

Verstärkerröhren

Elektrometerröhren

J**8334—2**

Verfasser: Dr. Werner Kleen und Dr. Walter Graffunder, Berlin

DK 621.385.3

I. Abgrenzung und Anwendung.

Verstärkerröhren, die zur Messung extrem kleiner Gleichströme oder Gleichspannungen dienen sollen, werden als Elektrometerröhren (ER) bezeichnet. Sie werden verwendet statt hochempfindlicher Galvanometer oder Elektrometer^{134, 135, 136, 309} und erlauben in den günstigsten Fällen die Messung von Gleichströmen in der Größenordnung von 10^{-16} A und Gleichspannungen in der Größenordnung 10^{-5} V. Prinzipiell können ER in zwei verschiedenen Schaltungen gebraucht werden:

a) Das Gitter der Röhre wird über einen hochohmigen bekannten Widerstand und eine Batterie zur Einstellung der negativen Gittervorspannung mit der Kathode verbunden. Der den Eingangswiderstand durchfließende Gleichstrom des Meßobjektes bewirkt eine Änderung der Gitterspannung, diese eine Änderung des Anodenstromes, die somit ein Maß für die Größe des Meßstromes ist (s. ATM Z 634—1).

b) Die Röhre arbeitet ohne äußeren Eingangswiderstand; das Gitter liegt also frei und stellt sich im Ruhezustand auf das Potential ein, bei dem die Summe der Gitterströme (Elektronen-, Ionen- und Isolationsstrom) gleich Null ist (floating-point, — 1...— 3 V). Der zu messende Strom wird dem Gitter zugeführt und lädt die Kapazität des Gitters gegen alle anderen Elektroden auf. Dadurch verlagert sich das Gitterpotential und es ändert sich der Anodenstrom, dessen Größe zur Anzeige dient^{302, 303, 307}.

Für die folgenden Erörterungen wollen wir den meßtechnisch häufigsten Fall einer einstufigen Verstärkung annehmen. Dabei befindet sich im Ausgang der ER der empfindliche Strommesser, dessen Anzeige zur Ermittlung des Meßstromes dient. Praktisch wird der Innenwiderstand des Strommessers (Galvanometer) stets klein gegen den Innenwiderstand der ER sein. Die Röhre arbeitet damit im Kurzschluß; die Anodenspannung ändert sich also bei Änderung der Gitterspannung praktisch nicht. Anders liegen die Verhältnisse, wenn im Anodenkreis der Röhre ein Außenwiderstand sich befindet und die an diesem auftretenden Spannungsänderungen dem Gitter einer 2. Röhre zugeführt werden. (Mehrstufiger Gleichstrom-Verstärker.) Dann muß bei gegebener Stromänderung am Eingang der Röhre eine möglichst große Anodenspannungsänderung erzielt werden. Dabei bedarf die Anodentrückwirkung der Berücksichtigung. Dieser Fall ist durch die Betrachtungen in Blatt J 8332—1 im Zusammenhang mit den folgenden Erörterungen zu erfassen.

II. Empfindlichkeit.

Zur Kennzeichnung der Stromempfindlichkeit oder Stromverstärkung E von ER dient zweckmäßig der folgende Ausdruck

$$E = \frac{di_a}{di} = \frac{S}{1/R_g + 1/Z_g} \quad (1)$$

Dabei ist di_a die Änderung des Anodenstromes bei einer Änderung des Stromes di am Eingang der Röhre. S ist die Steilheit der Röhre (A/V), R_g der äußere Gitterwiderstand (Ω), und, wenn wir mit i_g und u_g Gitterstrom und Gitterspannung bezeichnen

$$Z_g = \frac{\partial u_g}{\partial i_g} \quad (2)$$

Z_g ist also die reziproke Neigung der Gitterstrom-Gitterspannungskennlinie gegen die Gitterspannungsachse.

