EE 1 Sekundäremissionsröhre

Die Röhre EE 1 ist eine Verstärkerröhre mit einer Sekundäremissionskathode. Obwohl ursprünglich für Breitbandverstärkung in Fernsehempfängern entwickelt, wird sie in Rundfunkempfängern und Kraftverstärkern als transformatorlose Steuerröhre für Gegentaktstufen Verwendung finden. Nicht nur wird dabei der Transformator zur Erzielung der beiden in Gegenphase liegenden Wechselspannungen gespart, sondern die Sekundäremissionsröhre wird gleichzeitig eine sehr hohe Verstärkung gestatten, was besonders für Kraftverstärker seine Bedeutung hat, da sie entweder zu einer Beschränkung der Röhrenzahl führt oder eine Gegenkopplungsschaltung ohne erheblichen Verlust an Verstärkung ermöglicht.
Im Folgenden wird zunächst die Wirkungsweise der Sekundäremission und der prinzipielle Aufbau der Sekundäremissionsröhre erläutert und sodann die Anwendung als Vorverstärker von Gegentaktendstufen besprochen.

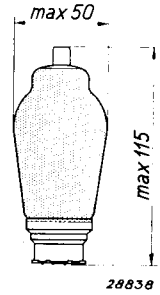
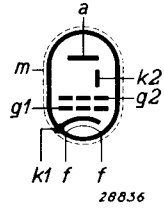


Abb. 1
Abmessungen in mm.

Sekundäremission und Aufbau der Sekundäremissionsröhre

Treffen Elektronen mit bestimmter Geschwindigkeit auf eine Metalloberfläche, so wird ein kleiner Teil dieser Elektronen reflektiert. Der größte Teil dringt in die Oberflächenschicht ein und löst Elektronen aus den dort befindlichen Atomen. Diese Elektronen erhalten durch den Aufprall der Primärelektronen große Geschwindigkeiten und können, falls ihre Bewegungsrichtung günstig ist, die beschossene Oberfläche verlassen. Die Elektronen, die durch die Primärelektronen aus der Metalloberfläche ausgestoßen werden, werden als Sekundärelektronen bezeichnet. Das Vermögen zur Aussendung sekundärer Elektronen wird durch den Sekundäremissionsfaktor δ ausgedrückt, d.h. durch die durchschnittliche Anzahl der von einem Primärelektron frei gemachten Sekundärelektronen.



Menge und Lauf der Sekundärelektronen hängen vom Aufbau der Röhre, von den Spannungen der verschiedenen Elektroden und von den physikalischen Eigenschaften des Stoffes der bombardierten Oberfläche ab. Bei einer Nickeloberfläche z.B. beträgt der Sekundäremissionsfaktor für einen Potentialunterschied von 150 V nur 0,94, so daß nicht mehr Sekundärelektronen als Primärelektronen erhalten werden und keine Elektronenvervielfachung auftritt.

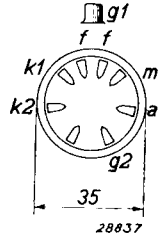


Abb. 2
Elektrodenanordnung und Sockelanschlüsse.

Elektronenvervielfachung wird erzielt bei Verwendung eines Materials mit $\delta > 1$. Abb. 3 zeigt schematisch das Prinzip der Sekundäremissionsröhre. Die Wirkungsweise der Sekundäremissionsröhre EE 1 ist kurz folgende:
Von einer primären indirekt geheizten Kathode werden die Elektronen durch eine auf positive Spannung (150 V) gebrachte Sekundäremissionskathode abgesaugt. Zwischen der Kathode und der Sekundäremissionskathode befindet sich ein Steuergitter und ein Schirmgitter. Jedes auf die Sekundäremissionskathode auftreffende Elektron löst aus dieser eine größere Menge von

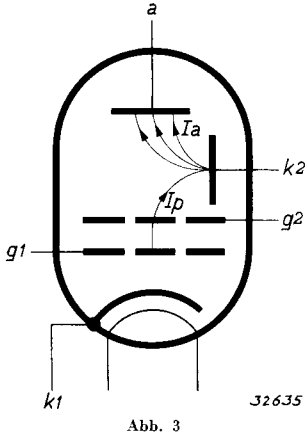


Abb. 3
Schematische Darstellung des Elektrodensystemes der Sekundäremissionsröhre. Die Primärelektronen, die die Kathode k_1 verlassen, werden auf die Sekundäremissionskathode k_2 gelenkt. Die hieraus ausgelösten Sekundärelektronen wandern zur Anode. Die Pfeilrichtung gibt die Bewegung der Elektronen an und ist dem konventionellen Strom entgegengesetzt.

