

DAS RAUSCHEN VON PENTODEN BEI NIEDRIGEN FREQUENZEN

I. P. VALKÓ, Á. KEMÉNY und A. PÁLFI

Lehrstuhl für Elektronenröhrentechnik der Technischen Universität, Budapest
und Forschungsinstitut für die Nachrichtentechnische Industrie, Budapest

(Eingegangen am 6. November, 1958)

Zielsetzung

In der Nachrichtentechnik werden im allgemeinen unerwünschte Signale, die also keinen zu befördernden Informationsinhalt besitzen, als Rauschen bezeichnet. Im engeren Sinne bleibt jedoch dieser Begriff den statistischen, zufälligen elektrischen Schwankungen vorbehalten. Diese Schwankungen sind Folgen physikalischer Gesetzmäßigkeiten, weshalb sie nicht vollständig unterdrückt werden können. Sogar die Möglichkeit, diese Rauschsignale von den Signalen zu unterscheiden, die eine Information enthalten, ist sehr beschränkt. Dies hat also zur Folge, daß das aus den Schwankungen resultierende Rauschen die nutzbare Verstärkung bzw. die Empfindlichkeitsgrenze eines Verstärkers bestimmt. Liegen nämlich bei einem sehr empfindlichen Gerät die nützlichen Signale in der Größenordnung der Rauschsignale, dann ist es genau so zwecklos, seine Empfindlichkeit weiter zu steigern, wie etwa bei einem Mikroskop die Erhöhung der Vergrößerung über die Grenzen der Auflösungsfähigkeit hinaus.

Das Auftreten dieser Schwankungen wird physikalisch im allgemeinen mit dem Vorhandensein einer großen Anzahl von Einzelvorgängen erklärt, wie beispielsweise mit der Bewegung von Elektronen oder Ionen, die natürlich nicht einzeln verfolgt werden können. Nur die auf Grund der Wahrscheinlichkeitsrechnung aufgestellten statistischen Gesetze können uns ein Bild über die Natur dieser Vorgänge liefern.

Ein derartiges Gesetz ist z. B. die Gaußsche Verteilung, die besagt, in welchem Maße die auftretenden Augenblickswerte zufälliger Schwankungen vom Mittelwert der untersuchten Menge abweichen. Wird der Mittelwert mit μ bezeichnet, die Streuung dagegen mit σ , dann kommt der Augenblickswert x mit der Wahrscheinlichkeit

$$P(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

vor. Da jede nachrichtentechnische Einrichtung bekanntlich innerhalb eines gewissen Frequenzbandes arbeitet, kann die Größe des wirklich wahrnehmbaren Rauschens mit Hilfe der Fourierschen Reihe der Zeitfunktion bestimmt werden. Ist z. B. die Stromschwankung $I(t)$ und die Fouriersche Komponente dieser Schwankung im Frequenzband df gleich i , so ist der effektive quadratische Schwankungsdurchschnitt im Band df

$$\bar{i}^2 = W(f) df. \quad (2)$$

Diese Fourierkomponenten gehen auf gleiche Weise wie die gewöhnlichen Signale mit der Frequenz f durch den Verstärker.

Die Funktion $W(f)$ wird allgemein spektrale Intensität genannt. In einfachen Fällen ist dieser Wert eine frequenzunabhängige Konstante. Diese Art von Rauschen wird als weißes Rauschen bezeichnet.

Die verschiedenen Bauelemente der Stromkreise elektronischer Einrichtungen bilden die Ursache für das Entstehen unterschiedlicher Rauscharten. Ganz besondere Aufmerksamkeit wurde seitens der Wissenschaft dem Rauschen der Elektronenröhren geschenkt, so daß dessen Entstehungsgründe sowie die Art und Weise der Grenzen der Rauschunterdrückung im mittleren Frequenzbereich vollständig und bei sehr hohen Frequenzen zum größten Teil geklärt sind. Bei sehr kleinen Frequenzen kann jedoch ein Gleiches nicht behauptet werden. Die Untersuchung dieser Art des Rauschens benötigt nämlich einen enormen Aufwand von Versuchsarbeit und auch die theoretischen Grundlagen sind noch nicht genügend ausgebaut.

Diese Tatsache veranlaßte das Forschungsinstitut für die Nachrichtentechnische Industrie, das Rauschen von Elektronenröhren bei niedrigen Frequenzen zu untersuchen. Diese langwierige Arbeit gliedert sich in mehrere Einzelaufgaben. Im vorliegenden Aufsatz soll eine für die Praxis besonders wichtige Frage behandelt werden, und zwar der Vergleich von Trioden und Pentoden in Bezug auf das Niederfrequenzrauschen, enthält doch die sehr spärliche diesbezügliche Literatur keine eindeutige Stellungnahme zu dieser Frage (1).

Schrotrauschen

Bevor wir auf unsere eigenen Untersuchungen näher eingehen, sind wir gezwungen, einige wichtige, das Rauschen betreffende Sätze hier zusammenzufassen, weil wir uns später, bei der Erklärung der Ergebnisse mehrfach auf sie berufen.

