eigenschappen van de buis heeft dit geen merkbare invloed, doch er kunnen grote onderlinge verschillen met betrekking tot microfonie uit ontstaan. Hierdoor kunnen sommige praktische onderzoeksmethodes alleen op statistische basis worden uitgevoerd; of het aanbrengen van een bepaalde verandering in een buis een in de praktijk belangrijke verbetering met betrekking tot de microfonie betekent, kan men dan alleen vaststellen indien een vrij groot aantal buizen wordt onderzocht.

De grilligheid van de microfonie wordt nog geaccentueerd door het feit dat het frequentiespectrum van de trillingen waaraan de buizen in de praktijk zijn onderworpen, een zeer onregelmatige gedaante vertoont. De oorzaak hiervan is dat het chassis, de kast en andere onderdelen waarmede elektrische apparaten worden samengesteld, voor mechanische en akoestische trillingen vele resonantiefrequenties vertonen, waardoor het geheel zich voordoet als bestaande uit een groot aantal met elkaar gekoppelde resonatoren. Fig. 1 toont een voorbeeld van een frequentiespectrum van de versnelling waaraan een buis in een televisieontvanger is onderworpen wanneer aan de luidspreker een constant elektrisch vermogen van 50 mW wordt toegevoerd met een variabele frequentie. Voor de meting van een dergelijk frequentiespectrum vervangt men de buis door een trillingsopnemer, die is geplaatst in een kastje dat in afmetingen en gewicht ongeveer met

de buis overeenkomt. Gebruikt men drie opnemers die in loodrecht op elkaar staande richtingen zijn aangebracht, dan kan men ook de richting bepalen waarin de versnellingen optreden. Fig. 2 toont een dergelijke combinatie van drie trillingsopnemers. Het geheel wordt ongeveer even zwaar gemaakt als een buis en kan in plaats van een buis in één der buishouders van het betrokken apparaat worden gestoken.



Fig. 2. Combinatie van drie trillingsopnemers, die wordt gebruikt voor het meten van de trillingen waaraan buizen in elektronische apparaten zijn onderworpen. Het geheel kan in plaats van een buis in een buishouder worden gestoken.

Methodes van onderzoek van microfonie

Enkele direct hij de praktisch aansluitende onderzoeksmethodes voor microfonie liggen tamelijk voor de hand en zijn ook vrij gemakkelijk uitvoerbaar. Zo kan men de neiging tot microfonie van een laagfrequentieversterkerbuis nagaan door deze buis in een versterkerschakeling op te nemen. De uitgangsspanning wordt via een regelbare versterker aan een luidspreker toegevoerd, die in de nabijheid van de te onderzoeken buis is opgesteld. In fig. 3 is deze schakeling schematisch weergegeven. Hierin is *B* de te onderzoeken buis, *L* de luidspreker en *A* de genoemde versterker. De versterking van *A* wordt nu zodanig ingesteld dat juist rondzingen optreedt. \ervolgens kan men vaststellen hoe groot bij deze instelling de „gevoeligheid“ van de combinatie van

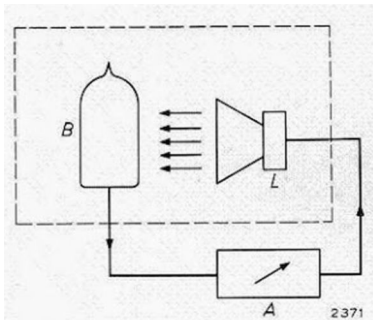


Fig. 3. Principe van een* Trtdige opstelling voor het onderzoek van een laagfrequentieversterkerbuis op microfonie. *B* te onderzoeken buis, *L* luidspreker, *A* regelbare versterker.

B en *A* is. Hieronder verstaat men meestal de wisselspanning die aan het stuurrooster van *B* nodig is om *A* een uitgangsvermogen van 50 mW te doen leveren. De op deze wijze bepaalde instelling van de versterking van *A* is dus bij aansluiting op de buis *B* ontoelaatbaar, en men kan aan de gebruikers van dit buistype een nog wél toelaatbare instelling (gevoeligheid van de combinatie) opgeven.

Het behoeft geen betoog dat een dergelijke opgave eigenlijk slechts waarde heeft voor een opstelling die nauwkeurig overeenkomt met die waarmee de experimenten werden uitgevoerd. Een kleine wijziging in de constructie van het toestel waarin de

buis wordt gebruikt, kan de neiging tot microfonie sterk beïnvloeden. Hierom, en mede om de reeds genoemde spreiding tussen de exemplaren van een buistype, moet steeds een ruime veiligheidsmarge in acht worden genomen.

Een hoogfrequentiebuis kan op een overeenkomstige manier worden onderzocht. Men neemt dan de te onderzoeken buis op in een hoogfrequentieversterktrap en voert aan het rooster een ongemoduleerde hoogfrequente signaalspanning toe (zie

fig. 4). Op de uitgangszijde van deze versterktrap wordt een detector aangesloten, waarop weer een regelbare laagfrequentieversterker met luidspreker

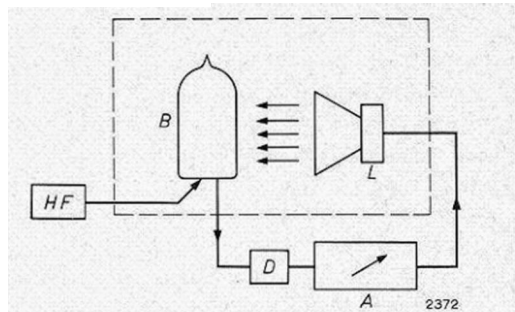


Fig. 4. Principe van een opstelling voor het onderzoek van een hoogfrequentieversterkerbuis op microfonie. *B* te onderzoeken buis, *L* luidspreker, *A* regelbare versterker, *D* detector, *HF* signaalgenerator.

volgt. Door microfonie ontstaat nu modulatie van de hoogfrequente spanning, en de detector zal een laagfrequent signaal leveren, dat via de laagfrequentieversterker en de luidspreker rondzingen kan veroorzaken.

Op de beschreven wijzen kan men verschillende buistypen of verschillende exemplaren van één type onderling vergelijken. Ook kan men nagaan of bepaalde wijzigingen die men in een buis aanbrengt om een vermindering van de microfonie te verkrijgen, al dan niet resultaat opleveren. Het is echter onmogelijk om op deze wijze te weten te komen welke onderdelen van een buis de oorzaak zijn van de microfonie; men krijgt dus geen aanwijzingen voor het aanbrengen van de juiste verbetering.

Meer mogelijkheden worden in dit opzicht verkregen wanneer men de opstelling niet laat rondzingen, doch de luidspreker aansluit op een toongenerator met versterker en de uitgangsspanning van de te onderzoeken buis meet, b.v. met behulp van een versterker en een buisvoltmeter (fig. 5).

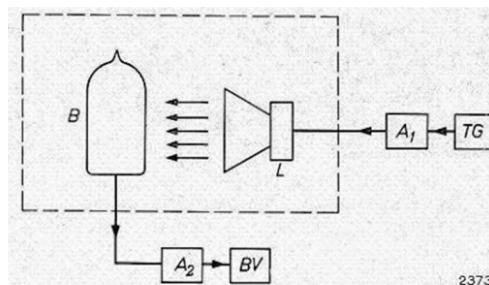


Fig. 5. Principe van een opstelling voor het onderzoek van elektronenbuizen op microfonie. De luidspreker *L* wordt via de versterker *A*₁ gevoed uit de toongenerator *TG*. De signaalspanning die in de buis *B* door microfonie wordt opgewekt, wordt via de versterker *A*₂ toegevoerd aan de buisvoltmeter *BV*.

Men heeft hierbij nl. de mogelijkheid om de frequentie van de trillingen waaraan de buis is onderworpen, te kiezen en te variëren. De sterkte van de microfonie blijkt dan als functie van de frequentie een zeer grillig verloop te hebben. Ten dele is dit te wijten aan het feit dat de onderdelen van het elektrodesysteem verschillende resonantiefrequenties voor mechanische trillingen hebben en de buis zich gedraagt als bestaande uit een groot aantal met elkaar gekoppelde resonatoren. Hierbij komt echter nog het hierboven reeds genoemde en in fig. 1 geïllustreerde feit dat ook bij een constant luidsprekervermogen, de versnelling waaraan de buis is onderworpen een grillig spectrum vertoont. Het bestuderen van de microfonie-eigenschappen van elektronenbuizen is hierdoor ook met een opstelling volgens fig. 5 moeilijk: men moet er steeds op bedacht zijn dat de oorzaak van een bij een bepaalde frequentie optredende sterke microfonie misschien buiten de buis is gelegen.

Om tot resultaten te komen die alleen door de buis zijn bepaald, moet men de buis direct in trilling brengen, en niet via een luidspreker, een kast en een chassis.

Men kan dit bereiken door de buis te onderwerpen aan stoten van een bepaalde sterkte en de signaalspanning te meten die hierbij door microfonie ontstaat. In fig. 6 is een hiervoor geconstrueerd apparaat afgebeeld. Ook hiermede zijn echter

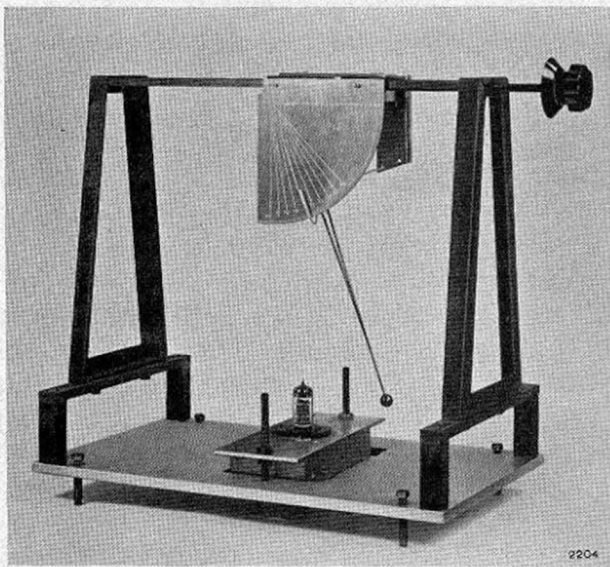


Fig. 6. Apparaat voor het onderzoek van de microfonie-eigenschappen van elektronenbuizen door middel van stoten.

weinig bevredigende resultaten verkregen. Door een stoot brengt men alle onderdelen van de buis gelijktijdig in trilling en men kan als opgewekte signaalspanning uitsluitend het totale resultaat meten. Hierdoor is ook deze methode eigenlijk alleen te gebruiken voor het onderling vergelijken van buizen, en niet voor het opsporen van de oorzaken van microfonie.

Een grondige studie van de microfonie-eigenschappen van buizen is alleen mogelijk als men dezelfde onderwerpt aan trillingen met een constante versnelling en een variabele frequentie. Alleen in dit geval is het mogelijk uit het optreden van een sterke microfonie bij een bepaalde frequentie conclusies te trekken, of althans vermoedens uit te spreken, over de oorzaak.

Men heeft om deze gedachte te realiseren de constante versnelling tot stand gebracht door de buizen te bevestigen aan een speciaal hiervoor geconstrueerde triller. Deze methode is sinds enige tijd in verschillende Philipslaboratoria op talrijke buistypen toegepast en zal nu nader worden beschreven.