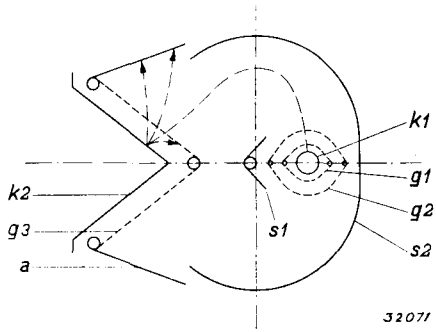


Abb. 4
Querschnitt der Sekundäremissionsröhre mit Bahn eines Primärelektrons und Bahnen der aus der Kathode k_2 gelösten Sekundärelektronen.
k_1 = Primärkathode
g_1 = Steuergitter
g_2 = Schirmgitter (150 V)
s_1 = Schirm zum Schutz der Sekundärkathode (0 V)
s_2 = Ablenkschirm (0 V)
k_2 = Sekundäremissionskathode (150 V)
g_3 = Anodengitter (250 V)
a = Anodenbleche (250 V)

Steilheit der Sekundäremissionsröhre $\delta^{1/k}$ mal so groß wie die der Röhre ohne Sekundäremission, wo k ein Faktor ist, der mit der Röhrenkonstruktion und mit der Anodenspannung zusammenhängt. Für einen nicht zu kleinen Primärkathodenstrom wird der Faktor

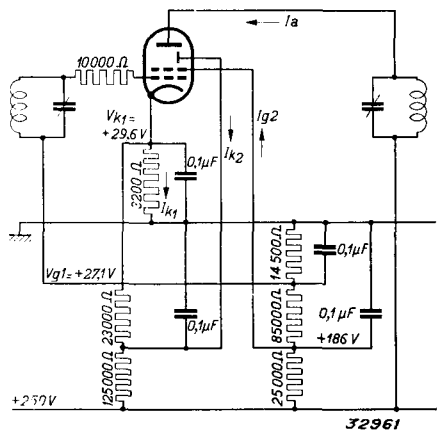


Abb. 6
Grundsätzliches Schaltbild für die Verwendung der Röhre EE 1. Der Kathodenwiderstand ist, um Anodenstromstreuungen zu beschränken, wesentlich größer als der, der für die negative Vorspannung erforderlich ist. Um die richtige negative Vorspannung des Gitters in Bezug auf die Kathode zu erzielen, erhält das Gitter eine positive Vorspannung.

Sekundärelektronen aus, die von der auf höherer Spannung (250 V) liegenden Anode angezogen werden. Es ist nun klar, daß jede Stromänderung zur Sekundäremissionskathode durch Änderung der Spannung am Steuergitter g_1 eine viel größere Änderung in dem Strom von der Sekundäremissionskathode zur Anode hervorruft und infolgedessen die Sekundäremission eine beträchtliche Steilheitserhöhung herbeiführt, ohne daß eine anormal große Kathode und ein sehr kleiner Kathoden-Gitterabstand erforderlich sind.

Bei einem Vergleich zwischen zwei Röhren, die dieselbe Kathode, dasselbe Steuergitter und dieselbe Anode besitzen und von denen die eine mit, die andere ohne Sekundäremissionsverstärkung arbeitet, stellt sich heraus, daß bei gleichem Anodenstrom die Steilheit der Röhre mit Sekundäremission viel größer ist. Bei gleichem Anodenstrom ist die

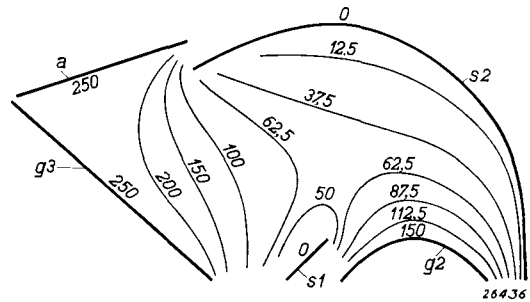


Abb. 5
Verlauf der Äquipotentialflächen in der Sekundäremissionsröhre. Wegen der Bezeichnung der Elektroden siehe Unterschrift von Abb. 4.

k einen konstanten Wert von etwa 1,6 haben, so daß unter diesen Umständen die Steilheit der Sekundäremissionsröhre $\delta^{0,6}$ mal so groß ist. Ist δ z.B. gleich 5, so wird $\delta^{0,6}$ gleich 2,6 sein.

Werden Primärkathode (indirekt geheizte Kathode mit Oxydschicht) und Sekundäremissionsoberfläche ohne besondere Vorsorgsmaßnahmen im Röhrenkolben aufgestellt, so bedeckt sich auf die Dauer die Sekundäremissionsoberfläche mit einem Niederschlag von Stoffen, die aus der Kathode verdampfen (z.B. Barium und Bariumoxyd). Die Konstanz der Sekundäremission wird hierdurch stark beeinflußt. Durch die Anwendung einer Elektronenoptik und genaue Anordnung der Elektronenbahnen ist es gelungen, den Niederschlag auf der Sekundäremissionskathode zu verhüten.