Zuerst soll daran erinnert werden, daß aus thermodynamischen Gründen jede Impedanz eine Rauschquelle darstellt, die bei optimaler Anpassung im

Frequenzband Δf eine Leistung $kT\Delta f$ liefert. Wird diese Impedanz als Strom- oder Spannungsquelle angesehen, so erhält man als effektiven Wert des Quadrates des Quellenstromes

$$\bar{i}^2 = \frac{4kT}{R} \Delta f, \quad (3)$$

für das Quadrat der Quellenspannung dagegen

$$\bar{u}^2 = 4kTR\Delta f. \quad (4)$$

T bedeutet hier die absolute Temperatur, während k die Boltzmannsche Konstante ist, die den Wert $1,38 \cdot 10^{-23}$ Joule/Grad hat. Die Größe dieses Rauschens ist unabhängig vom Gleichstrom, der durch die Impedanz fließt, und in (3) und (4) kommt der Wert der Elementarladung nicht vor. Unter den Rauscharten, die in Elektronenröhren auftreten, ist das sogenannte Schrot-rauschen die bekannteste Erscheinung. Diese Rauschart hat ihre Ursache in der Schwankung der Anzahl der Ladungsträger endlicher Größe, die sich in einer Richtung fortbewegen. Bei Röhren, die im Sättigungsgebiet arbeiten, ist das Quadrat des Rauschquellenstromes innerhalb des Frequenzbandes Δf

$$\bar{i}^2 = 2eI\Delta f, \quad (5)$$

wo I den Anodenstrom und $e = 1,60 \cdot 10^{-19}$ C. die Ladung eines Elektrons bedeutet. Wie bekannt, beschränkte sich die Ableitung obiger Gleichung auf Frequenzen, bei denen die Durchlaufzeit eines Elektrons noch als unendlich kurzer Impuls angesehen werden kann. Zu ganz anderen Ergebnissen gelangt man bei Elektronenröhren, die im Raumladungsgebiet arbeiten. Im obigen Fall wurde der Durchgang eines Elektrons als unabhängiges Ereignis betrachtet, wogegen der Raumladungsfall eben dadurch gekennzeichnet ist, daß jedes einzelne, aus der Katode austretende Elektron das negative Kraftfeld vor der Katode verstärkt, was den Durchlauf weiterer Elektronen erschwert. Durch diese Regulierwirkung der Raumladung werden mithin die Stromschwankungen geglättet. Da jedoch nicht alle Elektronen mit derselben Anfangsgeschwindigkeit austreten, tragen sie in verschiedenem Maße zur Aufrechterhaltung der Raumladung bzw. des negativen Kraftfeldes bei. Es schwankt aber statistisch auch die Geschwindigkeitsverteilung der Elektronen, somit bleiben auch im Strom der im Raumladungsgebiet arbeitenden Röhre gewisse Schwankungen bestehen, die jedoch bei normaler Wirkungsweise im Verhältnis zu den Schwankungen im Sättigungsgebiet bei derselben Stromstärke sehr klein sind.

Bei Raumladung kann das Quadrat des Quellenstromes annähernd durch die Gleichung

$$\bar{i}^2 = 2e(1,6 S U_T) \Delta f \quad (6)$$

ausgedrückt werden (2), wo $U_T = \frac{kT_K}{e}$ die sogenannte Thermospannung,

T_K die Temperatur der Kathode und S die Steilheit bedeutet.

Das Quadrat des Rauschstromes wächst also annähernd proportional mit der Steilheit bzw. mit der Kubikwurzel des Anodengleichstromes an. Bei der Berechnung der Rauschspannung am Belastungswiderstand, muß man im Gegensatz zum Sättigungsfall den endlichen Wert des Innenwiderstandes mit berücksichtigen.

Bei Verstärkerröhren wird im allgemeinen die Größe des Rauschens nicht mit dem Rauschwert im Sättigungsfall verglichen, sondern es wird der Wert des äquivalenten Widerstandes angegeben. Darunter ist derjenige Widerstand zu verstehen, der, an das Steuergitter der Röhre gelegt, bei Raumtemperatur im Anodenkreis der Röhre denselben Rauschstrom erzeugen würde, der durch den Elektronenstrom in Wirklichkeit auftritt. Der Wert dieses äquivalenten Rauschwiderstandes wird bei Trioden heute allgemein üblichem Aufbaues in guter Annäherung durch die Gleichung

$$R_{aeq} = \frac{3}{S} \quad (7)$$

ausgedrückt.

Bei Elektronenröhren, in denen sich der Strom auf mehrere positive Elektroden verteilt, erhält man wieder andere Ergebnisse. Dieser Fall trifft auch für Pentoden zu.

Die Tatsache, daß hier eine Stromverteilung auftritt, bedeutet, daß auch dann noch ein Rauschen bestünde, wenn der ganze Kathodenstrom rauschfrei wäre. Der Grund hierfür ist darin zu suchen, daß bei jedem Elektron ein zufälliger Vorgang entscheidet, ob das Elektron an das Schirmgitter oder an die Anode gelangt. Deshalb hat es im ersten Augenblick den Anschein, als könnte die Schwankung des Schirmgitterstromes genau so angegeben werden wie die Schwankung des Sättigungsstromes, u. zw. zu

$$\bar{i}^2 = 2eI_2 \Delta f. \quad (8)$$

I_2 bedeutet hier den Schirmgitterstrom, doch muß berücksichtigt werden, daß die Schwankung der auf das Schirmgitter gelangenden Elektronen dennoch beschränkt ist, weil die Zahl sämtlicher Elektronen durch den Wert des Kathodenstromes vorgegeben ist. Mit Hilfe der Wahrscheinlichkeitsrechnung

läßt sich nachweisen, daß sich in diesem Fall das Quadrat des aus der Verteilungsschwankung resultierenden Rauschstromes zu

$$\bar{i}^2 = 2eI_2 \frac{I_a}{I_a + I_2} \Delta f \quad (9)$$

ergibt. Die Verteilung erzeugt natürlich auch im Anodenstrom dasselbe Rauschen, da die Summe der beiden Schwankungen in jedem Augenblick Null ist.

Aus den früher erwähnten Gründen enthält jedoch der Anoden- und Schirmgitterstrom auch das durch die Raumladung geschwächte ursprüngliche Schrotrauschen, das sich im Verhältnis der Stromstärken auf die beiden Elektroden verteilt. Demnach ist

$$\bar{i}_a^2 \approx 2e(1,6 SU_T + I_2) \frac{I_a}{I_a + I_2} \Delta f \quad (10)$$

bzw.

$$R_{aeq} \approx \frac{3}{S} + \frac{20 I_2}{S^2} \quad (11)$$

(Einheiten im MKSA. System.)