Een triller voor microfonieonderzoek

In fig. 7 is een axiale doorsnede weergegeven van een triller die is geconstrueerd voor het onder-

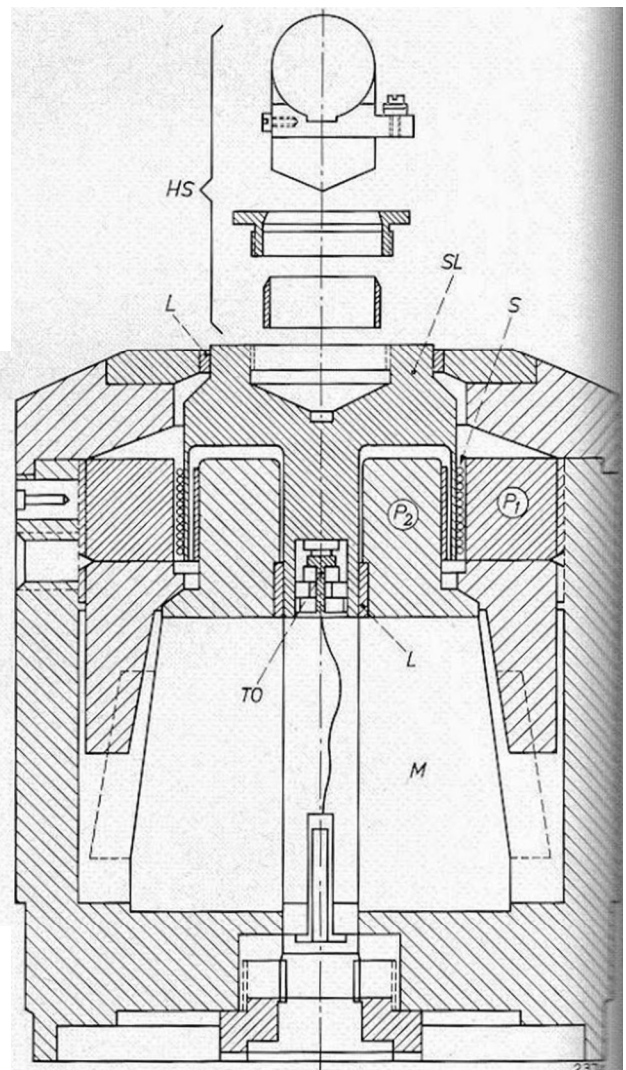


Fig. 7. Doorsnede van een triller voor onderzoek van microfonie van elektronenbuizen. S spoel, SL spoellichaam, L slijflegers, M magneet, P₁ en P₂ poolschoenen, TO trillingsopnemer, HS hulpstukken ter bevestiging van de te onderzoeken buis op het spoellichaam.

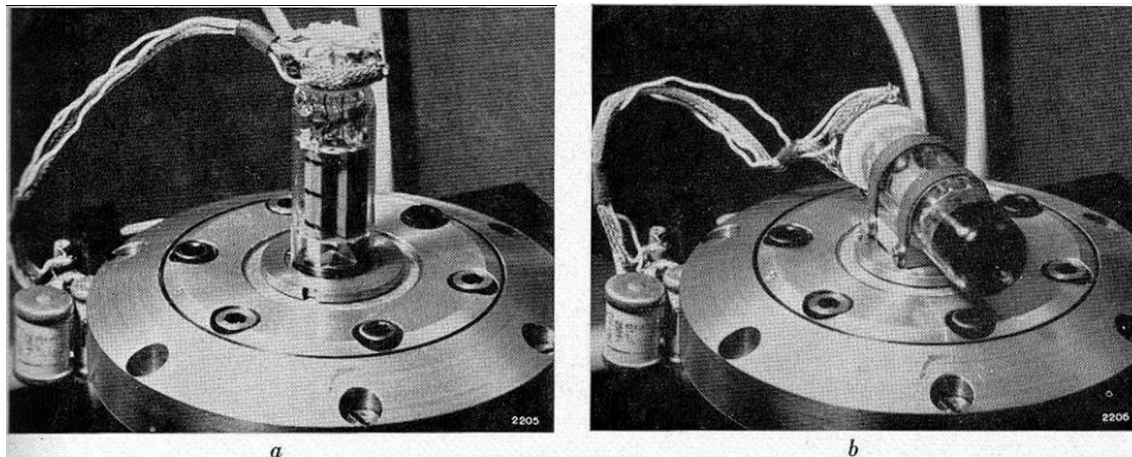


Fig. 8. Bovenste gedeelte van de triller met de te onderzoeken buis, die wordt onderworpen aan trillingen in de lengterichting (a) of in een dwarsrichting (b).

zoek van microfonie in elektronenbuizen. De constructie van de triller lijkt veel op die van een elektrodynamische luidspreker. Het apparaat bestaat nl. in hoofdzaak uit een spoel die kan bewegen in de luechtspleet van een ringvormige magneet. Deze spoel is gewikkeld op een aluminium spoelkoker, die in glijlegers rust. De resonantiefrequentie van dit geheel ligt ongeveer bij 30 kHz, wat aanzienlijk hoger is dan de hoogste frequentie van het gebied waarin de microfonieonderzoeken gewoonlijk plaatsvinden (ongeveer 0 tot 15 kHz). Hierdoor wordt in dit frequentiegebied bij een constante wisselstroom in de spoel een nagenoeg constante amplitude van de wisselende versnelling verkregen. (Voor een versnellingsamplitude van $1g$ was een wisselstroom van 100 mA nodig.) Dit kan vrij eenvoudig worden gecontroleerd door op korte afstand van het bovenvlak van het spoellichaam een stilstaand metalen plaatje op te stellen en de variaties te meten die optreden in de capaciteit tussen dit plaatje en het spoellichaam. Deze capaciteit is immers omgekeerd evenredig met de afstand. Bij een constante lading van de aldus gevormde condensator treden hieraan spanningsvariaties op, waarvan de grootte evenredig is met de uitwijking van de triller. Deze spanningsvariaties kunnen, na versterking, worden gemeten. Zoals uit de theorie van de harmonische trilling volgt, moet, indien de amplitude van de versnelling constant is, de maximale uitwijking omgekeerd evenredig zijn met het kwadraat van de frequentie, dus bij toenemende frequentie per octaaf een factor 4 afnemen. Dit bleek bij de hier beschreven triller in het gewenste frequentiegebied inderdaad het geval te zijn.

Bijzondere zorg dient te worden besteed aan de manier waarop de te onderzoeken buis aan het apparaat wordt bevestigd. Deze bevestiging zou volkomen star, dus niet verend, moeten zijn, omdat anders de trillingen van het spoellichaam niet onafhankelijk van de frequentie aan de buis worden doorgegeven. Nu is enige vering bij de bevestiging van de buis niet te vermijden, en hierdoor vertoont de buis met de bevestigingsmiddelen een resonantie. Om hiervan bij de metingen geen hinder te ondervinden, is het noodzakelijk de constructie zodanig uit te voeren dat de desbetreffende resonantiefrequentie ook weer boven het te onderzoeken frequentiegebied ligt. Enige onderdelen waarmee dit is gelukt, zijn in het bovenste gedeelte van fig. 7 getekend.

Om een voortdurende controle op de trillingen mogelijk te maken, is een trillingsopnemer van het piëzo-elektrische type (met een piëzo-element van bariumtitanaat) aangebracht: in fig. 7 is deze met *TO* aangegeven. Hiermede kan dus tevens worden gecontroleerd of door een eventueel te slappe bevestiging van de te onderzoeken buis een storende resonantie ontstaat.

Fig. 8 toont een tweetal foto's van het bovenste deel van de triller, waarop een buis in twee verschillende standen is bevestigd, zodat deze zowel in de lengte- als in de dwarsrichting aan trillingen kan worden onderworpen.

Metingen met de triller

Met een triller zoals hierboven is beschreven, kan een buis aan een bekende versnelling worden onderworpen die, anders dan bij de in fig. 3, 4 en 5 geïllustreerde meetmethodes, onafhankelijk is van

toevallige resonantiefrequenties van andere delen van de apparatuur. Wanneer nu bij een bepaalde frequentie een bijzonder sterke microfonie optreedt, is deze te wijten aan het feit dat de frequentie waarmee de buis in trilling wordt gebracht, gelijk is aan de resonantiefrequentie van één der onderdelen van de buis. Het opsporen van deze frequenties kan geschieden doordat men de buis door middel van soepele aansluitdraden in een versterkschakeling opneemt en de signaalspanning meet die door microfonie in de schakeling ontstaat terwijl de trillingsfrequentie langzaam wordt gevarieerd. Hiertoe kan met voordeel gebruik worden gemaakt van een registrerende meter. Van aldus verkregen spectrogrammen tonen de figuren 21 t/m 24 enige voorbeelden.

Bij deze en soortgelijke metingen dient de trillingsfrequentie langzaam en zeer gelijkmatig te worden gevarieerd. De mechanische trillingen die de verschillende onderdelen kunnen uitvoeren, zijn n.l. zeer weinig gedempt. Hierdoor kunnen zij slechts in een zeer beperkt frequentiegebied worden opgewekt; vele pieken in het spectrogram zijn zo scherp dat zij gemakkelijk over het hoofd kunnen worden gezien.

Heeft men eenmaal vastgesteld dat bij een bepaalde frequentie een sterk microfonisch effect optreedt, dan is men voor de taak gesteld het onderdeel op te sporen dat hiervan de oorzaak is. Hiertoe kan men op verschillende manieren te werk gaan. Een voor de hand liggende manier bestaat in het berekenen van de resonantiefrequenties van onderdelen waarvan men op grond van theoretische overwegingen kan verwachten dat zeer kleine bewegingen een grote invloed op de elektrische eigenschappen van de buis hebben. Men kan dan nagaan of één dezer frequenties samenvalt met een piek in het spectrogram. Is dit het geval, dan kan men vermoeden dat het desbetreffende onderdeel de oorzaak is van het ontstaan van deze piek. Verdere experimenten moeten dan de juistheid of onjuistheid van dit vermoeden aantonen.

Deze methode van onderzoek werkt in de praktijk zeer onbevredigend. De belangrijkste oorzaak hiervan is wel dat de berekening van de resonantiefrequenties van de onderdelen van een elektrodesysteem in de meeste gevallen slechts met een vrij grove benadering mogelijk is. Enerzijds zijn n.l. alleen voor eenvoudige configuraties exacte formules af te leiden, die in praktische gevallen slechts met benaderingen en correcties kunnen worden toegepast, anderzijds is het meestal niet nauwkeurig bekend op welke wijze de elektrodes zijn ingeklemd of gesteund worden en of zij al dan niet enige speling hebben.

Wij zullen dit laatste illustreren aan de hand van een voorbeeld, en wel van een rooster. De normale constructie hiervan is in fig. 9 geschetst. Het rooster bestaat uit twee roosterstaven, S_1 en S_2 , die in gaten van de micaschijven M_1 en M_2 zijn geplaatst. De roosterdraden D zijn als een schroeflijn om de

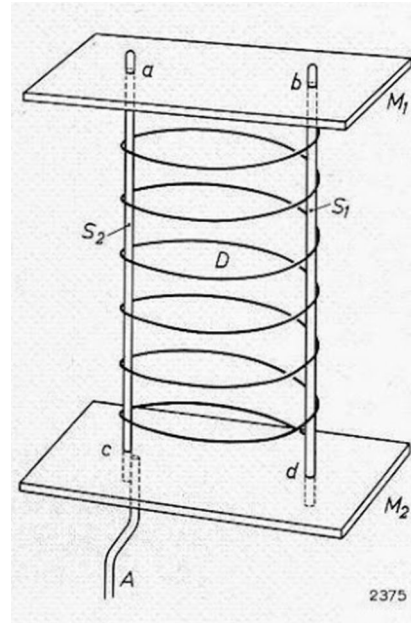


Fig. 9. Vereenvoudigde voorstelling van de constructie van een rooster. S_1 en S_2 roosterstaven, D roosterdraden, M_1 en M_2 micaschijven, die op de plaatsen a , c en d het rooster steunen, A aansluitdraad.

staven gewikkeld. Beschouwt men nu S_1 en S_2 als vrij trillende staven, dan kan hun resonantiefrequentie f_r voor mechanische trillingen worden berekend met behulp van een uit de mechanica bekende formule:

$$f_r = \frac{d}{4l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} K$$

Hierin is d de diameter en l de lengte van de roosterstaaf. Verder is E de elasticiteitsmodulus en ρ de dichtheid van het materiaal, terwijl K een constante is, die afhangt van de wijze waarop de staaf is ingeklemd of gesteund. De grootte dezer constante is:

$K = 0,56$ indien de trillende staaf aan één einde ingeklemd en aan het andere einde vrij is,

$K = 3,56$ indien de staaf aan beide einden is ingeklemd,

$K = 2,45$ indien de staaf aan één einde is ingeklemd en aan het andere einde tegen een steun rust,

$K = 1,56$ indien de staaf aan beide einden tegen steunen rust.