Die Schwierigkeiten durch den Niederschlag des Primärkathodenmaterials sind in der

Sekundäremissionsröhre EE 1 durch die Elektronenablenkung vermieden. Es wurde davon ausgegangen, daß sich die von der Primärkathode gelösten Moleküle im Hochvakuum praktisch geradlinig bewegen. Durch eine zweckmäßige Aufstellung der Elektroden konnte erzielt werden, daß das gelöste Material der Primärkathode die Sekundäremissionskathode nicht erreichen wird, wohl aber die Elektronen aus der Primärkathode. Die Wirkungsweise der Sekundäremissionsröhre kann am besten mit Hilfe der Abb. 4 erläutert werden. Diese Abbildung zeigt einen Querschnitt durch das Elektrodensystem der Röhre EE 1. Die Primärkathode (indirekt geheizte Oxydkathode) k_1, das konzentrisch darum angebrachte Steuergitter g_1 und das Schirmgitter g_2 (mit positiver Spannung von etwa 150 V gegen k_1) bilden zusammen die drei ersten Elektroden einer normalen Schirmgitterröhre. k_2 ist die Sekundäremissionskathode; sie erhält normalerweise auch eine Spannung von rund 150 V. Zwischen dem erstgenannten Dreielektrodensystem und der Sekundäremissionskathode ist ein Schirmblech s_1 angebracht. Dieser Schirm verhütet den Niederschlag des von der Primärkathode gelösten Materials auf die Sekundärkathode und ist im Röhreninneren direkt mit der Kathode verbunden. Um das zuerst erwähnte Dreielektrodensystem ist ein zweiter Schirm s_2 angebracht, der auch auf Kathodenpotential liegt und eine für die Elektronenablenkung sorgfältig gewählte Form hat. Schließlich besteht das Röhrensystem noch aus zwei Anodenblechen a, die in der Nähe der Sekundäremissionskathode aufgestellt sind, und einem besonderen Gitter g_3, das vor der Sekundäremissionskathode ausgespannt und mit den Anodenblechen verbunden ist. Durch die sinngemäße Wahl der Form des Schirmes s_2 ist ein solches Feld zwischen Primär- und Sekundärkathode erzielt, daß die Elektronen längs gekrümmter Bahnen um den Schirm s_1 herum zur Sekundärkathode k_2 gelangen (siehe Abb. 4). Abb. 5 zeigt die Äquipotentialflächen in einer Hälfte des Röhrensystems. Die Elektronen durchlaufen zwischen Schirmgitter g_2 und Sekundäremissionskathode zwei konzentrierende Potentialfelder, während eine Ablenkung in dem durch den gebogenen Schirm s_2 verursachten Gebiet mit niedrigem Potential stattfindet. Abb. 5 veranschaulicht besonders klar die erreichte Elektronenoptik. Ein auf die Sekundäremissionskathode auftreffendes Elektron löst hieraus mehrere Primärelektronen (Sekundäremissionsfaktor = etwa 5). Diese werden zu einem kleinen Teil von dem in etwa 1,5 mm Abstand vor der Sekundäremissionskathode angebrachten und mit der Anode verbundenen Gitter g_3 aufgefangen. Der größte Teil dieser Elektronen gelangt aber durch das Gitter auf die Anodenbleche a, die eine um 100 Volt höhere Spannung als die Sekundäremissionskathode haben. Der Zweck des Anodengitters g_3 ist nun der folgende: Weil in der Röhre Ströme von einigen Milliampere vorkommen, besteht die Möglichkeit, daß beträchtliche Raumladungen auftreten, die sowohl den Verlauf des Potentialfeldes in der Umgebung des Schirmes s_2 wie auch an der Oberfläche der Sekundäremissionskathode beeinflussen. Hierdurch würde ein Teil der Sekundärelektronen nicht auf die Anode auftreffen. Das Gitter 3 vor der Sekundäremissionskathode mit dem Anodenpotential beseitigt diese Erscheinung. Ohne Gitter würde der Anodenstrom stark von der Anodenspannung abhängig, d.h. der Innenwiderstand würde sehr niedrig sein.

Durch Anwendung des beschriebenen Prinzips ist es gelungen, eine Verstärkerröhre zu bauen, die bei einem Anodenstrom von nur 8 mA eine Steilheit von 14 mA/V besitzt. Dabei beträgt der Innenwiderstand 75.000 Ohm, was z.B. für Breitbandverstärker vollkommen ausreicht.

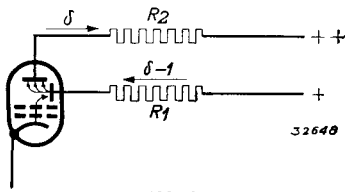


Abb. 7
Grundsätzliche Darstellung der Wirkung der Sekundäremissionsröhre als Steuerröhre für Gegentaktstufen. Die eingezeichneten Pfeile geben die Richtung der Elektronenbewegung an. Die konventionellen Stromrichtungen sind den Pfeilrichtungen entgegengesetzt.

Interessant ist zu erwähnen, daß die aus der Sekundäremissionskathode ausgestoßenen Elektronen einen negativen Strom zu dieser Kathode verursachen. Während einer normalen positiven Elektrode der konventionelle Strom von außen zufließt, geht der Strom von der Sekundäremissionskathode weg und verfolgt seinen Weg über die Spannungsquelle zur Primärkathode. Gleichzeitig fließt aber zur Sekundäremissionskathode der positive Primärstrom, um den sich der Sekundäremissionsstrom verringert.