Bei normalen Arbeitsbedingungen ist das Rauschen einer Röhre in Pentodenschaltung ungefähr zweimal so groß wie in Triodenschaltung.

Flickerrauschen (Funkeffekt)

Den bisherigen Betrachtungen lag der gemeinsame Ausgangspunkt zu Grunde, daß der die Röhre durchfließende Strom als der Durchgang einzelner Elektronen angesehen wurde. Mit dieser Auffassung kann jedoch die aus der Praxis gewonnene Erfahrung nicht erklärt werden, daß bei Röhren mit Oxydkathoden das Rauschen bei sehr niedrigen Frequenzen beträchtliche Werte annimmt. Diese Erscheinung wird Flickerrauschen genannt.

Wiederholte Versuche zeigten, daß die Größe dieses Rauschens weitgehend von der Röhrenkonstruktion, von den Unterschieden zwischen den einzelnen Exemplaren und den Betriebsbedingungen abhängt. Mit wachsendem Anodenstrom wächst im allgemeinen auch das Rauschen, während die spektrale Intensität der Frequenz umgekehrt proportional ist. Interessant ist die Tatsache, daß beim Fließen von Gleichstrom in Halbleitern eine ähnliche Art des Rauschens entsteht.

Mit der Annahme, daß der Strom nicht aus einzelnen Elektronen, sondern aus größeren Elektrodenbündeln besteht, läßt sich die Größe des Rau-

schens qualitativ erklären, da in diesem Falle die »Körnigkeit« des Stromes gröber ist. In den Berechnungen müßte also der Ladungswert eines Elektrons durch denjenigen eines Elektronenbündels ersetzt werden. Da jedoch das Flickerrauschen bei höheren Frequenzen nicht wahrgenommen werden kann, liegt die weitere Annahme nahe, daß der Austritt der Elektronenbündel in Form verhältnismäßig langzeitiger Stromstöße vor sich geht. Der Wert des Fourier-Integrals von Impulsen endlicher Dauer sinkt bei hohen Frequenzen stark ab, so daß hier nur das Schrotrauschen zur Geltung gelangt, das von den einzelnen Elektronen des Stromstoßes erzeugt wird. Diesen ganzen Vorgang kann man sich physikalisch so vorstellen, daß die Kathode nicht überall gleichmäßig Elektronen emittiert, sondern an ihrer Oberfläche Emissionszentren längerer oder kürzerer Dauer entstehen. Das Entstehen bzw. Verschwinden dieser Zentren verursacht die verhältnismäßig langsamen Schwankungen des Stromes (3).

Diese Betrachtungen beziehen sich auf das Flickerrauschen des Sättigungstromes. Beim Raumladungsstrom ist hier eine noch stärkere Glättung zu erwarten als beim Schrotrauschen, ist doch bekannt, daß zwischen dem Anodenstrom I_a hinter dem Potentialminimum und dem Sättigungsstrom I_s folgender Zusammenhang besteht (4) :

$$\frac{\partial I_a}{\partial I_s} = \frac{S U_T}{I_s} . \quad (12)$$

Das Quadrat des nachweisbaren Rauschstromes ist also

$$\overline{i_a^2} = \frac{(S U_T)^2}{I_s^2} \overline{i_s^2} . \quad (13)$$

(Bei Schrotrauschen gibt dafür die Gleichung (6) den Wert $1,6 \frac{S U_T}{I_s} \overline{i_s^2}$).

Der experimentelle Beweis dieses Zusammenhangs fehlt jedoch, da Untersuchungen an Röhren mit Oxydkathoden im Sättigungsbereich sehr schwierig sind. Auch konnte nicht bewiesen werden, daß das Flickerrauschen in Radoröhren tatsächlich von den Schwankungen des Elektronenaustritts herrührt. Die Kathode hat nämlich selbst Halbleitereigenschaften, wozu noch kommt, daß sich in gewissen Fällen bei Verwendung von Nickel als Grundmetall zwischen diesem und der Oxydschicht eine Halbleiterschicht mit ziemlich großem Widerstand bildet. Es wäre also möglich, daß das Rauschen durch die Schwankung des Kathodenwiderstandes verursacht wird. Da durch die Kathode Gleichstrom fließt, bedeutet dies eine Spannungsschwankung, die die Röhre so steuert, als arbeitete sie in Gitter-Basischaltung.

Das Quadrat der Stromschwankung müßte in diesem Fall nachweislich dem Wert $S^2 I^2$ proportional sein. Die Auffassung, daß das Flickerrauschen

bei Bildung einer Zwischenschicht stark ansteigt, wird auch durch Schrifttumangaben unterstützt. Auch unsere eigenen Untersuchungen führten zu gleichen Ergebnissen, wenn auch die Zusammenhänge nicht ganz eindeutig waren. Im Sättigungsgebiet kann die Röhre nicht gesteuert werden, weshalb das Rauschen, wenn es wirklich vom Halbleiter stammt, im Gegensatz zum Emissionsrauschen verschwinden müßte. Natürlich konnte auch das nicht nachgeprüft werden.

Das Flickerrauschen kann natürlich auch andere Ursachen haben. Sowjetische Wissenschaftler z. B. erklären das Flickerrauschen durch Gasreste (5), während das Flickerrauschen anderen Meinungen zufolge seine Ursache zwar im Elektronenaustritt hat, die Elektronenbündel jedoch nicht aus Emissionszentren an der Kathodenoberfläche austreten, sondern aus den Poren der Emissionssicht unter der Kathodenoberfläche (6).

Es gibt noch eine interessante Auffassung über die Ursache des Flickerrauschens, derzufolge sich — wie dies einige Untersuchungen zeigten — in der Raumladungswolke der Elektronenröhre stehende Wellen mit einer Wellenlänge von einigen Zehntel Millimetern befinden, die sich in seltenen zufälligen Stößen ändern. Dies kann im Strom der Röhre jene Veränderungen hervorrufen, die wir als Flickerrauschen wahrnehmen (7).