Door de onvermijdelijke spreiding in de afmetingen van de roosterstaven en van de gaten in de micasteunen is het nooit zeker of men de staven ter plaatse a , b , c en d als ingeklemd, gesteund of vrij moet beschouwen. Uiterst kleine verschillen in afmetingen, die op de elektrische eigenschappen van de buis geen merkbare invloed hebben, kunnen wegens de verschillen in K de resonantiefrequentie van de roosterstaven sterk beïnvloeden. Verder geeft ook de aanwezigheid van de roosterdraden D een onnauwkeurigheid in de berekening. Men kan hun invloed in rekening brengen als een vergroting van de soortelijke massa van de roosterstaven, doch dit is uiteraard ook slechts een benadering. Ten slotte kan ook het feit dat aan één der roosterstaven een aansluitdraad A is bevestigd, slechts met een benaderingsmethode in rekening worden gebracht.

Voor de roosterdraden zijn een tweetal empirisch gevonden formules bekend³⁾, die gelden voor draden, gebogen volgens cirkelboog (fig. 10a) en volgens een rechthoek (fig. 10b). Deze formules luiden voor een roosterdraad volgens fig. 10a:

$$\frac{f}{j_r} = \frac{0,217 d}{2,78 a^2 + 0,558 R^2}$$

en voor een draad volgens fig. 10b:

$$\frac{f}{j_r} = \frac{0,217 d}{2,9 a^2 + 0,325 jR^2}$$

Deze formules zijn alleen geldig wanneer a en K ongeveer even groot zijn ($Rja < 2$). Hierdoor, en bovendien door het feit dat de werkelijke vorm van de roosterdraden nooit nauwkeurig aan fig. 10a of b voldoet, is ook hier het resultaat van de berekening slechts een benadering van de werkelijkheid.

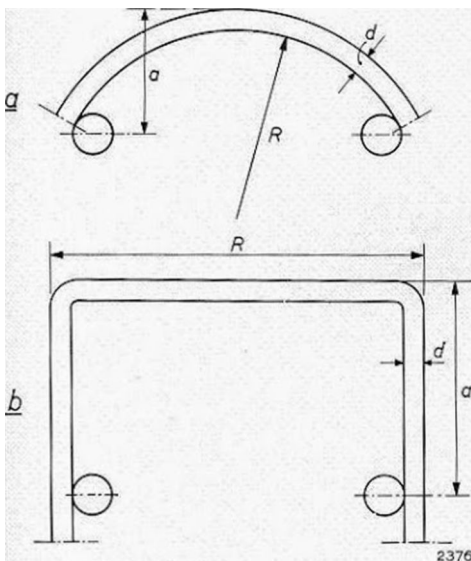


Fig. 10. a) Cirkelvormig gebogen roosterdraad, b) rechthoekig gebogen roosterdraad.

Een andere bron van onzekerheid is het feit dat de vele onderdelen die in een elektrodesysteem mechanische trillingen kunnen uitvoeren, met elkaar zijn gekoppeld, waardoor resonantiefrequenties ontstaan die niet overeenkomen met de resonantiefrequenties van de desbetreffende onderdelen afzonderlijk.

Stroboscopisch onderzoek

De enige methode om met zekerheid een der onderdelen van een buis te kunnen aanwijzen als de oorzaak van een bij een bepaalde frequentie optredende sterke microfonie, is de directe waarneming van het feit dat dit onderdeel bij die frequentie in resonantie is, dus trilt met een grote amplitude. Daar

deze „grote” amplitude in de meeste gevallen voor het blote oog nog niet of nauwelijks waarneembaar is, moet de waarneming door middel van een microscoop geschieden. Verder kan het noodzakelijk zijn de mogelijkheid tot het waarnemen van roosters e.d. te scheppen door voor dit onderzoek enkele buizen te vervaardigen waarbij in de anode of in de afscherming openingen zijn aangebracht.

De frequenties waarbij de onderzoeken plaatshebben, zijn in de regel zo hoog dat de traagheid van het oog de directe waarneming van de beweging verhindert. Men kan echter de bewegingen zichtbaar maken indien men de onderzochte buis door middel van een stroboscoop belicht. De triller en de stroboscoop moeten dan worden gevoed door twee toongeneratoren die wisselspanningen leveren waarvan de frequenties enkele Hz verschillen. Een meetopstelling voor het beschreven doel is schematisch in fig. 11 weergegeven. Wordt de buis in trilling gebracht, dan ziet men in de microscoop de beschouwde onderdelen bewegen met een frequentie die gelijk is aan het verschil van de trillingsfrequentie en de belichtingsfrequentie. Het feit dat één der delen in resonantie is met de trillingsfrequentie, komt, behalve in de amplitude, tot uiting in de fase.

Wanneer een trillend systeem wordt aangedreven door een kracht waarvan de frequentie veel lager is dan de resonantiefrequentie van het systeem, is de uitwijking in fase met de kracht. Is de frequentie van de kracht veel hoger dan de resonantiefrequentie, dan zijn de uitwijking en de kracht in tegenfase. De overgang tussen deze beide toestanden vindt plaats in een frequentiegebied rondom de resonantiefrequentie, dat smaller is naarmate de trillingen van het systeem minder gedempt zijn. Bij de resonantiefrequentie zelf is de faseverschuiving tussen kracht en uitwijking 90°.

Om bij alle frequenties automatisch een verschil van enkele Hz tussen de beide toongeneratoren te krijgen, zou men de frequentie-instelmechanismes met elkaar kunnen koppelen. Het is echter zeer moeilijk om een dergelijke koppeling zodanig uit

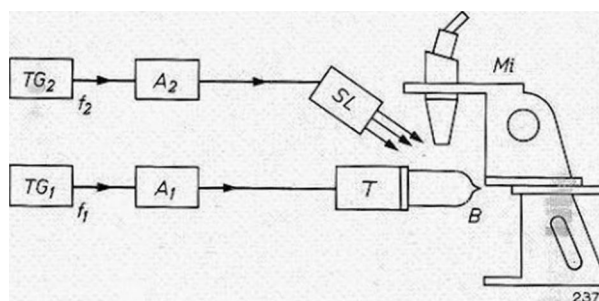


Fig. 11. Principeschema van een opstelling voor stroboscopisch onderzoek van buizen op microfonie. TG_x en TG_2 toongeneratoren, A_x en A_2 versterkers, T triller, B te onderzoeken buis, SL stroboscooplamp, Mi microscoop.

³⁾ Zie P. M. Handley en P. Welch. Valve noise produced by electrode movement, Proc. Inst. Rad. Engrs. 42, 565-573, 1954.

te voeren dat in het gehele in aanmerking komende frequentiegebied het frequentieverschil voldoende klein is. Is dit verschil te groot, dan kan het oog de afzonderlijke trillingen niet meer volgen. Wordt dan één der onderdelen in zijn resonantiefrequentie aangestoten, dan is dit vrijwel niet waarneembaar.

Een verbetering van de waarnemingsmogelijkheden wordt verkregen als men de stroboscoopfrequentie nauwkeurig gelijk maakt aan de trillingsfrequentie, door de triller en de stroboscoop op een gemeenschappelijke toongenerator aan te sluiten. Men ziet dan uiteraard de trillende delen stilstaan, en deze stilstand treedt bij alle frequenties op. Wanneer men echter de frequentie langzaam varieert en hierbij de resonantiefrequentie van een zich in het gezichtsveld van de microscoop bevindend onderdeel passeert, is waar te nemen dat in de trillingen die dit deel uitvoert, de hierboven reeds vermelde fazesprong van 180° optreedt. Men ziet dan dat dit onderdeel tijdens het passeren van een zeer klein frequentiegebied één volledige trilling uitvoert en daarna weer in rust blijft. De grote oplettendheid die wordt vereist om dit verschijnsel waar te nemen, is evenwel een ernstige belemmering voor de toepassing van deze methode bij onderzoeken op grote schaal. Ook aan de apparaten worden hoge eisen gesteld: de frequentie moet uiterst langzaam en continu worden gevarieerd.

De stroboscopische methode van onderzoek is pas een succes geworden nadat een apparatuur was geconstrueerd waarmee het in het gehele te onderzoeken frequentiegebied mogelijk was tussen de trillingsfrequentie en de frequentie van de stroboscopische belichting een constant frequentieverschil van 1 a 2 Hz te handhaven. In fig. 12 is een prinscipeschema van een hiertoe geconstrueerde opstelling weergegeven. Evenals bij fig. 11 wordt de triller aangedreven door de toongenerator *TG* via de versterker *A_v*. De spanning van de toongenerator wordt eveneens gebruikt voor de stroboscooplamp, doch hiervoor eerst toegevoerd aan een frequentiever-

schuiver *FS*, die een uitgangsspanning levert waarvan de frequentie een constant bedrag hoger of lager is dan de frequentie van de toegevoerde spanning. De uitgangsspanning van de frequentieverschuiver wordt gebruikt als stuurspanning voor de impuls-generator *PG*, die kortdurende spanningsimpulsen levert aan de stroboscooplamp *SL*.

De frequentieverschuiver bestaat uit een roterend en een stilstaand gedeelte. De stator is voorzien van een driefazewikkeling. Uit de spanning van de toongenerator (frequentie f) wordt in een speciale versterker een driefazenspanning afgeleid, die aan de stator wordt toegevoerd. Hierdoor ontstaat een draaiveld, dat in de eenfazewikkeling van de rotor een wisselspanning induceert. Staat de rotor stil, dan is de frequentie van deze laatstgenoemde spanning gelijk aan f , doch wordt de rotor rondgedraaid met een snelheid van Af omwentelingen per seconde, dan heeft de in de rotorwikkeling opgewekte spanning een frequentie die, afhankelijk van de draairichting, een bedrag Af hoger of lager is dan f . Wordt nu de rotor met een constante snelheid rondgedraaid, dan wordt dus tussen de toegevoerde spanning en de uitgangsspanning een constant frequentieverschil gehandhaafd.

De te onderzoeken buis *B* is opgenomen in een versterkerschakeling *sl_a*, waarvan de uitgangsspanning aan de oscilloscoop *O* wordt toegevoerd. Aan het andere platenpaar van de oscilloscoopbuis wordt een spanning aangesloten die evenredig is met de stroom waarmee de triller wordt aangedreven. Door het gelijktijdig waarnemen van het beeld in de microscoop en dat op het oscilloscoopscherm kan men nu met grote zekerheid vaststellen of de trillingen van een bepaald onderdeel de oorzaak zijn van een bij een bepaalde frequentie optredende sterke microfonie. Men ziet dan namelijk bij deze frequentie de amplitude van de trillingen die dit onderdeel uitvoert een maximum vertonen, en gelijktijdig ziet men op de oscilloscoop de door microfonie opgewekte wisselspanning een maximale waarde bereiken. Bovendien ziet men tijdens het passeren van de resonantiefrequentie de hierboven reeds aangeduide fazesprong optreden. Deze fazesprong treedt namelijk ook op tussen de stroom die aan de

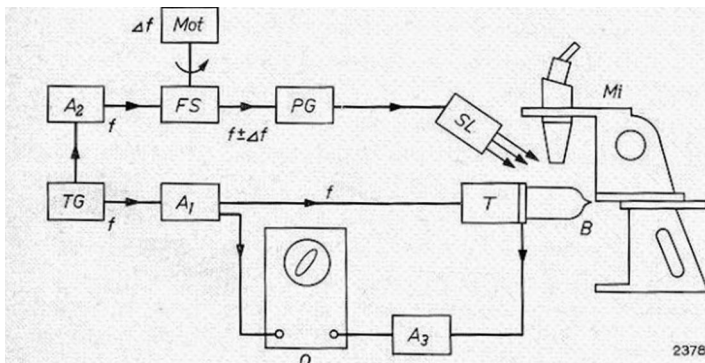


Fig. 12. Prinscipeschema van een opstelling voor stroboscopisch onderzoek van buizen op microfonie. Door middel van de frequentieverschuiver *FS* wordt een constant frequentieverschil van 1 a 2 Hz gehandhaafd tussen de trillingsfrequentie en de frequentie van de stroboscopische belichting. *TG* toongenerator, *A_v*, *A₁* en *A₂* versterkers, *Mot* motor, *PG* impulsgenerator, *SL* stroboscooplamp, *Mi* microscoop, *T* triller, *B* te onderzoeken buis, *O* oscilloscoop.