Die Sekundäremissionsröhre als Vorverstärker für transformatorlose Gegentaktstufen

Zur Steuerung von Gegentaktendstufen mittels der Sekundäremissionsröhre EE 1 wird von dem

Umstand Gebrauch gemacht, daß der Sekundäremissionstrom (im positiven Sinne) der Anode von außen zugeführt und von der Sekundäremissionskathode abgeführt wird. Zu berücksichtigen ist hierbei, daß der Strom von der Sekundäremissionskathode um den in entgegengesetzter Richtung fließenden Primärelektronenstrom verringert wird. Die Phasen der Ströme zu den beiden Elektroden sind also um 180° gegeneinander verschoben, und wenn diese über Widerstände zu den Elektroden bzw. von ihnen weggeführt werden, entstehen hierüber Spannungen mit einem Phasenunterschied von 180° (siehe auch Abb. 7.)

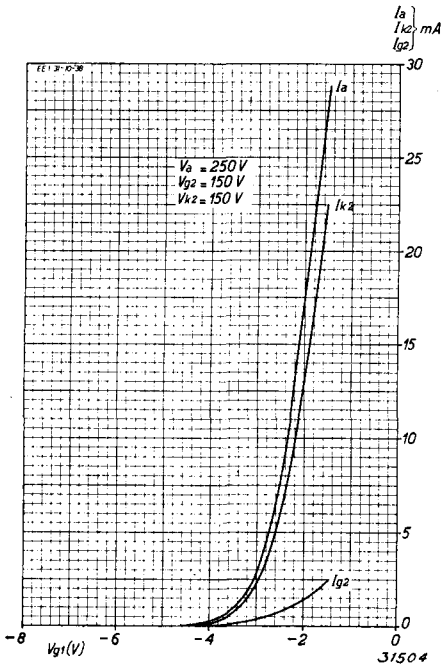


Abb. 8
Anodenstrom, Schirmgitterstrom und Strom von der Sekundäremissionskathode als Funktion der negativen Gitterspannung.

Die beiden in Gegenphase liegenden Wechselspannungen können über Kopplungskondensatoren mit Ableitwiderständen den Gittern von zwei in Gegentakt geschalteten Endröhren zugeführt werden. Die Werte der Widerstände im Anoden- und Sekundäremissionskathodenkreis müssen natürlich so gewählt werden, daß die beiden in Gegenphase liegenden Spannungen genau gleich groß sind. Wie bereits erwähnt wurde, beruht die Wirkung der Sekundäremissionsröhre darauf, daß für 1 auf die Sekundärkathode treffendes Elektron δ Elektronen die Anode erreichen. Der Elektronenbestand an der Sekundäremissionskathode muß mithin um $(\delta-1)$ Elektronen, die durch R_1 [1]) zur Sekundäremissionskathode gehen, ergänzt werden, während sich dafür δ Elektronen durch R_2 von der Anode entfernen. Wird die Steuerung der Sekundäremissionskathode auf den Anodenstrom vernachlässigt, so muß zur Erzielung gleicher Spannungen folgende Gleichung erfüllt sein:

$$(\delta-1)\,R_1 = \delta\,R_2 \text{ oder } R_2 = \frac{\delta-1}{\delta}\,R_1$$

R_2 wird in der Praxis etwas kleiner als dieser Wert sein müssen, da die Wechselspannung

[1]) In Abb. 17 wird R_1 durch die Parallelschaltung von R_2 und R_3 gebildet.

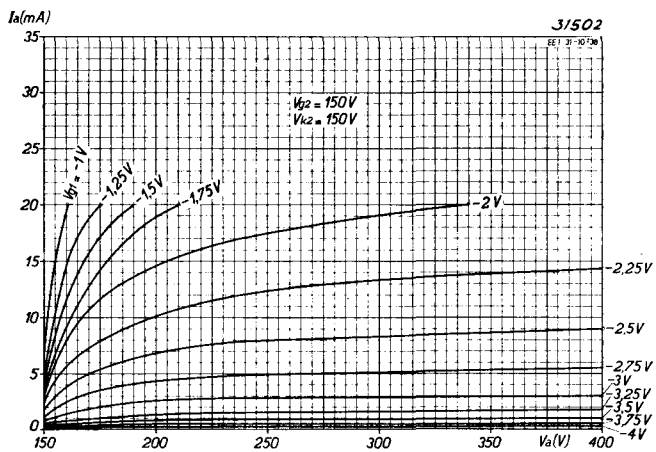


Abb. 9
Anodenstrom als Funktion der Anodenspannung bei verschiedenen negativen Gitterspannungen.