Unserer Auffassung nach ist das Flickerrauschen eine komplexe Erscheinung, die also gleichzeitig mehrere Gründe haben kann. Es kann vorkommen, daß diese Ursachen gleich bedeutungsvoll sind, doch kann auch eine der Ursachen dominieren, was die Abweichung zwischen den einzelnen Untersuchungen erklären würde.

Der Vergleich von Trioden und Pentoden wurde deshalb gewählt, weil dadurch zur Klärung der Ursache des Rauschens beigetragen werden kann.

Meßprinzip

Für die Zwecke der Messungen wurde ein stabiler Breitband-Niederfrequenzverstärker konstruiert. Der Frequenzbereich des fertigen Verstärkers erstreckte sich von 0,5 Hz bis 70 000 Hz, was es ermöglichte, an einer Röhre derselben Einstellung das Flickerrauschen mit dem Schrotrauschen direkt zu vergleichen. Die Spannungsverstärkung beträgt von der Anode der zu prüfenden Röhre aus, rund 120 dB. Die Ausgangsspannung wurde — im Interesse der richtigen Messung der quadratischen Werte — durch ein Thermokreuz mit einer Zeitkonstante von 1,6 Sekunden, indiziert. Starke negative Rückkopplung sorgt für die Stabilität und Unabhängigkeit des Verstärkers von den Schwankungen der Speisespannung. Nebst dem erregungsfreien Aufbau wurde der Vermeidung von Brummspannungen und fremden Rauscheinflüssen die größte Sorgfalt gewidmet. Die Speisung der ersten Stufen sowie die Heizung der zu messenden Röhre geschieht durch Trockenbatterien bzw.

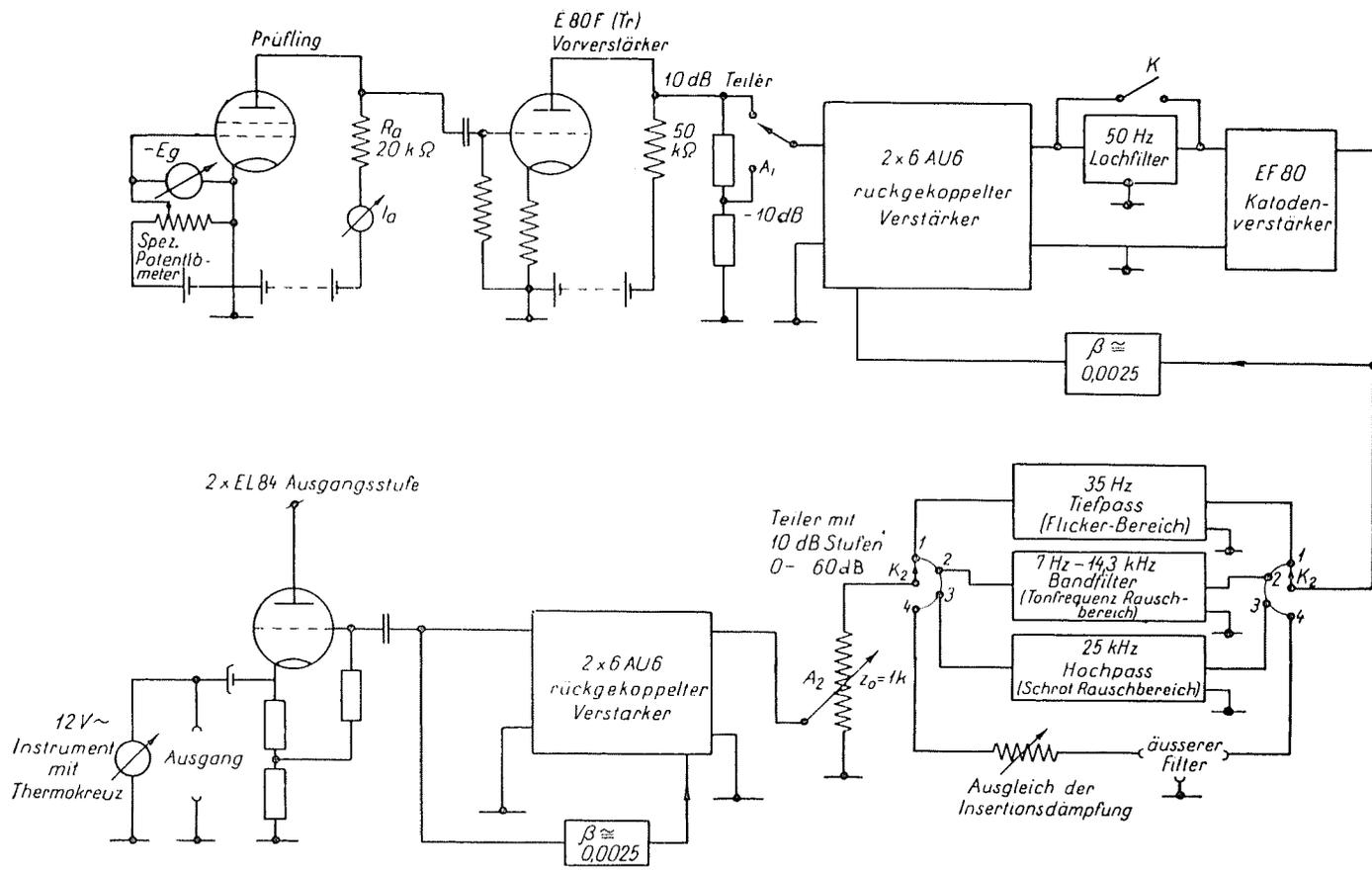


Bild 1. Meßanordnung

Akkumulatoren. Da diese nach gewisser Zeit infolge Schwankungen des Innenwiderstandes selbst zu Rauschquellen werden können, müssen sie häufig gewechselt werden. Elektrolytkondensatoren sowie Schichtwiderstände dürfen in den ersten Stufen nicht verwendet werden (Bild 1). Die kontinuierliche Regelung der Gittervorspannung der zu messenden Röhre, die den bekannten Veröffentlichungen gemäß auch anderwärts Sorgen bereite, stellte ein besonders schwieriges Problem dar. (Hinter dem Gitter der zu messenden Röhre folgt nämlich eine 20—25 millionenfache Spannungsverstärkung.) In dem von uns gebauten Gerät wurde dieses Problem neuartig gelöst. Die Konstruktion bewährte sich in der Praxis aufs beste.