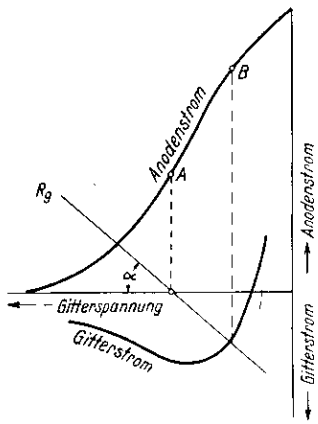
Wenn die Röhre ohne äußeren Eingangswiderstand arbeitet, das Gitter also freiliegt, so ist $R_g = \infty$ und aus Gl. (1) folgt:

$$E = S \cdot Z_g \quad (3)$$

In diesem Fall wird also die höchste überhaupt mögliche Stromempfindlichkeit erreicht. Aus dieser Tatsache ist ersichtlich, daß für die untere Grenze des meßbaren Stromes der Gitterstrom und sein Verlauf die wesentlichste Rolle spielt.

Schaltungen mit freiliegendem Gitter werden relativ wenig verwendet, und zwar im wesentlichen aus folgenden Gründen: Unvermeidbare Änderungen des Kontaktpotentials zwischen Gitter und Kathode verlagern das Gleichgewichtspotential des Gitters, also den Arbeitspunkt im Laufe der Zeit. Dadurch wird eine häufige Eichung notwendig. Außerdem ist die Abhängigkeit des Gitterstromes von der Gitterspannung nichtlinear, so daß für die Messung der zeitlich gleichfalls schwankende Verlauf der Gitterstrom-Gitterspannungskennlinie genau bekannt sein muß. Anwendung findet die Schaltung mit freiliegendem Gitter nur für Messungen, bei denen eine extrem hohe Stromempfindlichkeit verlangt wird. Gegenüber der Schaltung mit Gitterwiderstand scheint sie allerdings den Vorteil zu haben, daß die statistischen Schwankungen des Entladungsmechanismus sich nicht so stark bemerkbar machen^{89, 302, 309}.

Ein äußerer Gitterwiderstand wird im allgemeinen so gewählt, daß im Vergleich zu seinem Wert der ihm parallel liegende innere Widerstand der Gitter-Kathodenstrecke groß ist. Dann ist das Meßobjekt praktisch durch einen linearen Widerstand abgeschlossen. Kann diese Bedingung nicht erfüllt werden, so muß außer der Nichtlinearität des Eingangswiderstandes der Röhre berücksichtigt werden, daß durch die Einschaltung des Gitterwiderstandes eine Verlagerung des Arbeitspunktes gegenüber dem durch die Gitterspannungsbatterie gegebenen Wert auftritt. Diese Verlagerung



ist in bekannter Weise aus dem Schnittpunkt von Gitterstrom - Gitterspannungskennlinie und Widerstandsgerade zu ersehen (s. Bild 1).

Die Forderung extrem kleinen Gitterstromes hat

Bild 1. Verlagerung des Arbeitspunktes durch Einschalten eines äußeren Gitterwiderstandes bei Vorhandensein von Gitterstrom. (R_g Widerstandsgerade, $\text{tg } \alpha = \frac{1}{R_g}$, A Arbeitspunkt ohne, B Arbeitspunkt mit Gitterwiderstand.)

allerdings nur bis zu einer unteren Grenze Sinn, da äußere Gitterwiderstände mit hinreichender zeitlicher Konstanz und Temperaturunabhängigkeit doch nur bis zu einer oberen Grenze herstellbar sind, die bei etwa $10^{12} \Omega$ liegt.

III. Ursachen des Gitterstromes, Aufbau der Elektrometerröhren.

Der zum Steuergitter fließende Strom ist auf verschiedene Ursachen zurückzuführen.

1. Thermische Elektronenemission des Gitters entsteht infolge Erwärmung durch Wärmestrahlung der Kathode. Diese Ursache des Gitterstromes wird konstruktiv vermieden durch Verwendung einer niedrig temperierten Glühkathode geringer Heizleistung. In ER findet man daher stets direkt geheizte Kathoden, vielfach thorierte Wolframfäden. Außerdem wird die Austrittsarbeit der Gitterdrähte durch Überzüge bisweilen künstlich erhöht.