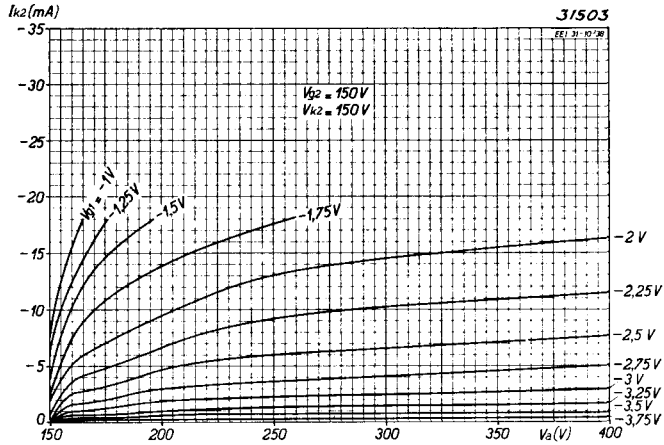


Abb. 10
Strom von der Sekundäremissionskathode als Funktion der Anodenspannung bei verschiedenen negativen Gitterspannungen.

an der Sekundäremissionskathode den Anodenstrom auch einigermaßen steuert. Abb. 17 zeigt die grundsätzliche Schaltung der Röhre EE 1 zur Steuerung von zwei in Gegentakt geschalteten Endröhren. Da das Verhältnis δ von der Vorspannung am ersten Gitter der EE 1 abhängig ist, wird zur Festhaltung der Vorspannung ein Kompensationsverfahren angewandt. Die Kathode wird etwa 23 Volt positiv in Bezug auf den Nulleiter vorgespannt, während das erste Gitter und das Schirmgitter über einen Spannungsteiler gespeist werden. Das erste Gitter erhält dadurch eine positive Vorspannung von etwa 20 Volt. Eine Gegenkopplung kann in der Kathodenleitung auf die in der Abb. 18 angegebene Weise erfolgen. Über dem Lautsprecher liegt ein Spannungsteiler $R_9 R_8$. Der Widerstand R_8 befindet sich auch in der Kathodenleitung der EE 1, und die geteilte Lautsprecherwechselspannung über R_8 befindet sich also zwischen Kathode und Gitter dieser Röhre. Die Summe der Widerstände R_7 und R_8 muß dem erforderlichen Kathodenwiderstand der EE 1 entsprechen (Wert von R_7 in Abb. 17, siehe auch die untenstehenden Daten).

HEIZDATEN

Heizung: indirekt durch Gleich- oder Wechselstrom, Parallelspeisung.

Heizspannung	V_f	= 6,3 V
Heizstrom	I_f	= 0,6 A

KAPAZITÄTEN

C_{ag1}	<	0,006 μμF	C_a	=	9,2 μμF
C_{g1}	=	10,6 μμF	C_{g1f}	<	0,025 μμF

KENNDATEN

Anodenspannung	V_a	= 250 V
Schirmgitterspannung	V_{g2}	= 150 V
Spannung an der Sekundäremissionskathode	V_{k2}	= 150 V
Negative Gittervorspannung	V_{g1}	= −2,5 V
Anodenstrom	I_a	= 8 mA
Schirmgitterstrom	I_{g2}	= 0,7 mA
Strom von der Sekundäremissionskathode	I_{k2}	= −6 mA
Steilheit	S	= 14 mA/V
Innenwiderstand	R_i	= 75.000 Ω

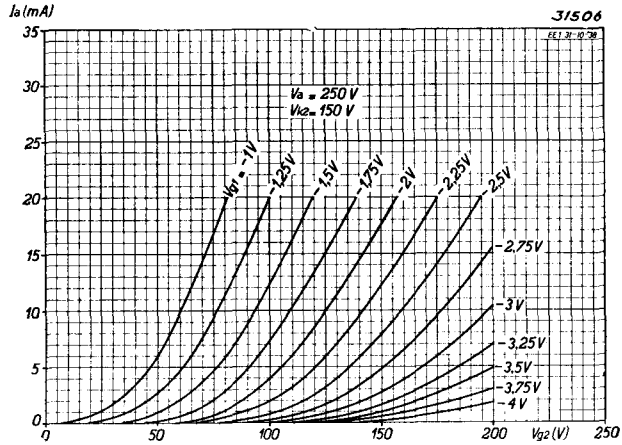


Abb. 11
Anodenstrom als Funktion der Schirmgitterspannung bei verschiedenen negativen Gitterspannungen.

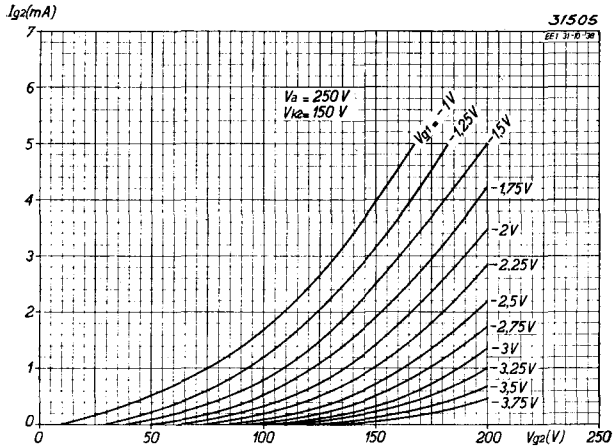


Abb. 12
Schirmgitterstrom als Funktion der Schirmgitterspannung bei verschiedenen negativen Gitterspannungen.