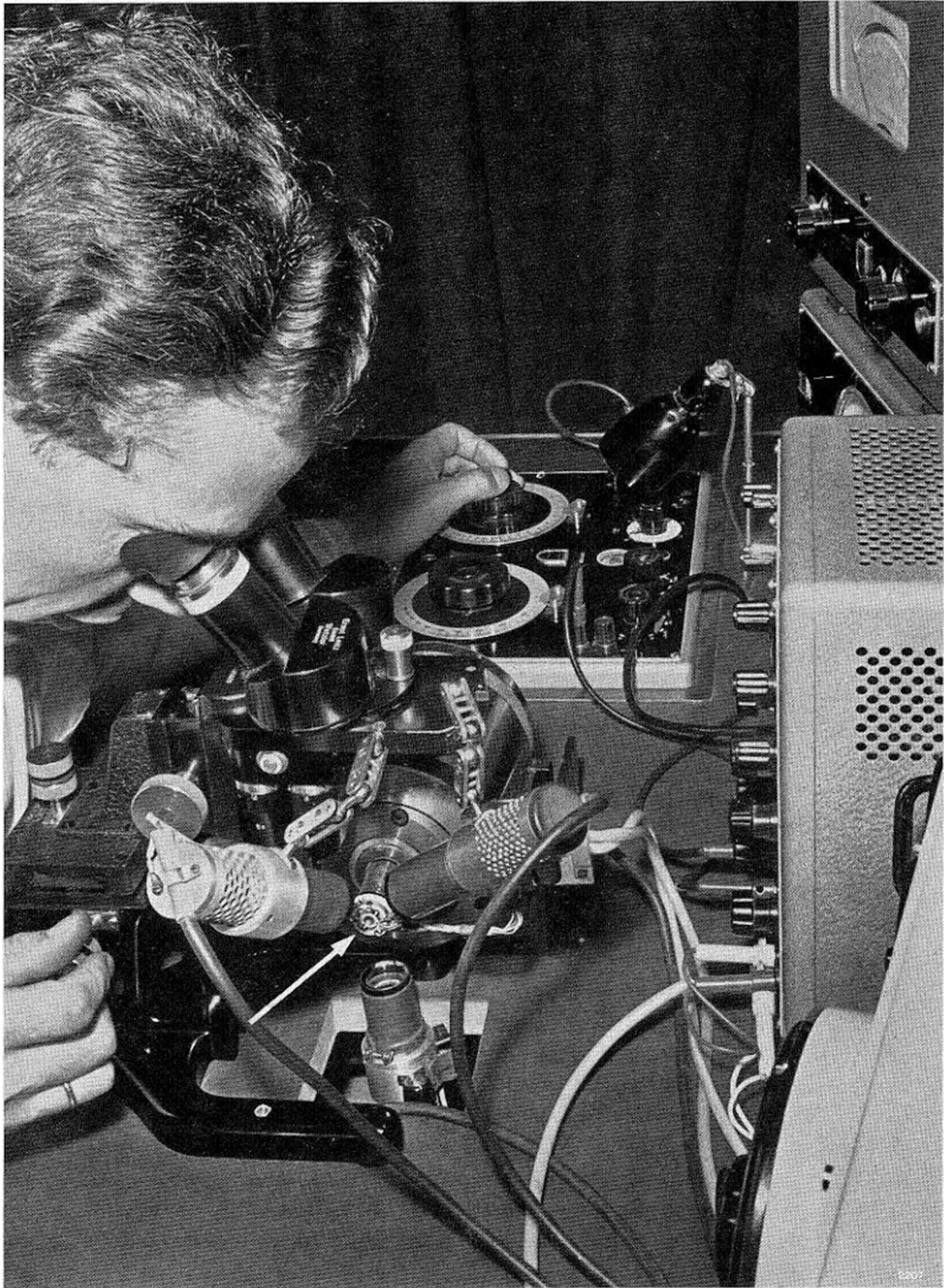


Fig. 13. Onderzoek van een buis op zijn microfonie-eigenschappen. De pijl wijst naar de in onderzoek zijnde buis.

triller wordt toegevoerd en de door microfonie opgewekte spanning, en is dus op de oscilloscoop in een lissajousfiguur zichtbaar.

Door de uiterst geringe demping van de trillingen treden de hier beschreven verschijnselen op in een zo klein frequentiegebied dat het tegelijk in resonantie komen van twee of meer onderdelen, zelfs indien de resonantiefrequenties zeer dicht bij elkaar liggen, vrijwel is uitgesloten.

Fig. 13 toont een foto van een opstelling zoals hier is beschreven. De waarnemer varieert met zijn linkerhand de frequentie van de toongenerator, terwijl hij met zijn rechterhand de microscoop en de stroboscooplamp richt op het te beschouwen onderdeel. Over de rand van het oculair kan hij het beeldscherm van de rechts zichtbare oscilloscoop waarnemen.

De hier beschreven opstelling kan nog op een andere wijze worden gebruikt. Men voert dan aan

de triller niet de versterkte spanning van een toon-generator toe, maar de, eveneens versterkte, wisselspanning die in de te onderzoeken buis door microfonie ontstaat. In vele gevallen zal nu oscilleren optreden, en wel met een frequentie die overeenkomt met de resonantiefrequentie van één der onderdelen. Dit onderdeel zal dan met een grote amplitude trillen en het is in de meeste gevallen niet moeilijk om met de microscoop bij de stroboscopische belichting vast te stellen welk onderdeel dit is. Met deze methode kan uiteraard alleen dat onderdeel worden opgespoord dat de voornaamste bijdrage tot de microfonie levert, doordat bij de resonantiefrequentie van dit onderdeel oscilleren optreedt. Het is echter ook mogelijk de oorzaak van

deel met zijn resonantiefrequentie in trilling wordt gebracht. Om toch een indruk te geven van het trillende onderdeel, zijn hier enige foto's gereproduceerd die zijn verkregen door dubbele belichting, nl. in de uiterste standen van de trilling. Het is immers met een opstelling volgens fig. 12 en 13 op eenvoudige wijze mogelijk het beeld van het onderdeel dat men trillingen ziet uitvoeren, in iedere gewenste stand stil te laten staan. Hiertoe heeft men slechts de motor die de rotor van de frequentieverschuiver ronddraait, stil te zetten. liet beeld blijft dan uiteraard ook stilstaan, en door met de hand de rotor te draaien, kan men deze stilstand in iedere fazepositie doen plaatsvinden.

De figuren 14 t/m 20 tonen enkele onderdelen van

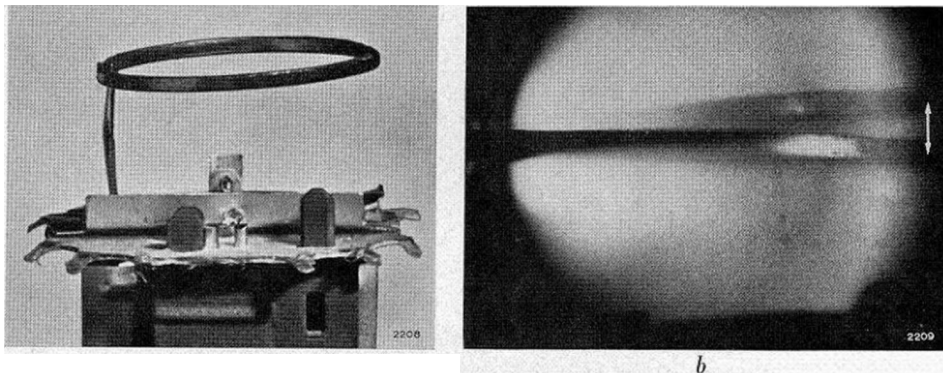


Fig. 14. a) Getter van een elektronenbuis. b) Beeld (lat in de microscoop zichtbaar is als de buis in trilling wordt gebracht met de resonantiefrequentie van de getter (300 Hz).

sterke microfonieverschijnselen bij andere frequenties op deze wijze te vinden, nl. door in de terugkoppelweg een filter op te nemen dat alleen signalen in een beperkt frequentiegebied doorlaat. In dit geval kan alleen oscilleren bij een in dit gebied gelegen frequentie optreden, en het onderdeel dat hiervan de oorzaak is, kan met de microscoop worden opgezocht.

Voor de onderzoekingsmethode met een oscillerende schakeling is het nog meer dan bij de hiervoor besproken methodes van belang dat de triller met de eraan bevestigde buis in het onderzochte frequentiegebied geen resonantiefrequentie heeft. Immers, was dit wel het geval, dan zou de schakeling op deze frequentie kunnen gaan oscilleren, en het zoeken naar het „schuldige" onderdeel zou dan geen resultaat opleveren.

Voorbeelden van microfonie

Het is helaas niet mogelijk door foto's een duidelijke weergave te verkrijgen van het beeld dat in de microscoop wordt waargenomen wanneer een onder-

elektronenbuis en het beeld dat in de microscoop zichtbaar is als de buis met de resonantiefrequentie van het respectieve onderdeel in trilling wordt gebracht. De pijlen geven steeds de richting van de trillingen aan.

Fig. 14 toont een getter, die door zijn grote afmetingen en door het feit dat hij slechts aan één zijde wordt gesteund, een lage resonantiefrequentie heeft, nl. 300 Hz. Het is begrijpelijk dat een dergelijk groot onderdeel, ook al behoort het niet tot het eigenlijke elektrodesysteem, als het in trilling geraakt, een merkbare invloed moet hebben op de werking van de buis.

Fig. 15 toont de beide aansluitdraden van de gloeidraad, die verschillende resonantiefrequenties hebben, nl. 570 en 600 Hz. In fig. 156 en c ziet men de beelden in de microscoop wanneer de buis met één van deze frequenties in trilling wordt gebracht. Men ziet dat telkens één der beide draden vrijwel in rust blijft en de andere trilt.

Fig. 16 laat een keerrooster van een pentode zien, dat door een gat in de anode kon worden waarge-

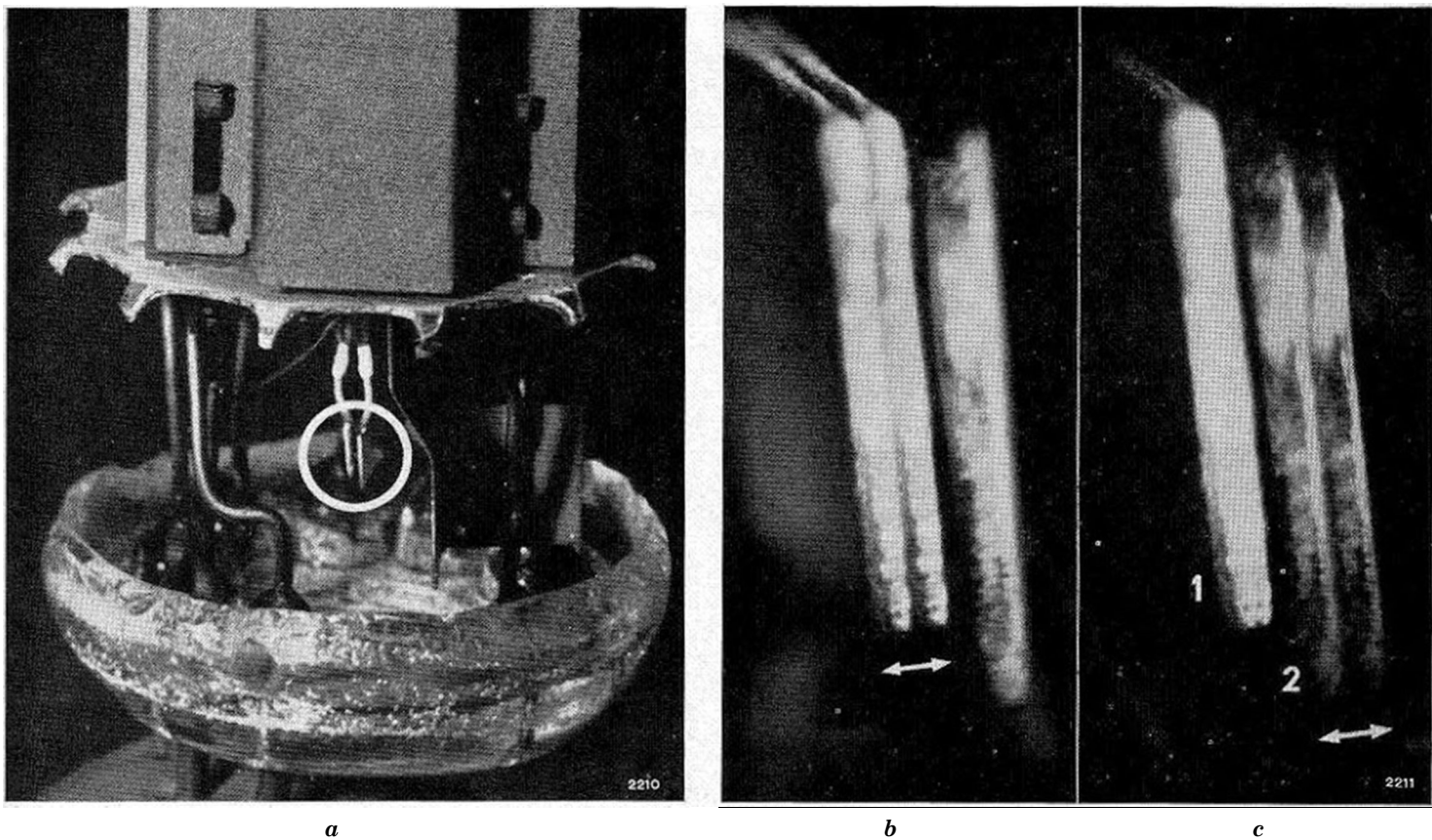


Fig. 15. *a)* Onderste deel van het elektrodesysteem van een elektronenbuis. In de cirkel de gloeidraaduiteinden, waarvan *b)* en *c)* de beelden in de microscoop tonen voor het geval dat de buis achtereenvolgens in trilling wordt gebracht met de resonantiefrequenties van deze beide uiteinden (570 en 600 Hz).