Zur Eichung des Meßgerätes entwickelten wir in unserem Laboratorium eine Anzahl neuer Instrumente, so z. B. einen Infra-Tongenerator, außerdem einen Apparat, mit dem die Zeitkonstanten von Zeigerinstrumenten geprüft werden können.

Die Einrichtung wurde durch drei Bandfilter ergänzt, die folgende Messungen ermöglichen :

1. Der sehr niedrige Frequenzbereich mit einer effektiven Bandbreite von 0,7—32,5 Hz. Da in diesem Bereich das Flickerrauschen bedeutend stärker ist als das Schrotrauschen, kann ersteres auf einfache Art gemessen werden. Die Bandbreite ist verhältnismäßig groß (5,5 Oktaven), weshalb man einen in der Frequenz durchschnittlichen Rauschwert erhält. Die Bestimmung der Bandbreite wird im Anhang erläutert.

2. Der höhere Frequenzbereich mit einer effektiven Bandbreite von 24—69 kHz. In diesem Bereich ist das Flickerrauschen im allgemeinen vernachlässigbar. Nötigenfalls läßt sich der Meßwert mit Hilfe des Wertes für das Flickerrauschen (Band 1.) und unter Voraussetzung der bekannten Frequenzabhängigkeit korrigieren, damit er direkt auf das Schrotrauschen bezogen werden kann.

3. Der Tonfrequenzbereich mit einer effektiven Bandbreite von 7 Hz bis 14,3 kHz. Untersuchungen in diesem Bereich ermöglichen praktisch sehr wichtige Feststellungen über die Qualität der Röhre.

4. Zur Untersuchung des Frequenzganges des Rauschens können außerdem beliebige äußere Bandfilter verwendet werden.

Messungen

Bei der Messung wird an den Anodenkreis der zu prüfenden Röhren ein Arbeitswiderstand von 20 kOhm gelegt, und sämtliche Elektroden werden mit konstanter Speisespannung versehen. Durch kontinuierliche Regelung der Gittervorspannung wird der Anodenstrom auf den entsprechenden Wert eingestellt. Am Ausgang des Gerätes wird also eigentlich der Wert der Rauschspannung am Arbeitswiderstand der zu messenden Röhre abgelesen. Dieser Wert

muß auf den Röhreneingang umgerechnet werden, wozu die Spannungsverstärkung der zu messenden Röhre festgestellt werden muß. Zu diesem Zweck wird aus einem Tonfrequenzgenerator eine bekannte Niederfrequenzspannung an das Eingangsgitter der zu prüfenden Röhre gelegt und mit dem Meßverstärker die Ausgangsspannung an deren Arbeitswiderstand abgelesen.

Die Wirkung der Stromverteilung wurde durch stellenweisen Vergleich des Flickerrauschens bei Röhren der Type EF40 in Trioden- und Pentoden-

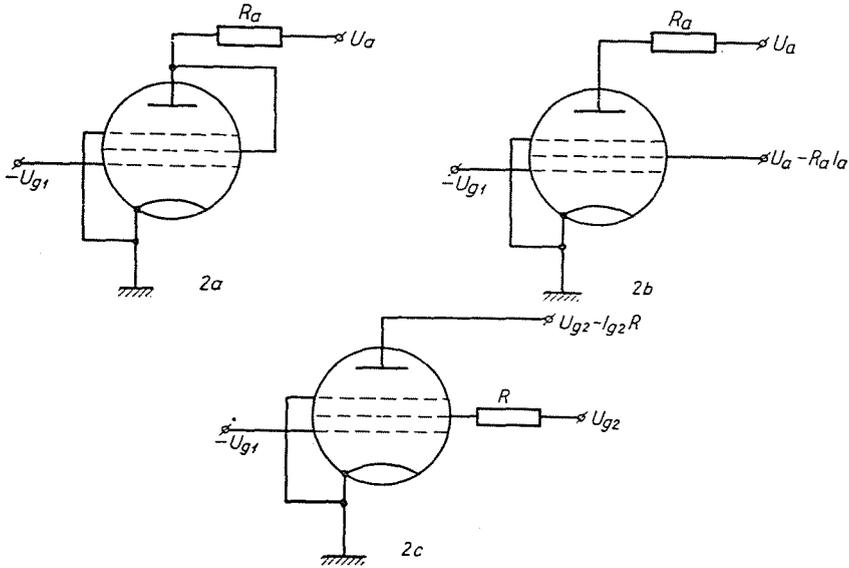


Bild 2. Schaltung der zu messenden Röhre: a) Triodenschaltung, b) Pentodenschaltung, c) Kontrollmessung

schaltung untersucht (Bild 2). Der Vergleich muß bei jeder Röhre mit möglichst gleicher statischer Einstellung erfolgen. Es taucht hierbei die Frage auf, was eigentlich bei Trioden- und Pentodenschaltung auf gleichem Wert gehalten werden muß, der Kathodenstrom, der Anodenstrom oder die Steilheit? Für alle drei Möglichkeiten finden sich Gründe, jedoch entschieden wir uns aus praktischen Gesichtspunkten für die Konstanthaltung des Anodenstromes. Die hier folgende Tabelle faßt die Meßergebnisse zusammen.