2. Photoemission des Gitters entsteht gleichfalls durch Strahlung der Glühkathode. Abhilfe schaffen hier die gleichen Maßnahmen wie unter 1). In Bild 2 sind Gitter- und Anodenstrom einer Elektrometerröhre in Abhängigkeit von der Heizspannung aufgetragen. Dies sind Kurven, wie sie charakteristisch für alle Elektrometerröhren sind. Um einen möglichst geringen Einfluß von Schwankungen der Heizbatterie auf den Anodenstrom zu erhalten, würde man auf Grund der Anodenstrom-Heizspannungskennlinie zweckmäßig eine möglichst hohe Heizspannung wählen. Der damit verbundene, durch thermische und Photoemission entstehende hohe Gitterstrom zwingt jedoch

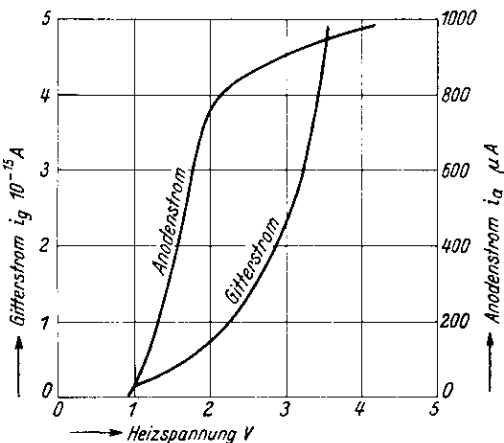


Bild 2. Steuergitterstrom und Anodenstrom einer Elektrometerröhre mit Raumladegitter in Abhängigkeit von der Heizspannung.

zu einem Kompromiß derart, daß im vorliegenden Fall zweckmäßig eine Heizspannung von 2,5 V gewählt wird.

3. Isolationsstrom. Bei normalen Verstärkerröhren sind Isolationsfehler zwischen dem Steuergitter und den anderen Elektroden eine der wesentlichsten Ursachen des Gitterstromes. Durch konstruktive Maßnahmen kann bei ER diese Leitfähigkeit soweit vermindert werden, daß der Isolationsstrom zum Gitter gegenüber den anderen Ursachen praktisch keine Rolle mehr spielt. Größten Einfluß auf die Gitterisolation hat die Art der Halterung des Gitters. Das Gitter wird immer am oberen Ende des Röhrenkolbens ausgeführt und derart befestigt, daß sein Haltesteg nicht mit anderen Elektrodenzuführungen zusammen im Quetschfuß angebracht ist. Um die Oberflächenleitfähigkeit längs der den Gittersteg tragenden Isolatoren möglichst klein zu machen, werden künstlich lange Kriechwege geschaffen. Dies kann z. B. durch eine Anordnung geschehen, wie sie schematisch in Bild 3 dargestellt ist. Bei dieser ist an dem aus dem Quetschfuß herausragenden Isolator eine glockenförmige Hülle aus Glas angeschmolzen. Für die Isolatoren werden meistens Spezialgläser besonders geringer Volumen-Leitfähigkeit, bisweilen auch Quarz, verwendet.

Neben den Leitfähigkeiten im Innern der Röhre stören vielfach auch die schlechten Isolationen längs der Oberfläche des Röhrenkolbens. Zur Verminderung der letzteren ist z. B. eine Ausführung der Gitterzuleitung vorgeschlagen worden, wie sie schematisch in Bild 4 gezeichnet ist.

Oberhalb der Einschmelzung e befindet sich ein Glasrohr, das am oberen Ende mit einem Bernsteinsteller b abgedeckt ist und die Gitteranschlußklemme k trägt. An diesem Glasstutzen ist seitlich ein Ansatz g angebracht, in dem eine zur Trocknung der Wände dienende hygroskopische Substanz (Phosphorpentoxyd u. ä.) untergebracht werden kann.

4. Ionenstrom. Selbst mit den Mitteln der modernen Hochvakuum-Technik gelingt es nicht, eine Verstärkerröhre so weit zu evakuieren, daß nicht noch geringe Gasreste im Röhrenkolben zurückbleiben (J 136—3). Die Gasmoleküle werden von Elektronen getroffen, und es entstehen bei hohen Elektronengeschwindigkeiten aus ihnen positive Träger (Ionen), die wesentlich zur potentialmäßig niedrigsten Elektrode, also zum Steuergitter fliegen, und damit einen Gitterstrom hervorrufen. Ionen werden gleichfalls in für Elektrometerröhren merklicher Menge von der Glühkathode emittiert.