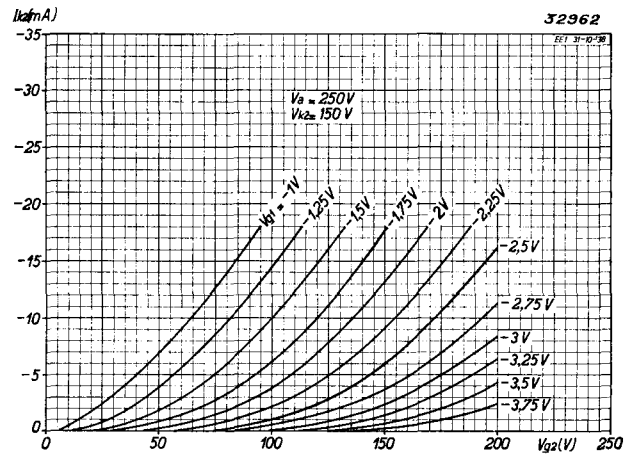


Abb. 13
Strom von der Sekundäremissionskathode als Funktion der Schirmgitterspannung bei verschiedenen negativen Gitterspannungen

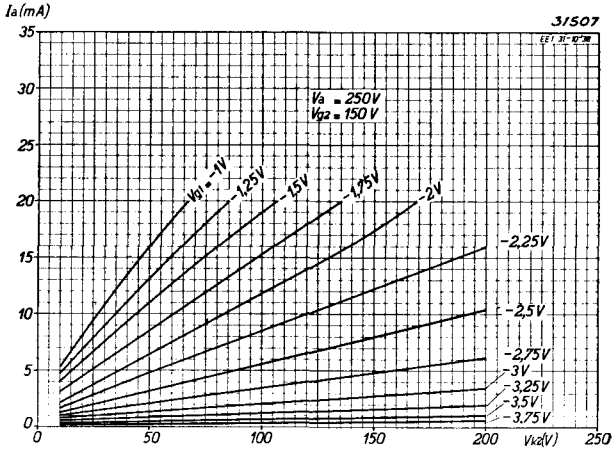


Abb. 14
Anodenstrom als Funktion der Spannung an der Sekundäremissionskathode bei verschiedenen negativen Gitterspannungen.

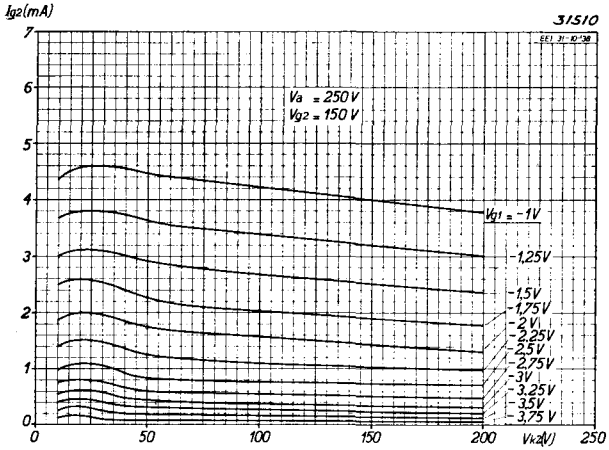


Abb. 15
Schirmgitterstrom als Funktion der Spannung an der Sekundäremissionskathode bei verschiedenen negativen Gitterspannungen.

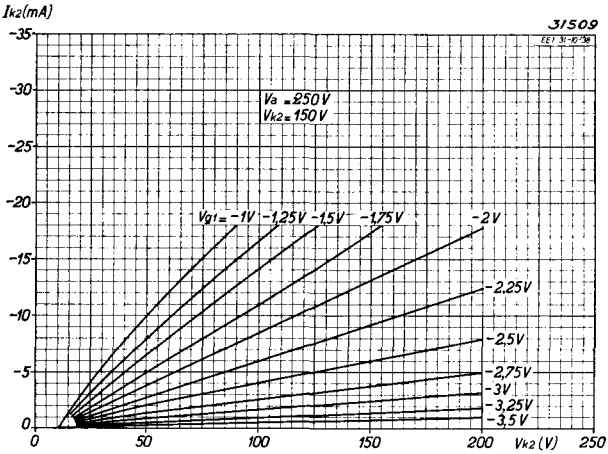


Abb. 16
Strom von der Sekundäremissionskathode als Funktion der Spannung an der Sekundäremissionskathode bei verschiedenen negativen Gitterspannungen.

BETRIEBSDATEN zur Verwendung als Steuerröhre von Gegentaktstufen

(Über die Bedeutung der Widerstände, Spannungen, Ströme usw. siehe Schaltbild der Abb. 17).