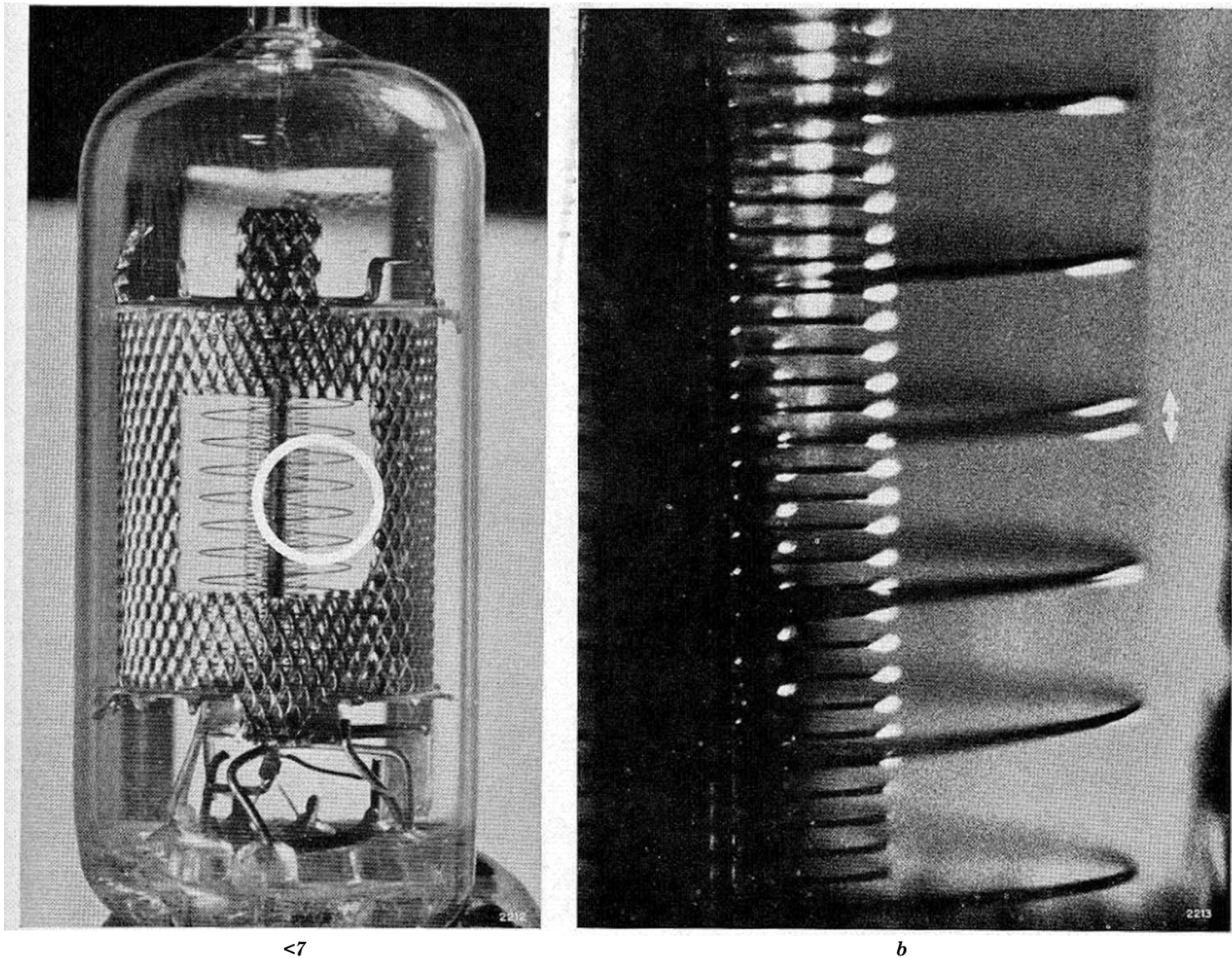


Fig. 16. *a)* Keerrooster van een pentode, zichtbaar door een gat in de anode. In de cirkel het gedeelte waarvan *b)* het beeld in de microscoop toont, wanneer de buis met de resonantiefrequentie van één der roosterdraden (2100 Hz) in trilling wordt gebracht.

nomen. Hoewel de resonantiefrequenties van de windingen onderling slechts weinig verschillen, is in fig. 16i toch duidelijk zichtbaar dat hij de resonantiefrequentie van één hiervan (ongeveer 2100 Hz) alleen deze winding in trilling geraakt. Dit illustreert het feit dat de mechanische trillingen zeer weinig zijn gedempt.

Trillingen van roosterwindingen kunnen een ontoelaatbare microfonie veroorzaken wanneer zij optreden in het schermrooster van een pentode in het hoogfrequentie of middenfrequentiegedeelte van een ontvanger. Is bij een dergelijke buis de

bracht. De resonantiefrequentie van dit rooster bedroeg 1900 Hz.

In fig. 18 is het uiteinde zichtbaar van een katode die enige speling vertoonde in de bovenste mica-steun van het elektrodesysteem en hierdoor bij een vrij lage frequentie (600 Hz) kon trillen. De trillingen van de katode zijn meestal meer gedempt dan die van andere onderdelen, door de invloed van de gloeidraad met zijn isolatie en van de zich op de katode bevindende emitterende laag.

Trillingen van één der delen van een anode bij een frequentie van 1300 Hz zijn in fig. 19 zichtbaar.

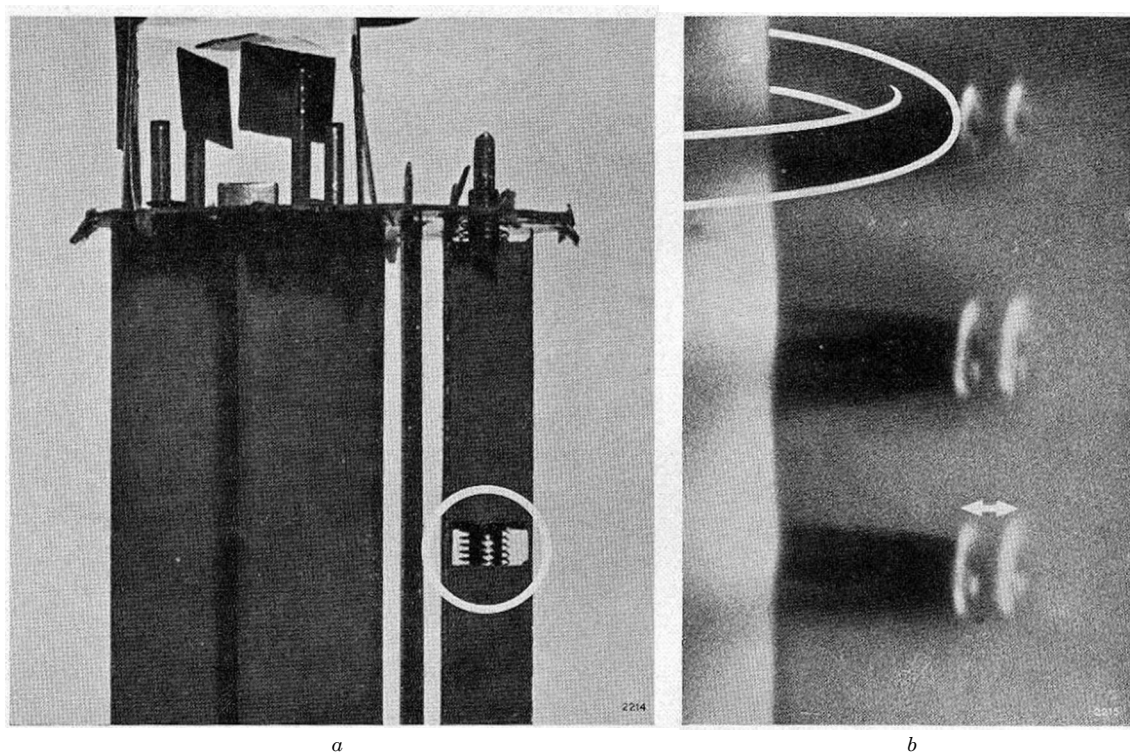


Fig. 17. a) Elektrodesysteem van een triode-hexode. In de cirkel is door een gat in de anode van de triode het rooster zichtbaar, dat in b) in trillende toestand is afgebeeld bij zijn resonantiefrequentie van 1900 Hz.

steilheid door de automatische sterkteregeling tot een kleine waarde gereduceerd, dan passeert de elektronenstroom slechts enkele schermroosterwindingen. Een kleine beweging van één deze windingen heeft dan een grote invloed op de anodestroom en de steilheid. Werkt een dergelijke buis bij een grotere steilheid dan is de invloed van een trillende winding van één der roosters minder groot. Meer hinder wordt dan ondervonden van trillingen die de roosterstaven uitvoeren, doordat hierbij het gehele rooster zijdelings beweegt. Fig. 17 toont het op deze wijze trillende rooster van het triodegedeelte van een triode-hexode. Ook voor deze waarneming moest in de anode een gat worden aange-

bracht. De mogelijkheid tot deze trilling was ontstaan doordat de bevestiging van de beide anodedelen aan elkaar ter plaatse van de pijlen niet op de juiste manier was uitgevoerd.

Dat deze methode van onderzoek ook kan worden gebruikt bij hogere frequenties dan de hierboven genoemde, toont fig. 20, waar de trillingen te zien zijn die een der draden van een raamrooster uitvoerde⁴⁾. De frequentie bedroeg 37 000 Hz. Het behoeft geen betoog dat hierbij zeer hoge eisen

*) De constructie van een dergelijk rooster is beschreven door G. Diemer, K. Rodenhuis en J. G. van Wijngaarden, De EC 57, een schijftriode voor microgolven met L-katode, Philips techn. T. 18, 321-328, 1956.