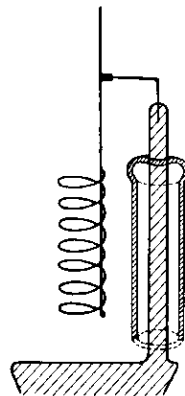


Bild 3. Halterung des Gitters einer Elektrometerröhre (schematisch, Elektrometerröhre von Osram-AEG T. 114).

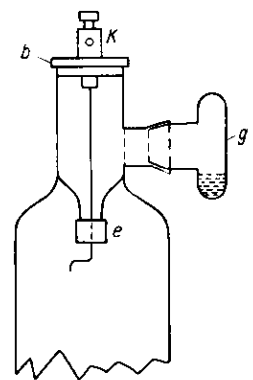


Bild 4. Gitterzuführung für eine Elektrometerröhre (schematisch, D.R.P. Nr. 391 232/21; 24, Siemens & Halske).

tiert. Um die Trägerbildung im Entladungsweg zu vermeiden, werden ER fast immer bei so geringen Spannungen betrieben, daß die Elektronen die zur Trägerbildung notwendige Geschwindigkeit nicht erlangen können. Praktisch sollen die positiven Betriebsspannungen von Elektrometerröhren unterhalb von 8 V liegen. In Bild 5 ist die für eine Elektrometerröhre

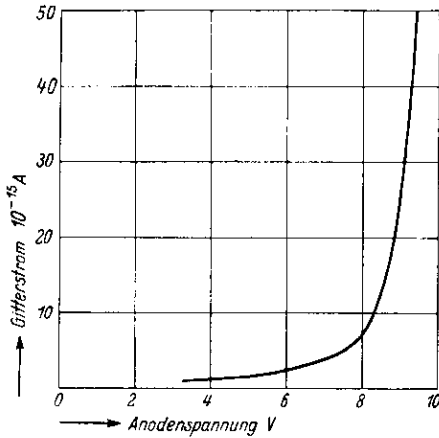


Bild 5. Gitterstrom in Abhängigkeit von der Anodenspannung.

charakteristische Abhängigkeit des Gitterstromes von der Anodenspannung gezeichnet. Der steile Anstieg des Gitterstromes für $u_a > 8$ V ist wesentlich auf die Trägerbildung im Entladungsweg zurückzuführen. Bei so kleiner Anodenspannung bleiben in normalen Dreielektrodenröhren Anodenstrom und Steilheit und damit die Stromempfindlichkeit jedoch außerordentlich klein. Zur Erhöhung von Strom und Steilheit werden die ER deshalb fast ausschließlich als Raumladegitterröhren gebaut (J 8331-2). Das Raumladegitter bewirkt eine genügende Größe des Anodenstromes und hat außerdem die Aufgabe, den aus der Kathode austretenden positiven Ionen den Weg zum Steuergitter zu versperren, da diese gegen das positive Potential in der Raumladegitterebene nicht anlaufen können. Für die Größe der Raumladegitterspannung existiert ein relativ enger brauchbarer Bereich (Bild 6). Bei großen Raumladegitterspannungen erfolgt Trägerbildung im Entladungsraum infolge der relativ großen Elektronengeschwindigkeit; der Gitterstrom ist groß. Bei kleinen Raumladegitterspannungen können von der Glühkathode emittierte Ionen zum Steuergitter gelangen. Aus diesen Gründen werden im allgemeinen Raumladegitterspannungen von 3...7 V verwendet.

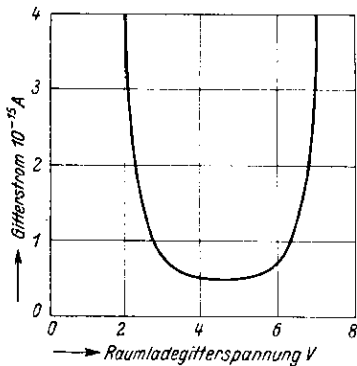


Bild 6. Gitterstrom in Abhängigkeit von der Spannung des Raumladegitters.