Beim hochfrequenten Schrotrauschen konnten die theoretisch zu erwartenden Ergebnisse reproduziert werden. Im Tonfrequenzbereich, in dem das Flicker- und Schrotrauschen bei guten Röhren von gleicher Bedeutung ist, zeigten sich in Triodenschaltung um 20—25% bessere Ergebnisse als in Pentodenschaltung.

Nach diesen Ergebnissen wurde ein Kontrollversuch durchgeführt, um zu entscheiden, ob die festgestellte geringe Erhöhung des Flickerrauschens

Tabelle

Nr. der Röhre	Anodenstrom mA	Flickerauschespannung		Rausch- spannungs- verhältnis U_{tr}/U_p
		U_{tr} (Triode) μ V	U_p (Pentode) μ V	
1	1	0,92	0,73	1,26
	2	1,02	0,86	1,19
	3	1,04	1,04	1,00
2	1	1,58	1,49	1,06
	2	1,58	1,81	0,87
	3	1,60	1,76	0,90
3	1	0,50	0,76	0,65
	2	0,78	0,81	0,96
	3	0,90	1,07	0,84
4	1	2,37	2,55	0,93
	2	2,62	2,94	0,84
	3	2,94	3,33	0,88
5	1	1,10	1,04	1,05
	2	1,11	1,20	0,93
	3	1,02	1,45	0,70
6	1	1,20	1,31	0,90
	2	1,41	1,50	0,93
	3	1,49	1,67	0,90
7	1	0,50	0,61	0,83
	2	0,78	0,81	0,94
	3	0,81	1,03	0,79
8	1	2,49	2,60	0,96
	2	2,74	2,13	0,95
	3	2,97	3,63	0,82
9	1	1,28	1,49	0,85
	2	1,39	1,86	0,75
	3	1,60	1,83	0,86
10	1	1,28	1,13	0,89
	2	1,07	1,21	0,87
	3	0,99	1,33	0,75
11	1	1,42	1,12	0,79
	2	1,48	1,57	0,94
	3	1,52	1,62	0,93
12	1	1,10	0,82	1,35
	2	1,11	0,90	1,20
	3	1,06	1,30	0,82

Durchschnitt und Streuung Im A Anodenstrom $0,96 \pm 0,19$
 " " " 2m A " $0,94 \pm 0,11$
 " " " 3m A " $0,85 \pm 0,08$

auf die Stromverteilung zurückgeführt werden kann. Ausgangspunkt war die Voraussetzung, daß das Stromverteilungsrauschen im kleinen Hilfsgitterstrom verhältnismäßig bedeutender ist als im großen Anodenstrom, weshalb bei den untersuchten Röhren das Hilfsgitter als Anode über einen 20 kOhm Arbeitswiderstand angeschlossen wurde, während die Anode direkt an der entsprechenden Spannung lag (Bild 2). In dieser Schaltung wurde auch die Verstärkung gemessen und die Rauschspannung am Steuergitter berechnet. Bei 2 mA wurde für das Schrotrauschen eine auf das erste Gitter reduzierte Rauschspannung von $2,6 \mu\text{V}$ festgestellt, während bei normaler Triodenschaltung nur $0,7 \mu\text{V}$ und bei normaler Pentodenschaltung nur $1,3 \mu\text{V}$ festgestellt werden konnte. Beim Flickerrauschen konnte jedoch ein derartiger Unterschied nicht festgestellt werden: Innerhalb der Meßtoleranzen ergab sich für das Rauschen des Schirmgitterstromes dieselbe äquivalente Spannung am Steuergitter, wie für das Rauschen im Anodenstrom. Durch diesen Versuch wurde die Annahme, daß der Unterschied auf das Stromverteilungsrauschen zurückgeführt werden kann, widerlegt. Es mußte deshalb die Frage aufgeworfen werden, warum bei Pentoden dennoch eine größere Rauschspannung festgestellt wurde. Die Erklärung hierfür ist wahrscheinlich in der Meßmethode zu suchen. Aus der am Anodenwiderstand auftretenden Rauschspannung wurde nämlich nicht die Rauschkomponente des Anodenstromes, sondern die äquivalente Rauschspannung am Steuergitter ermittelt. Die unmittelbare physikalische Erscheinung ist jedoch der Rauschstrom, d. h. das Produkt aus Steilheit und äquivalenter Rauschspannung.

Die Steilheit aber ist bei gleichem Anodenstrom in Triodenschaltung von derjenigen in Pentodenschaltung verschieden. Die Steilheit des Kathodenstromes ist nämlich der Kubikwurzel des Kathodenstromes proportional, während sich die Steilheiten des Anodenstromes und des Schirmgitterstromes annähernd so zueinander verhalten wie die beiden Ströme, d. h.

$$\frac{S_p}{S_{tr}} = \frac{I_a}{I_a + I_2} \left(\frac{I_a + I_2}{I_a} \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (14)$$

Bei der Rauschkomponente des Anodenstromes verschwindet dieser Unterschied, weil der quadratische Wert in beiden Fällen (wegen $U_{tr} \approx 0,9 U_p$) annähernd gleich ist:

$$i^2 = (S_{tr} U_{tr})^2 \approx (S_p U_p)^2. \quad (15)$$

Diskussion der Ergebnisse

Es ist interessant, obige Ergebnisse mit ähnlichen Untersuchungen von TOMLINSON zu vergleichen, die zu Schlußfolgerungen führten die im Gegensatz zu unseren Untersuchungen stehen (1). TOMLINSON stellte an 7 von 8 Röhren

der Type 6SJ7 bei gleichem Kathodenstrom einen etwas größeren Rauschstrom in Pentodenschaltung fest. An den mitgeteilten Meßergebnissen können jedoch zwei Eigenheiten entdeckt werden :

a) das hochfrequente Schrotrauschen der untersuchten Röhren war auffallend groß ;

b) die Röhren besaßen bei gleichem Kathodenstrom in Trioden- und Pentodenschaltung verschiedene Kathodensteilheiten.