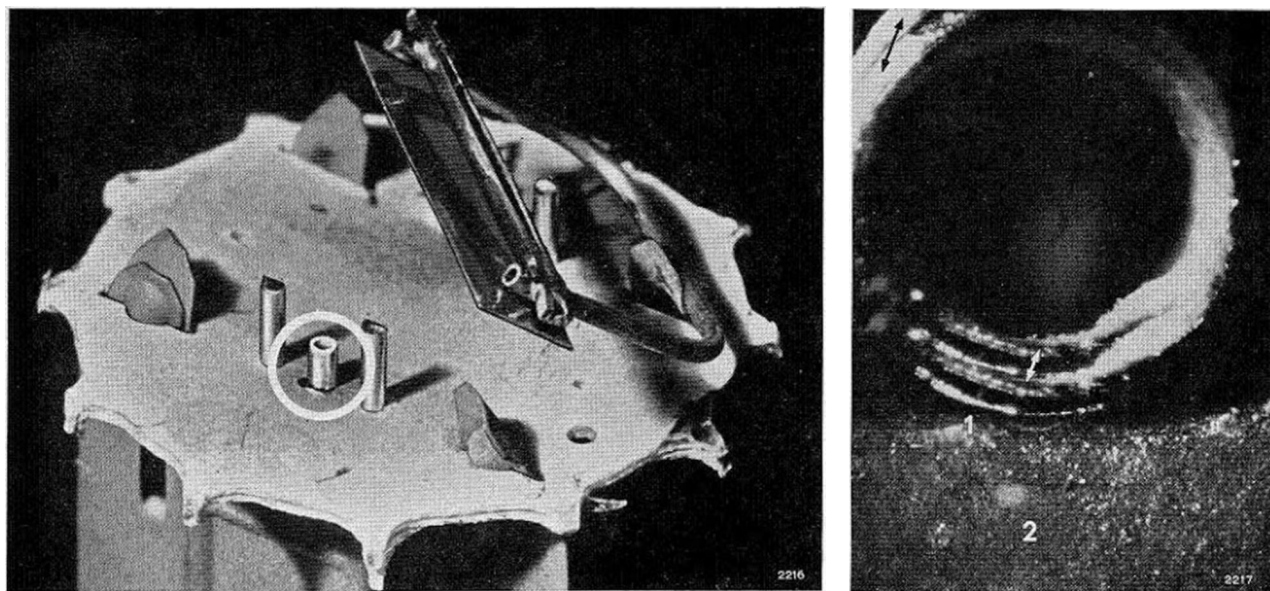


Fig. 18. *a)* Bovenzijde van het elektrodesysteem van een elektronenbuis. In de cirkel het uiteinde van de katode, dat enige speling vertoont in het gat in de micaschijf.
b) Het beeld in de microscoop wanneer de buis met de resonantiefrequentie van de katode (600 Hz) in trilling wordt gebracht.

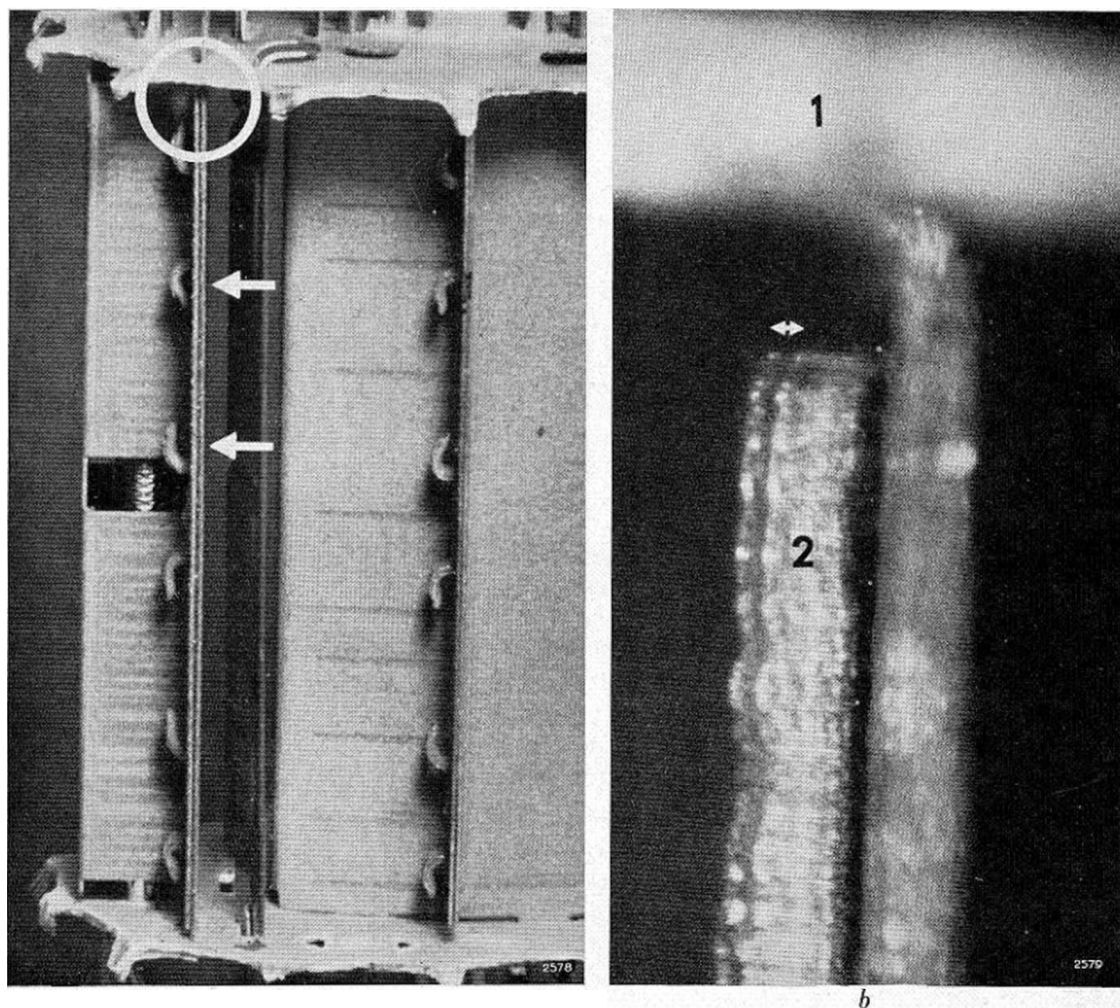


Fig. 19. *a)* Anode van een elektronenbuis. De bevestiging van de beide delen was bij de pijlen niet voldoende stevig, waardoor deze delen ten opzichte van elkaar konden bewegen.
b) Het beeld in de microscoop van het gedeelte in de cirkel voor het geval dat de buis met een frequentie van 1300 Hz in trilling wordt gebracht.

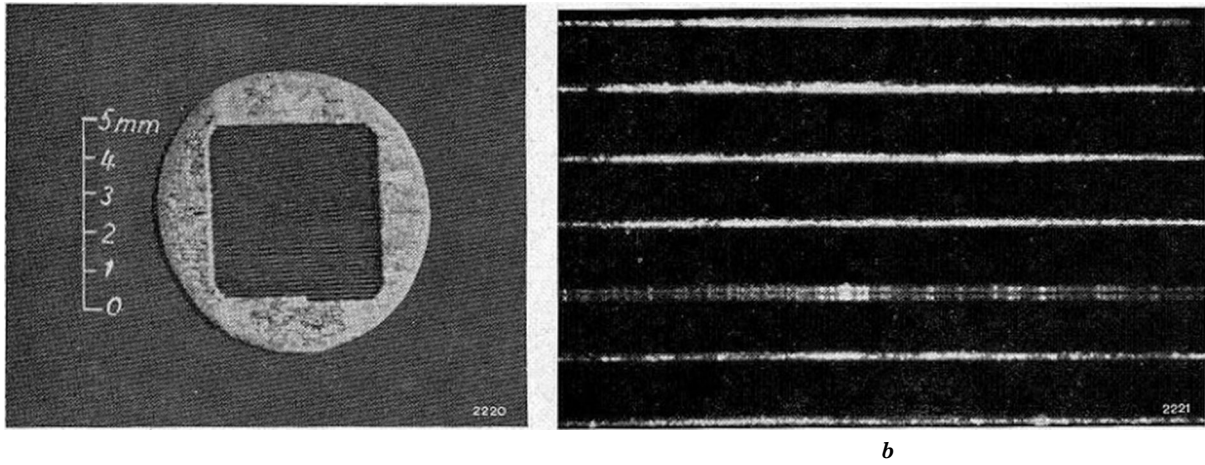


Fig. 20. a) Raamrooster uit een buis voor zeer hoge frequenties.
 b) Het beeld in de microscoop voor het geval dat dit rooster met de resonantiefrequentie van één der draden (37 000 Hz) in trilling wordt gebracht.

worden gesteld aan de triller en ook aan de rest van de schakeling, zoals aan de stroboscooplamp, die uiterst korte lichtimpulsen moet geven om een voldoende scherp beeld te verkrijgen.

Voorbeelden van de bestrijding van microfonie

Wanneer eenmaal is vastgesteld dat een onderdeel een belangrijke bijdrage levert tot de microfonie van een elektronenbuis, is het natuurlijk van veel

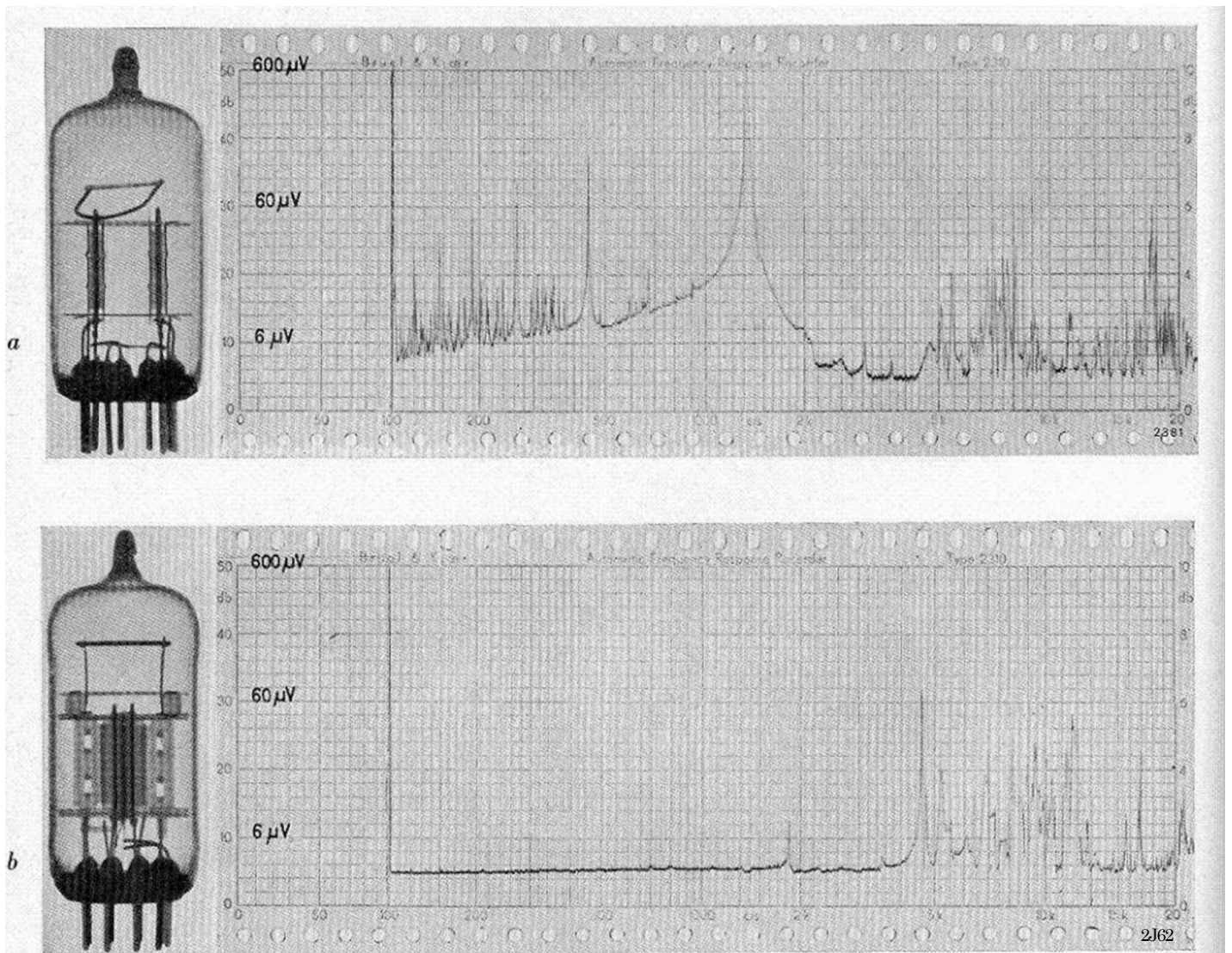


Fig. 21. Invloed van de constructie van de getter op de microfonie van een buis. De beide vergeleken getterconstructies zijn links te zien. De met **b** aangeduide constructie is wat betreft microfonie de beste.

belang na te gaan in hoeverre uit een aangebrachte verbetering ook werkelijk een vermindering van de microfonie resulteert. Men kan dit het beste doen door met behulp van een registrerende meter een spectrogram op te nemen van de door microfonie van een bepaalde buis veroorzaakte signaalspanning als functie van de trillingsfrequentie. We zullen dit illustreren met enkele voorbeelden van aangebrachte verbeteringen. De figuren 21 t/m 24 tonen een aantal spectrogrammen die zijn opgenomen terwijl de in onderzoek zijnde buizen aan trillingen met een constante versnellingsamplitude van 1 m sec^{-2} waren onderworpen in de dwarsrichting van het elektrode-systeem. In de figuren is aangegeven de effectieve waarde van de roosterwisselspanning die een zelfde storend signaal opwekt als hetgeen door de microfonie wordt veroorzaakt.