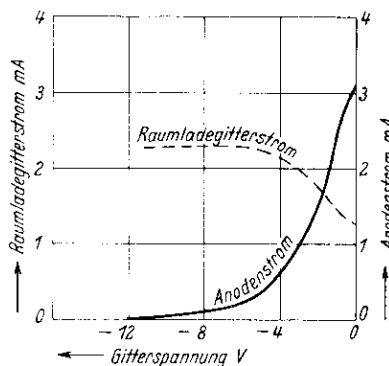


Bild 7. Kennlinien der Elektrometerröhre von Osram-AEG T. 113. Heizspannung 3 V, Anodenspannung 12 V, Raumladegitterspannung 12 V.

5. **Elektronenemission des Steuergitters infolge weicher Röntgenstrahlen.** Die auf Raumladegitter und Anode auftreffenden Elektronen erzeugen an diesen weiche Röntgenstrahlen, sobald ihre Geschwindigkeit größer als 6...8 V ist. Beim Auftreffen dieser Strahlung auf das Steuergitter entsteht dort Elektronenemission, also Gitterstrom. Der Anstieg des Gitterstromes bei größeren Raumladegitter- und Anodenspannungen in Bild 5 und 6 ist z. T. auf die Entstehung weicher Röntgenstrahlen zurückzuführen.

IV. Gebräuchliche Typen.

Wie aus den vorhergehenden Abschnitten hervorgeht, sind die Konstruktions- und Betriebsmöglichkeiten wegen der hohen Ansprüche, die an gute ER gestellt werden, außerordentlich begrenzt. Die auf dem Markt befindlichen Elektrometerröhren ähneln sich daher sowohl hinsichtlich des Aufbaus als auch in ihren Kennlinien außerordentlich. Von den Herstellerfirmen werden dabei für die positiven Spannungen bisweilen Werte angegeben, die oberhalb der zur Einhaltung des extrem kleinen Gitterstromes genannten notwendigen Grenzwerte liegen. In solchen Fällen soll, unter Verzicht auf extrem kleinen Gitterstrom, die Steilheit der Röhre vergrößert werden. Für Messungen, bei denen die Forderung außerordentlich geringen Gitterstromes nicht vorhanden ist, können solche Röhren infolge der größeren Steilheit den Röhren mit extrem kleinem Gitterstrom überlegen sein. — Die folgende Aufzählung stellt nur eine Auswahl der meist gebrauchten Elektrometerröhren dar.

1. **Elektrometerröhren von Osram-AEG (T. 113 u. 114).** Diese beiden Röhren sind Raumladegitterröhren. Die T. 114 ist für Messungen geeignet, bei denen ein extrem kleiner Gitterstrom notwendig ist; die T. 113 hat wesentlich größere Steilheit. Die Röhren sollen zweckmäßig unter folgenden Betriebsbedingungen betrieben werden:

	T. 113	T. 114
Heizspannung	3,0 V	2,0 V
Heizstrom	ca. 0,1 A	ca. 0,09 A
Anodenspannung	maximal 20 V	6 V
Raumladegitterspannung	maximal 20 V	4 V
Steilheit	ca. 600 μ A/V	55 μ A/V
Verstärkungsfaktor	2,5	1
Eingangskapazität (Kapazität des Gitters gegen sämtliche Elektroden)	3,3 pF	3,4 pF

Kennlinien dieser Röhren sind in Bild 7 und 8 ersichtlich. Die Röhre T. 114 ist in Bild 9 abgebildet und in ihrem Aufbau charakteristisch für moderne Elektrometerröhren. Der Gitterstrom ist bei der Röhre T. 114 um ein bis zwei Größenordnungen geringer als bei der T. 113.