Diese beiden Tatsachen lassen es wahrscheinlich erscheinen, daß TOMLINSONS Ergebnisse nicht verallgemeinert werden können.

Die von ihm aufgestellte Theorie gibt gleichfalls Anlaß zu Einwendungen. Er weist darauf hin, daß das Auftreten des Stromverteilungsrauschens die Herleitung des Funkeffektes aus der Zwischenschicht unter der Kathodenmasse ausschließt. Man hätte dann nämlich den Fall der Steuerung einer Röhre in Gitter-Basisschaltung, bei der ein Stromverteilungsrauschen natürlich nicht entstehen kann. Das Rauschen kann jedoch SCHOTTKYS Theorie entsprechend aus Emissionszentren stammen, und zwar so, daß die Elektronen der einzelnen austretenden Elektronenbündel sozusagen zusammen an die Anode bzw. das Schirmgitter gelangen. Diese Hypothese kann aber nicht akzeptiert werden. Soviel steht fest, daß das Flickerrauschen damit zusammenhängt, daß der Strom nicht aus dem Durchgang unabhängig voneinander austretender Elektronen besteht, sondern aus Elektronenbündeln. Diese Bündel setzen sich aus Elektronen zusammen, die in verhältnismäßig langen Zeitabschnitten nacheinander austreten. Zuzufolge der Regelwirkung der Raumladung verlassen diese Bündel das Potentialminimum in verminderter Größe. Die Stromverteilung verursacht nur dann ein Flickerrauschen, wenn die Elektronen der Bündel beisammenbleiben und so die Anode oder das Schirmgitter erreichen. Beim Schrotrauschen liegen die Verhältnisse anders. Hier handelt es sich um einzelne Elektronen, doch muß bemerkt werden, daß auch in diesem Fall nur dann ein Stromverteilungsrauschen auftritt, wenn der Zufall das Auftreffen eines Elektrons auf eine Elektrode entscheidet. In Fällen, in denen die Elektronen von einigen Punkten der Kathode immer zur Anode, von anderen Punkten der Kathode dagegen stets zum Schirmgitter gelangen, kann die Röhre als aus zwei besonderen Trioden bestehend gedacht werden, wobei kein Stromverteilungsrauschen entsteht. Derselbe Fall bezieht sich auch auf das Flickerrauschen, wenn die Elektronen aus einigen Emissionszentren infolge ihrer Lage auf der Kathode immer eher zur Anode gelangen, aus anderen Zentren dagegen aus dem gleichen Grunde immer zum Schirmgitter. Kommt aber auf diese Weise keine Vergrößerung des Rauschens zustande, so kommen nur die kleinen tangentialen Geschwindigkeitskomponenten in Betracht, die schließlich die Unterschiede in den Bahnen des aus einem Punkt austretenden Elektronen verursachen. Es muß dann angenommen werden, daß die Verteilung dieser Komponenten bei den einzelnen Elektronen

nicht unabhängig voneinander ist, daß vielmehr die einzelnen Elektronenbündel bevorzugte Richtungen haben. Dies steht jedoch im Widerspruch zu der empirisch bestätigten Tatsache, daß die austretenden Elektronen Maxwell'sche Geschwindigkeitsverteilung besitzen.

Mit anderen Worten: der Elektronenstrom, der aus den Emissionszentren der Kathode austritt, zeigt nach Zeit und Ort zufällige Schwankungen. Ähnliche, jedoch kleinere Schwankungen kommen wegen der endlichen Größe der Elektronen auch in homogenen Elektronenstrahlen vor. Die Raumladung vermindert diese Schwankungen. Die zeitlichen Schwankungen der Elektronen-

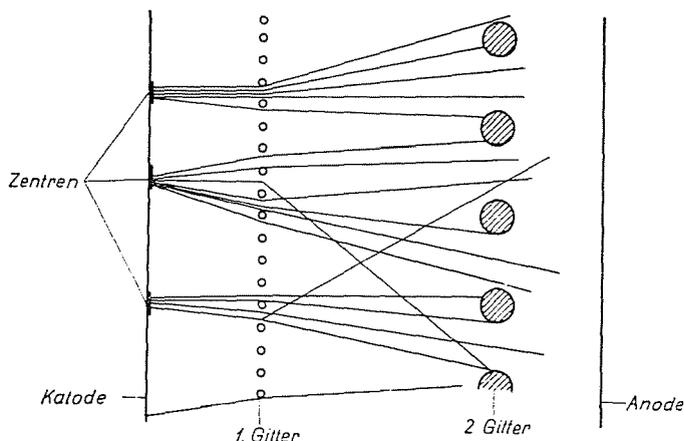


Bild 3. Homogenisierung der Elektronendichte entlang der Bahnen

bündel treten als Flickerrauschen, die von den einzelnen Elektronen stammenden zeitlichen Schwankungen hingegen als Schrotrauschen auf. In der Ebene des Schirmgitters ist der Elektronenstrahl schon homogen, wodurch die aus den Elektronenbündeln stammenden räumlichen Schwankungen verschwinden, und nur die von den einzelnen Elektronen stammenden kleineren räumlichen Schwankungen verbleiben, die die Stromverteilungskomponente des Schrotrauschens verursachen (Bild 3).