Speisespannung	V_o	=	275 V		300 V	
Widerstand	R_1	=	8000 Ω		8000 Ω	
Widerstand	R_2	=	25000 Ω		25000 Ω	
Widerstand	R_3	=	16000 Ω		16000 Ω	
Widerstand	R_4	=	80000 Ω		100000 Ω	
Widerstand	R_5	=	150000 Ω		136000 Ω	
Widerstand	R_6	=	20000 Ω		18000 Ω	
Kathodenwiderstand	R_7	=	2250 Ω		2150 Ω	
Anodenstrom	I_a	=	3,6 mA		3 mA	
Strom von der Sekundäremissionskathode	I_{k_2}	=	—2,75 mA		—2,25 mA	
Schirmgitterstrom	I_{g_2}	=	0,3 mA		0,2 mA	
Ausgangswechselspannung pro Gitter der Endstufe	$V_{o(eff)}$	=	3 V	5 V	3 V	5 V
Verstärkung vom Gitter der EE 1 auf das Gitter der Endstufe	V_o/V_i	=	70	70	75	75
Gesamtverzerrung	d_{tot}	=	2,2%	3,6%	3%	5%

GRENZDATEN

Max. Anodenkaltspannung	V_{ao}	=	max. 550 V
Max. Anodenspannung	V_a	=	max. 250 V
Max. Anodendauerleistung	W_a	=	max. 2 W
Max. Schirmgitterkaltspannung	V_{g20}	=	max. 550 V
Max. Schirmgitterspannung	V_{g2}	=	max. 150 V
Max. Schirmgitterdauerbelastung	W_{g2}	=	max. 0,1 W
Max. Kaltspannung an der Sekundäremissionskathode	V_{k20}	=	max. 550 V
Max. Spannung an der Sekundäremissionskathode	V_{k2}	=	max. 150 V
Max. Dauerbelastung der Sekundäremissionskathode	W_{k2}	=	max. 2,5 W
Max. Primärkathodenstrom	I_{k_1}	=	max. 10 mA
Grenzwert des Gitterstromeinsatzpunktes	V_{g1} (I_{g1} + 0,3 μA)	=	max. —1,3 V
Max. Widerstand zwischen Gitter und Kathode	R_{g1k}	=	max. 0,7 MΩ
Max. Widerstand zwischen Heizfaden und Kathode	R_{fk}	=	max. 20.000 Ω
Max. Spannung zwischen Heizfaden und Kathode (Gleichspannung oder Effektivwert der Wechselspannung)	V_{fk}	=	max. 50 V

ANWENDUNG

Im Anschluß an das anfangs Erwähnte ist noch folgendes zu beachten. Angesichts der hohen Steilheit ist die größere Schwingneigung zu berücksichtigen. Man kann diese durch einen vor das Steuergitter geschalteten Widerstand von z.B. 10.000 Ohm beherrschen. Die Röhre EE 1 darf nur mit automatischer Gittervorspannung betrieben werden. Normalerweise wird die automatische Gittervorspannung durch einen Kathodenwiderstand erzeugt. Der Wert dieses Widerstandes wird dann so gewählt, daß der Spannungsabfall in ihm gerade der erforderlichen Gittervorspannung entspricht. Der Arbeitspunkt A stellt sich dann auf den Schnittpunkt der Linie OA mit der Kennlinie ein (siehe Abb. 19). Eine kleine Verschiebung der Kennlinie hat in dem Falle bei normalen Röhren nur eine geringe Zu- oder Abnahme des Anodenstromes zur Folge. Bei der EE 1 hätten aber Verschiebungen der Kennlinie eine viel größere Anodenstromänderung zur Folge. Da der normale Kathodenwiderstand ziemlich klein wäre und daher nur in geringem Maße ausgleichend wirken würde, sind besondere Maßnahmen erforderlich. Eine bessere Selbstregelung des Kathodenstromes wäre möglich, wenn in Abb. 19 die Linie OA weniger steil verliefe. Das ist dadurch zu erreichen, daß

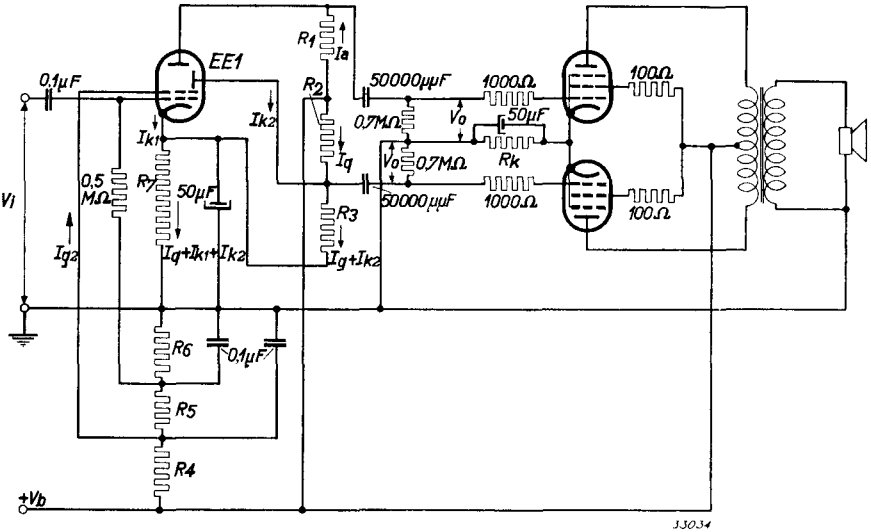


Abb. 17
Schaltung zur Verwendung der Röhre EE1 als Steuerröhre von Gegentaktendstufen ohne Gegenkopplung. Die Werte der Widerstände R1 bis R7 sind der Datenaufstellung zu entnehmen.