2. **Philips-Elektrometerröhre (E 4060).** Diese Elektrometerröhre ist keine Raumladegitterröhre, sondern eine Triode. Hinsichtlich des Aufbaus weicht sie von allen gebräuchlichen Verstärkeröhren ab. Das Gitter umgibt bei ihr nicht die Kathode konzentrisch, sondern befindet sich als Platte auf der einen Seite der Glühkathode, auf deren anderer Seite, parallel der Gitterplatte, die Anode angeordnet ist (s. Bild 10). Solche Verstärkeröhren werden als „Plattensteuerrohren“ oder Plation bezeichnet. Sinnvoll ist ein solcher Aufbau für ER, da sich damit einfacher als bei normalen Dreielektrodenröhren ein großer Durchgriff der Anode und somit auch bei den notwendigerweise kleinen Anodenspannungen ein genügend großer Anodenstrom erreichen läßt. Kennlinien für eine Anodenspannung von 4 V sind in Bild 11 ersichtlich.

3. **Elektrometerröhre der General Electric Comp. (FP 54).** Die Röhre ist als Raumladegitterröhre gebaut, besitzt extrem kleinen Gitterstrom bei allerdings auch nur kleiner Steilheit.

Betriebsdaten:

Heizspannung	2,5 V	Heizstrom	0,1 A
Anodenspannung	6 V	Raumladegitterspannung	4 V
Steilheit	25 $\mu\text{A}/\text{V}$	Verstärkungsfaktor	1
Eingangskapazität	2,5 pF		

Kennlinien unter diesen Bedingungen sind Bild 12 zu entnehmen.

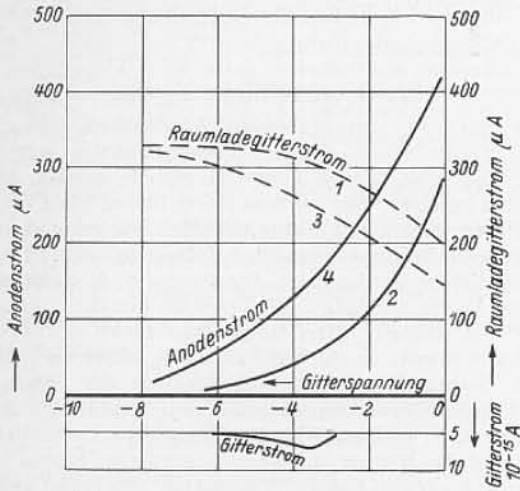


Bild 8. Kennlinien der Elektrometerröhre von Osram-AEG T.114. Heizspannung 2 V, Raumladegitterspannung 4 V, Kurve 1 und 2: Anodenspannung 4 V, Kurve 3 und 4: „ 6 V.

sondern normale Trioden. Sie sind offenbar für Messungen bestimmt, bei denen hinsichtlich des Gitterstromes nicht die höchsten Ansprüche gestellt werden. Der Gitterstrom beträgt 10^{-11} ... 10^{-12} A, die Steilheit 50 bis $100 \mu\text{A}/\text{V}$ bei einer Anodenspannung von 6 V und einer negativen Gitterspannung von $-2,5$ V.

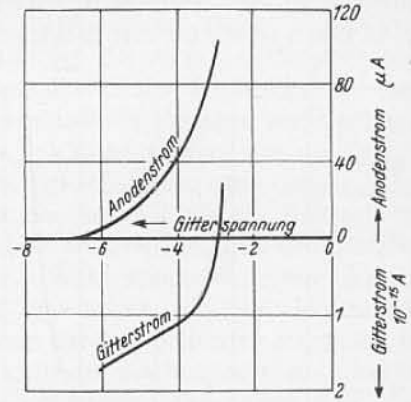


Bild 12. Kennlinien der Elektrometerröhre der General Electric Comp. FP 54. Heizspannung 2,5 V, Raumladegitterspannung 4 V, Anodenspannung 6 V.

V. Maßnahmen bei der Verwendung von Elektrometerröhren.

Um den, seiner Ursache nach innerhalb des Röhrenkolbens erzeugten Gitterstrom nicht durch zusätzliche äußere Einflüsse zu vergrößern, müssen bei hochempfindlichen Schaltungen eine Anzahl von Vorsichtsmaßnahmen beachtet werden.