Fig. 21 illustreert het effect dat werd bereikt door een wijziging in de ondersteuning van de getter. De bovenste figuur werd opgenomen aan een buis

waarbij de getter was bevestigd aan een beugel, die met één punt aan de anode was gelast. De sterke microfonie die optrad bij een frequentie van 1300 Hz, bleek aan deze getter te wijten te zijn. Wird de getter op twee plaatsen bevestigd in de micasteun, dus niet met één der elektrodes verbonden, dan werd een aanzienlijke verbetering verkregen, zoals het onderste spectrogram toont. Bij frequenties lager dan 1850 Hz is de buis nu vrij van microfonie.

Fig. 22 toont de verbetering die werd bereikt door een enkelvoudige bevestigingslip van de anode te vervangen door een dubbele, waardoor de speling die eerst in het mica optrad, verdwenen was. Bij de constructie volgens de bovenste figuur konden de beide delen van de anode ten opzichte van elkaar trillen, wat bij de in het onderste deel van de figuur weergegeven constructie in veel mindere mate het geval was. De hoge piek bij ongeveer 780 Hz in het bovenste spectrogram is hierdoor in het onderste verdwenen.

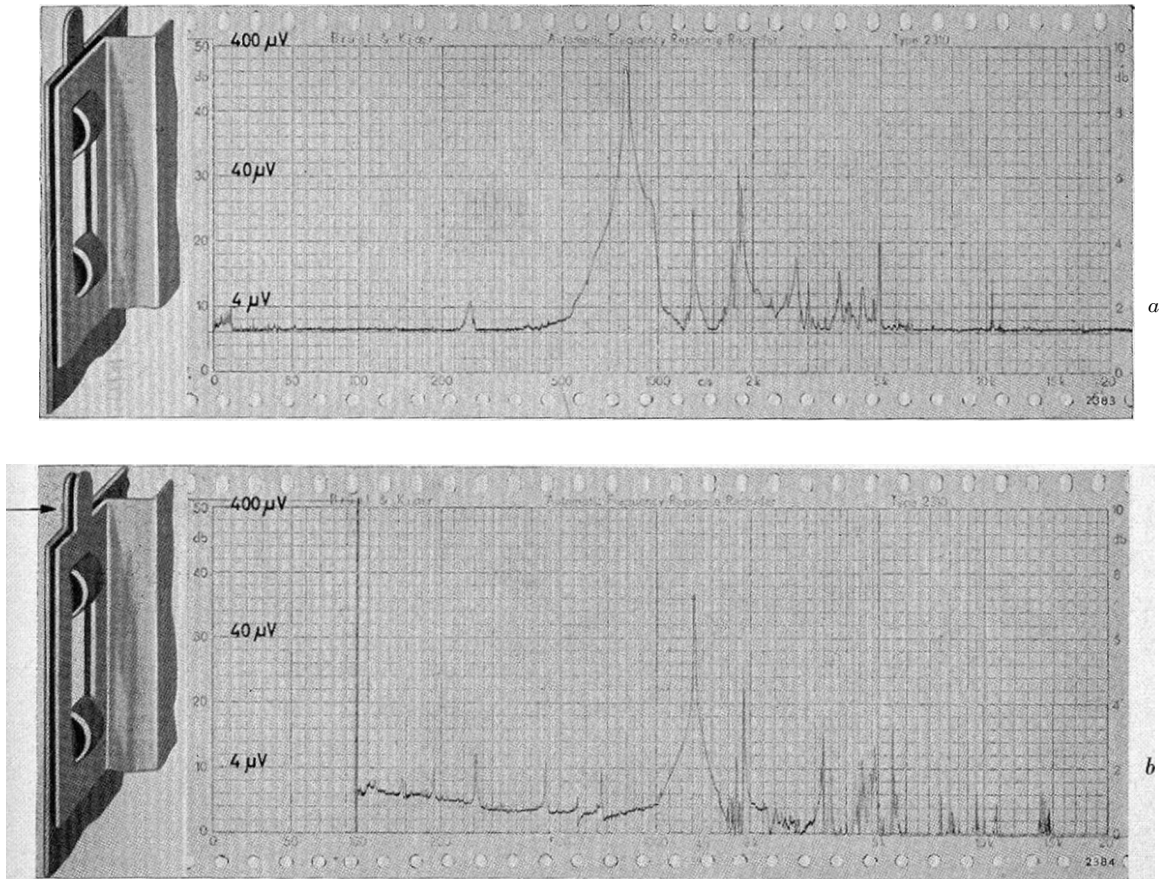


Fig. 22. Invloed van de bevestiging van de anode op de microfonie van een buis. De bevestigingsmethode met een enkelvoudige lip (a) is slechter dan die met een dubbele lip (b).

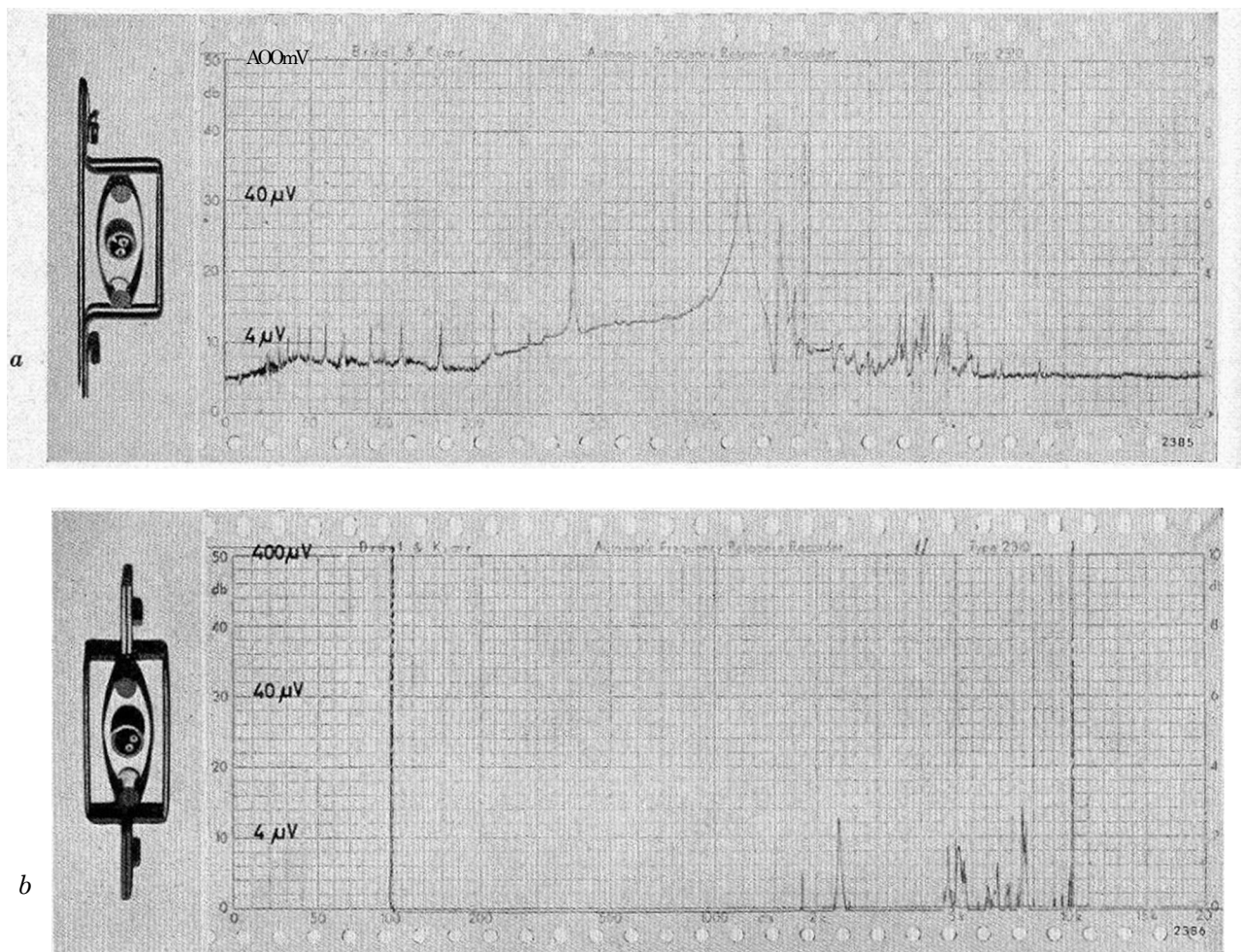


Fig. 23. Invloed van de constructie van de anode op de microfonie. De in (a) aangegeven constructie is veel slechter dan de in (b) getoonde.

De verbetering die in een ander geval werd verkregen door een gewijzigde constructie van de anode, blijkt uit *fig. 23*. Een anode die uit twee rechthoekig omgezette gedeelten bestaat (onderste figuur), is veel stijver dan een anode waarbij een der delen vlak is (bovenste figuur). De grote verbetering uit het oogpunt van microfonie komt in de beide spectrogrammen treffend tot uiting.

Wanneer de verschillende onderdelen die aanleiding geven tot microfonie, systematisch worden opgespoord en verbeterd, kan een resultaat worden verkregen zoals in *fig. 24* is geïllustreerd. De bovenste figuur geeft hier het spectrogram weer van een buis die bij verschillende frequenties een zeer hinderlijke microfonie vertoonde. Na het aanbrengen van de noodzakelijke verbeteringen in de constructie werd het onderste spectrogram verkregen, waaruit blijkt dat deze buis zo goed als vrij is van microfonie.

Het is niet altijd mogelijk alle verbeteringen die met het oog op microfonie wenselijk zouden zijn,

ook werkelijk in de serieproductie van de buizen in te voeren. Vaak spelen ook overwegingen van geheel andere aard een rol, zoals de invloed die de gewenste verbeteringen hebben op de elektrische eigenschappen van de buis, op de kostprijs of op het benodigde gereedschap. Wanneer echter de oorzaken der microfonie voldoende bekend zijn — en met de in het bovenstaande beschreven methodes zijn deze vrijwel altijd op te sporen —, kan meestal een oplossing worden gevonden die ook uit andere oogpunten dan die der microfonie bevredigt.

Microfonieonderzoek met behulp van ruis

De in het voorgaande beschreven methode levert bij het opsporen van de oorzaken van microfonie vele goede resultaten op. In bepaalde gevallen kan echter met een eenvoudiger en minder tijdrovend onderzoek worden volstaan. Dit kan het geval zijn wanneer men niet de oorzaken van microfonie wil nagaan, doch uitsluitend buizen onderling wil vergelijken, b.v. om statistische gegevens te verzamelen omtrent het effect van bepaalde wijzigingen in de constructie. In dergelijke gevallen kan men vaak volstaan met het opnemen van een spectrogram.