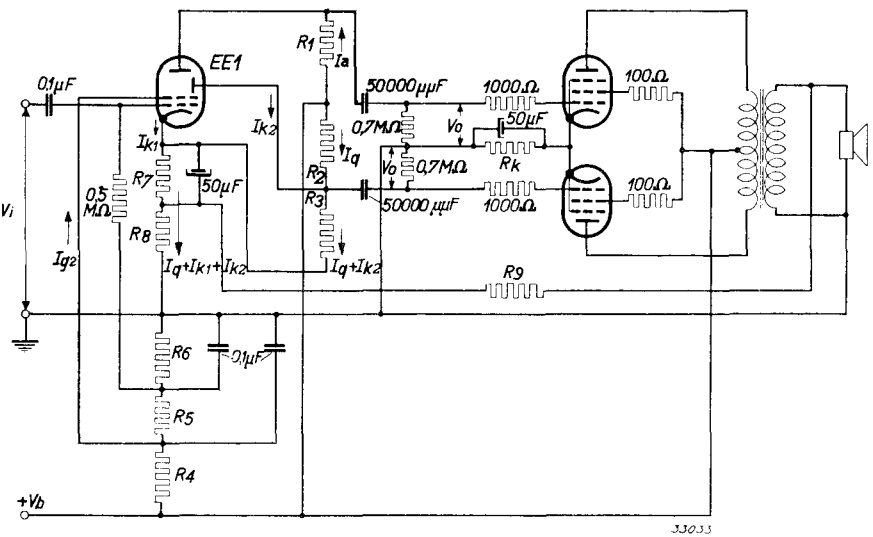


Abb. 18
Schaltung zur Verwendung der Röhre EE1 als Steuerröhre von Gegentaktstufen mit Gegenkopplung. Diese Schaltung entspricht der Schaltung der Abb. 17 bis auf die Einfügung der Widerstände R8 und R9. Die Werte dieser Widerstände sind von dem gewünschten Gegenkopplungsgrad abhängig, die Summe der Widerstände R7 und R8 muß dem Werte des Widerstandes R7 der Abb. 17 gleich sein.

der Kathodenwiderstand höher gewählt wird, da die Neigung der Linie dem Quotienten der Kathodenspannung und des Kathodenstromes entspricht. Da nun die negative Vorspannung zu hoch werden würde, ist dem Gitter gleichzeitig eine positive Spannung zuzuführen. Diese Spannung ist in Abb. 19 durch OB dargestellt. Wird vom Punkte B aus die neue Linie gezogen, so ergibt diese tatsächlich wieder die gesamte Gittervorspannung als Funktion des Kathodenstromes, und es ist ersichtlich, daß der nun eingestellte Kathodenstrom, der durch den Schnittpunkt mit der Kennlinie angegeben wird, nicht viel von dem mittleren Betrag abweichen kann. Abb. 6 zeigt eine prinzipielle Schaltung, die für die EE 1 als einfache Verstärkerröhre maßgebend ist. Bei Verwendung der EE 1 als Steuerröhre für Gegentaktendstufen wird empfohlen, die Speisespannung V_b nicht niedriger als 275 V zu wählen, da sonst keine befriedigenden Resultate erzielt werden.

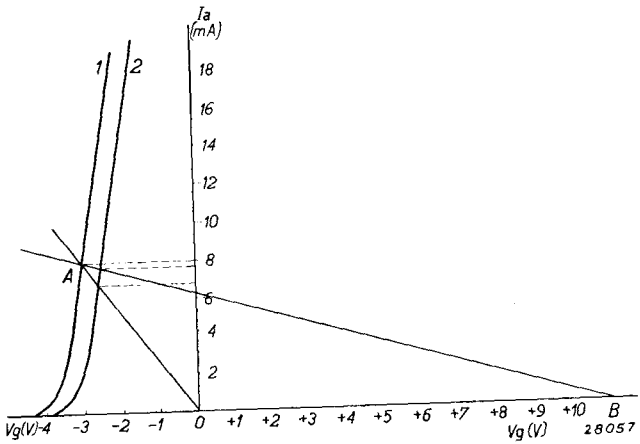


Abb. 19
Zeichnerische Darstellung des Einflusses des Kathodenwiderstandes auf die Konstanz des Kathodenstromes. Je flacher die Widerstandslinie OA verläuft, desto besser wird die Selbstregelung des Kathodenstromes sein.