Zur Vermeidung von Photoemission auf dem Gitter durch das den Röhrenkolben durchdringende Tageslicht muß die Elektrometerröhre im Dunkeln aufgestellt werden.

Oberflächenleitfähigkeit längs des Glaskolbens zwischen dem am oberen Kolbenende ausgeführten Steuergeritter und den anderen Elektrodenanschlüssen vermindert man durch sorgfältige Reinigung des Kolbens mit Alkohol und destilliertem Wasser. Vielfach wird vorgeschlagen, die Oberfläche des Kolbens mit Ceresinwachs zu überziehen, um die Bildung hygroskopischer, die Isolation verschlechternder Oberflächenschicht zu verhindern.

Arbeitet man bei mehrstufigen Verstärkern mit einem hohen Außenwiderstand im Anodenkreis, so steigt während der Messung mit abnehmendem Anodenstrom die an der Röhre liegende Anodenspannung an. In diesem Fall ist darauf zu achten, daß die Anodenspannung nicht so hohe Werte annimmt, daß in der Röhre Ionisation und damit erhöhter Gitterstrom auftreten.

Ganz besonderer Wert muß bei der Verwendung von ER — wie bei jeder Gleichstrom-Verstärkung — auf die zeitliche Konstanz der Betriebsspannungen gelegt werden. Zur Kompensation bzw. Eliminierung von Spannungsschwankungen sind eine Vielzahl von Spezialschaltungen entwickelt worden. Es sei auf die Literatur verwiesen ^{139...141}.

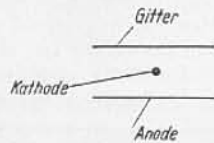


Bild 10. Elektrodenanordnung einer Plattensteuerröhre (schematisch, Philips E 4060).

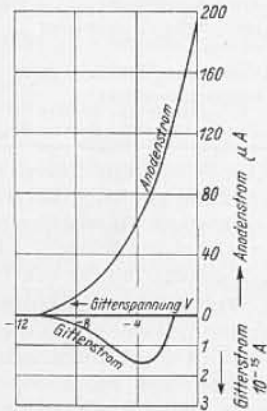


Bild 11. Kennlinien der Philips-Elektrometerröhre E 4060, Anodenspannung 4 V.

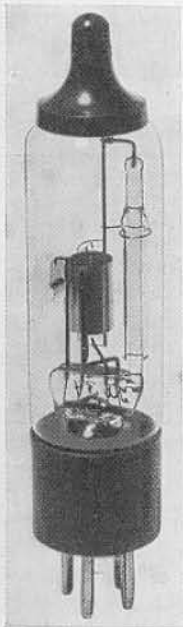


Bild 9. Elektrometerröhre von Osram-AEG T.114.

4. Elektrometerröhre der Western Electric Comp. (D 96475)³⁰⁵. Diese Raumladegitterröhre liegt sowohl in bezug auf die Steilheit ($S = 40 \mu\text{A}/\text{V}$) als auch hinsichtlich des Gitterstromes ($i_g = 10^{-13}$ bis 10^{-15} A) etwa wie die Osram-ER T.114. Die Hersteller schlagen sowohl für das Raumladegitter als auch für die Anode die Betriebsspannung von 4 V vor.

5. Elektrometerröhren der Westinghouse Comp. (DRH 506 u. DRH 507). Diese Röhren sind keine Raumladegitterröhren,

Literatur.

Gesamtübersicht in Blatt J 8330—1, ferner 302, 304, s. Blatt J 8333—1. — 305. P. A. Macdonald u. E. W. Turnbull, Operating characteristics of the FP 54 thermionic direct current amplifier tube, *Physics* 6 (1935) S. 304/307. — 306. A. W. Hull, Electronics devices as aids to research, *Physics* 2 (1932) S. 409/431. — 307. P. A. Macdonald u. E. M. Campbell, Floating grid direct current amplifier, *Physics* 6 (1935) S. 211/214. — 308. D. B. Penick, Vacuum tube for small current measurements, *Bell Lab. Record* 14 (1935), S. 74/78. — 309. P. A. Macdonald, The thermionic amplification of direct currents, *Physics* 7 (1936) S. 265/294.