Vom praktischen Standpunkt aus gesehen, ergaben die Untersuchungen ein wichtiges Ergebnis: Im tiefsten Frequenzbereich besteht zwischen dem Rauschen ähnlich eingestellter Trioden und Pentoden kaum ein Unterschied. Bei Gleichstromverstärkern können also auch Pentoden ohne Nachteil verwendet werden. Im ganzen Tonfrequenzbereich hingegen ist das Rauschen der Pentoden bereits bedeutend stärker als das derselben Röhren in Triodenschaltung. (Die Streuung zwischen den einzelnen Exemplaren spielt jedoch auch hier noch eine große Rolle.) Demgegenüber steht der Vorteil, daß die Pentode als Vorverstärker eine größere Verstärkung sichert, was nicht nur

die Verwendung größerer negativer Rückkopplungen gestattet, sondern eventuell auch die Einsparung einer Stufe ermöglicht. Hierdurch wird natürlich auch das Rauschen vorteilhaft beeinflusst, weil viele Schaltelemente hinter der Vorverstärkerstufe entfallen, was zur Verminderung des Rauschpegels beiträgt.

Obige Untersuchungen wurden im Forschungsinstitut für die Nachrichtentechnische Industrie mit Unterstützung der Tungsramwerke durchgeführt. Wir sprechen hiermit beiden Direktionen unseren Dank für die Förderung unserer Arbeiten aus.

Anhang

Der vom Instrument gemessene quadratische Spannungswert beträgt

$$\int_0^{\infty} U^2(f) A^2(f) df,$$

wobei $U(f)$ den Wert der Rauschspannung bei der Frequenz f , $A(f)$ die Verstärkung bei der Frequenz f bezeichnet. In der Mitte des Frequenzbandes ist die Verstärkung konstant und beträgt $A_0 = 10^6$.

Bei höheren Frequenzen, bei denen das Schrotrauschen überwiegt, ist $U(f) = U_0 = \text{konst.}$, so daß die effektive Bandbreite durch den Zusammenhang

$$\int_0^{\infty} A^2(f) df = A_0^2(f_2 - f_1) \quad (1)$$

gegeben ist. Bei tiefen Frequenzen, bei denen das Flickerrauschen überwiegt, ist

$$u^2(f) = \frac{U_1^2}{f} \quad \text{und} \\ U_1^2 \int_0^{\infty} \frac{A^2(f) df}{f} = U_1^2 A_0^2 \ln \left(\frac{f_2}{f_1} \right). \quad (2)$$

Das Integral wurde graphisch berechnet, und zwar mit logarithmischer Frequenzskala im Band 1 und mit linearer Frequenzskala im Band 2. Im Band 3 wurde die untere Grenze mit logarithmischer, die obere Grenze mit linearer Frequenzskala bestimmt.

Der Wert der Bandbreite, der durch Integrieren der punktweise aufgetragenen Frequenzkurven gewonnen wurde, konnte auch nach einer anderen Methode kontrolliert werden. Die zu messende Röhre wurde durch eine Rauschdiode mit Wolframkathode ersetzt, wobei die Ausgangsspannung in

Abhängigkeit vom Sättigungsstrom gemessen wurde. Mit Hilfe der Gleichung 5 wurde hieraus Δf bestimmt und gute Übereinstimmung mit den punktweise aufgenommenen Werten im Band 2 erzielt. Im Band 1 und 3 war die Übereinstimmung nicht so gut, was sich daraus erklärt, daß auch in der Röhre mit Wolframkathode Flickerrauschen in geringem Maße entsteht. Das Eigenrauschen des Gerätes, das hauptsächlich durch den Eingangswiderstand verursacht wird, stimmte mit den so gemessenen Werten gut überein. Der Eingangswiderstand besteht aus dem Arbeitswiderstand der zu messenden Röhre, der 20 kOhm beträgt, und dem damit parallel geschalteten Gitterableitwiderstand von 100 kOhm der ersten Stufe. Vom Rauschstandpunkt aus gesehen, kommt noch der äquivalente Rauschwiderstand der ersten Röhre des Gerätes hinzu. Die weiteren Verstärkerstufen vergrößern das Rauschen nur noch unwesentlich.

Zusammenfassung

Es wurde eine neue Meßvorrichtung zum Messen des Rauschens von Elektronenröhren und Transistoren gebaut. Die Verstärkung dieser Meßeinrichtung beträgt 120 dB, ihr Frequenzbereich erstreckt sich von 0,5 Hz bis 70 000 Hz. Die Einrichtung kann zur Untersuchung der verschiedenen Rauscharten mit verschiedenen Bandfiltern ergänzt werden. Mit Hilfe dieser Einrichtungen wurde die Frage untersucht, ob das Flickerrauschen im Anodenstrom von Pentoden eine Stromverteilungskomponente besitzt. Es zeigte sich, daß bei Trioden und Pentoden im gleichen Arbeitspunkt ungefähr derselbe Rauschstrom gemessen werden konnte, was sich auch theoretisch begründen läßt; stammt nämlich das Flickerrauschen von den Elektronenbündeln, die gemeinsam austreten, so kann erwartet werden, daß die Verteilung der Elektronen in der Ebene des Schirmgitters bereits homogen ist. Die örtlichen Schwankungen der Dichte zeigen sich dann nur im Schrotrauschen. Die Stromverteilung vergrößert also nur den Wert des Schrotrauschens.

Schrifttum

1. TOMLINSON, I. B.: Journ. B. I. R. E. 14, 515 (1954).
2. NORTH, D. O.: R. C. A. Rev. 5, 471 (1940).
3. SCHOTTKY, W.: Phys. Rev. 2. Folge 27, 74 (1926).
4. LANGMUIR, I.: Phys. Rev. 2. Folge, 12, 419 (1923).
5. MALAKOW, A. N.—DUBROWIN, W. E.: Shurnal Technitscheskoi Fisiki 26, 1451 (1956).
6. LINDEMANN, W. W.—ZIEL A.: Journ. Appl. Phys. 27, 1179 (1956).
7. WHITE, O. M.—EMELEUS, K. G.: Journ. Electronics, 2, 358 (1957).

I. P. VALKÓ Á. KEMÉNY A. PÁLFI	}	Budapest XI., Stoczek u. 2, Ungarn
--------------------------------------	---	------------------------------------