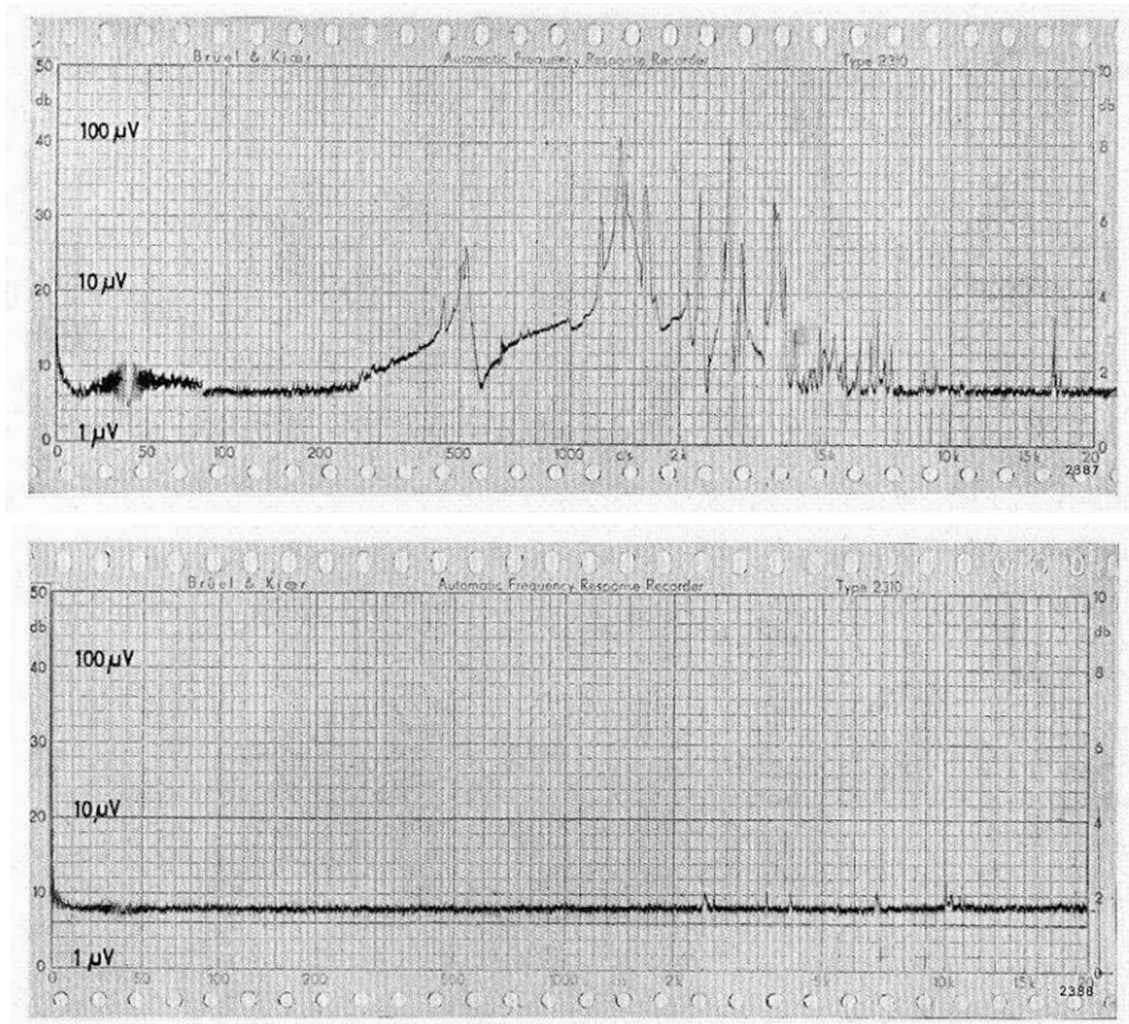


Fig. 24. Spectrogrammen van een buis *a)* vóór en *b)* na het aanbrengen van een aantal verbeteringen ten aanzien van microfonie.

Gebeurt dit op de hierboven beschreven wijze, dus door de buizen te onderwerpen aan sinusoidale trillingen met een veranderlijke frequentie, dan is voor het verkrijgen van een goed spectrogram toch altijd een tijd van enkele minuten nodig. Men mag nl. hierbij de frequentie niet te snel variëren, omdat, zoals wij hierboven reeds hebben uiteengezet, de mechanische trillingen van onderdelen van elektronenbuizen zeer weinig zijn gedempt en hierdoor bij een te snel verlopen van de proef het gevaar bestaat dat sommige pieken in het spectrogram niet worden gevonden.

Bij een methode die wij tot slot in het kort willen beschrijven, heeft men een sneller verloop trachten te verkrijgen door aan de triller waarop de buis is bevestigd, niet een sinusoidale wisselstroom toe te voeren waarvan de frequentie wordt gevarieerd, doch een stroom die componenten met alle frequenties gelijktijdig bevat, dus een stroom die door een ruisbron wordt geleverd. In dit geval zullen alle onderdelen die in het te onderzoeken frequentiegebied resonantiefrequenties hebben, gelijktijdig in deze resonantiefrequentie worden aangestoten. Wordt de buis in een versterkschakeling opgenomen, dan ontstaat, door microfonie een spanning die is samengesteld uit vele wisselspanningscomponenten. Het meten van de effectieve waarde van deze spanning geeft reeds een indruk van de mate waarin de onderzochte buis „microfonisch” is, doch een beter inzicht kan men verkrijgen als men de spanningscomponenten

meet met behulp van een selectieve spanningsmeter, die slechts de spanning in een smal frequentiegebied aangeeft. Door dit smalle gebied over de gehele te onderzoeken frequentieband te verschuiven, kan men weer een spectrogram verkrijgen. Een en ander kan nu zodanig worden uitgevoerd dat dit direct op een oscilloscoopscherm zichtbaar is.

Fig. 25 toont als voorbeeld een op deze wijze verkregen spectrogram. Het is mogelijk gebleken goed reproduceerbare

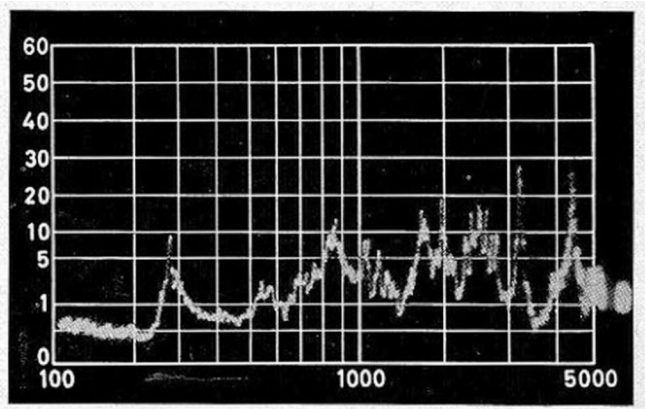


Fig. 25. Beeld op het oscilloscoopscherm bij microfonieonderzoek volgens de ruismethode.

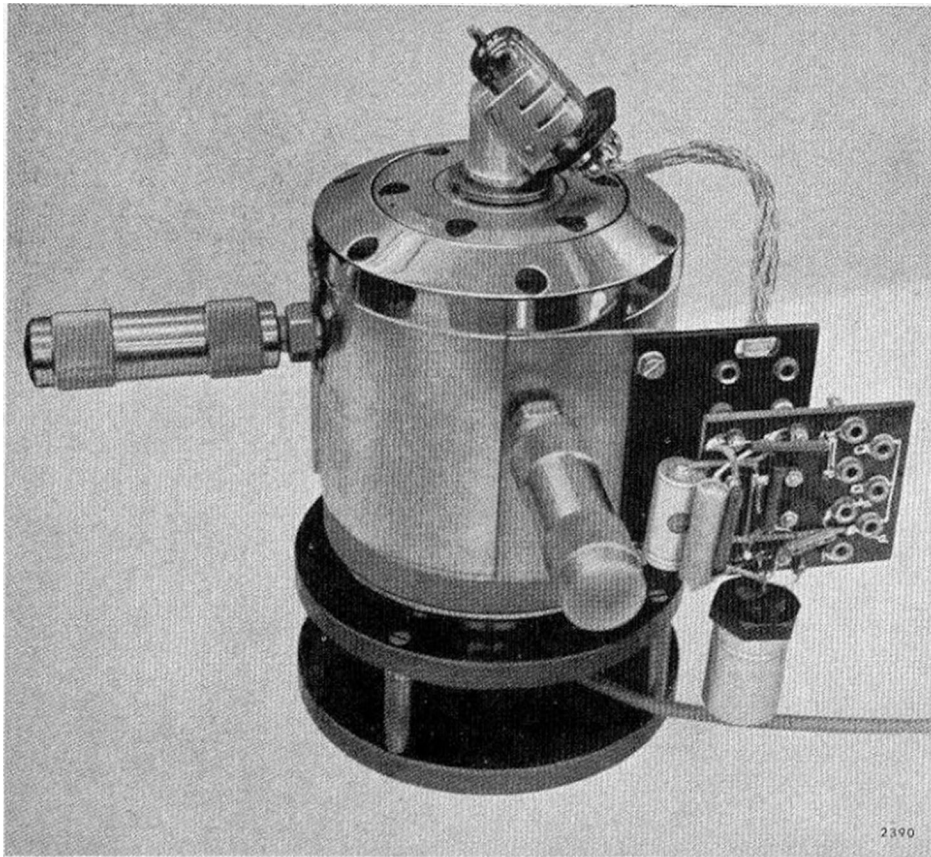


Fig. 26. Triller, gebruikt bij microfonieonderzoek volgens de ruismethode. De onderzochte buis is in een schuine stand op het apparaat vastgeklemd.

grafieken, te verkrijgen als de selectieve spanningsmeter het gehele frequentiegebied in ongeveer 15 sec doorloopt. Bij gebruik van een lang nalichtende oscilloscoopbuis is dit voldoende snel om het gehele spectrum tegelijk te kunnen zien.

In *fig. 26* is een triller afgebeeld die werd gebruikt voor microfonieonderzoek met ruis. De buis is in een schuine stand op het apparaat bevestigd, om op deze wijze een algemeen beeld van de microfonie-eigenschappen te verkrijgen. De buis trilt nu nl. gelijktijdig in de lengte- en in de dwarsrichting.

Ken bezwaar van de ruismethode is dat de hoogte waarmede pieken in het spectrogram worden weergegeven, afhankelijk is van hun breedte. Immers, de selectieve versterker laat een bepaalde smalle frequentieband door, en de verticale afbuiging van de oscilloscoop is evenredig met de waarde van het microfoniesignaal, gemiddeld over deze gehele frequentieband. Een piek die smaller is dan de doorgelaten bandbreedte, wordt hierdoor minder hoog weergegeven dan een even hoge, doch bredere piek. Het beeld op het oscilloscoopscherm geeft dus geen exacte voorstelling van het spectrogram, en bij de beoordeling moet men met deze omstandigheid rekening houden.

Mede om deze reden is de ruismethode geen succes geworden. Het is nl. gebleken dat, als men de genoemde fout op de koop toe wil nemen, ook bij het gebruik van sinusoidale trillingen een versneld onderzoek zeer wel mogelijk is. Doorloopt men hierbij het gehele frequentiegebied in een korte tijd, b.v.

eveneens in 15 sec, dan worden ook hier de hoge pieken in het spectrogram niet in de juiste verhouding weergegeven. Toch is het op deze wijze verkregen beeld nog beter dan hetgeen men met de ruismethode verkrijgt. Dit laatste feit, te zameu met de omstandigheid dat een opstelling voor microfonie-onderzoek met ruis veel gecompliceerder is dan een installatie voor sinusoidale trillingen, heeft gemaakt dat in onze laboratoria aan de laatstgenoemde methode de voorkeur wordt gegeven.

Samenvatting. Verschillende methodes worden beschreven waarmee men elektronenbuizen kan onderzoeken met betrekking tot microfonie. Enkele direct op de praktijk gebaseerde methodes zijn wel bruikbaar voor het onderling vergelijken van buizen, doch geven geen uitsluitsel omtrent de oorzaak van de optredende microfonie. Om dit laatste mogelijk te maken, is een triller geconstrueerd waarmede een buis kan worden onderworpen aan een trilling met een constante versnellingsamplitude en een veranderlijke frequentie. Met behulp van een microscoop en stroboscopische belichting kan men nu rechtstreeks waarnemen welke onderdelen door hun trillingsmogelijkheid aanleiding tot microfonie geven. Enkele bereikte resultaten worden met spectrogrammen geïllustreerd. Ten slotte wordt nog een methode beschreven waarbij een ruisgenerator wordt gebruikt. Het spectrogram wordt hierbij op het scherm van een oscilloscoop zichtbaar.