

## Die Vakuumröhre und ihre technischen Anwendungen.<sup>1)</sup>

Von H. Barkhausen.

### I. Die Gesetze der Elektronenströme im hohen Vakuum.<sup>2)</sup>

#### A. Die drei Grundgesetze.

Während die elektrischen Entladungen in verdünnten Gasen wegen ihrer Unregelmäßigkeit und Launenhaftigkeit allgemein bekannt sind, erhält man im höchsten Vakuum überraschend regelmäßige Erscheinungen, wenn man als Ersatz für die fehlende Ionenerregung durch Zusammenstoß mit Gasmolekeln einen elektrisch hoch erhitzten Glühdraht als Elektronenquelle verwendet; die Elektronenströme lassen sich dann sogar auf drei einfache Grundgesetze zurückführen, deren jedes für einen bestimmten Spannungsbereich gültig ist.

Das erste Grundgesetz gibt die Ergiebigkeit der Glühdraht-Elektronenquelle in Abhängigkeit von ihrer Temperatur  $T$  an und lautet:

$$I_s = AF \sqrt{T} e^{-\frac{B}{T}} \text{ (Sättigungsstrom gültig für } E \gg E_s) \quad (1)$$

Es ist durch Anwendung der Gasgesetze auf die Elektronenverdampfung gewonnen und hat sich experimentell sehr weitgehend bestätigen lassen.  $A$  und  $B$  sind nur vom Material des Glühdrahts abhängige Konstante.  $F$  ist die Oberfläche des Glühdrahts. Man nennt  $I_s$  den Sättigungsstrom, weil der Strom unter Anwendung beliebig starker elektrischer Felder nicht über diesen Wert hinaus ansteigen kann.

Bei schwächeren Feldern bleibt der Strom dagegen kleiner, weil das durch die Elektronen selbst erzeugte Feld einen Teil der verdampfenden Elektronen wieder in den Glühdraht zurücktreibt. Dieser Vorgang wird durch das zweite Grundgesetz beherrscht:

$$I = CE^{3/2} \text{ (Raumladungsstrom gültig für } E_s \gg E \gg 0) \quad (2)$$

welches angibt, wie der Strom  $I$  mit der Spannung  $E$  ansteigt, so lange

1) Auf Wunsch der Schriftleitung gebe ich hier einen Auszug aus dem ersten Teil einer Arbeit, die ich im Sommer 1917 als Dienstschrift für die Inspektion des Torpedowesens in Kiel verfaßt habe, und die in erweiterter Form im Verlage von S. Hirzel, Leipzig erscheinen wird.

2) Die Aufklärung dieser Erscheinungen knüpft sich an die Namen Richardson, Langmuir, Schottky. Die meisten Arbeiten der letzteren beiden sind in der Phys. Zeitschr., Bd. 15, 1914 veröffentlicht. Sie enthalten viele wichtige Einzelheiten, auf die hier verwiesen sei.

diese kleiner bleibt als die zur Erzeugung des Sättigungsstromes erforderliche „Sättigungsspannung“  $E_s$ . Die Konstante  $C$  ist nur von den Dimensionen abhängig und kann für einfache Fälle sogar aus diesen berechnet werden. Für die zylindrische Anordnung (Fig. 1) ist z. B.

$$C = 0,015 \frac{l}{r} \cdot 10^{-3}$$

$$I = 0,015 \frac{l}{r} E^{3/2} \text{ Milliampere} \quad (2a)$$

Temperatur und Material des Glühfadens haben im Gültigkeitsbereich dieser Formel gar keinen Einfluß auf den Strom. Dies merkwürdige

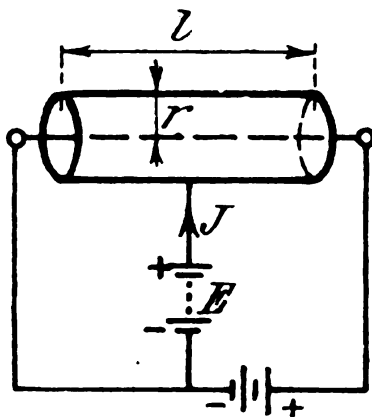


Fig. 1.

Resultat hat sich auch experimentell bestätigt. Die Formel beruht lediglich auf der Anwendung der Fallgesetze auf die Elektronen in dem elektrischen Felde, das einerseits durch die äußere Spannung  $E$ , andererseits durch das eigene Feld der fliegenden Elektronen, die „Raumladungen“, entsteht. Sie setzt voraus, daß die Elektronen alle mit der Geschwindigkeit 0 aus dem Glühdraht herauskommen. In Wirklichkeit ist aber deren mittlere Geschwindigkeit bei  $2300^\circ$  absoluter Temperatur gleich 0,3 Volt durchlaufener Spannung. Diese zu vernachlässigen, ist nur gestattet, wenn die Spannung  $E$  wesentlich größer ist, praktisch etwa über 1 Volt beträgt.

Für negative und ganz kleine positive Spannungen gilt schließlich das dritte Grundgesetz

$$I = I_0 \varepsilon^{E/E_s} \quad (\text{Anlaufstrom-Gleichung, gültig für } E < 0) \quad (3)$$

Dies beruht auf dem Maxwell'schen Gesetz der Geschwindigkeitsverteilung und ist aus der Bedingung abgeleitet, daß nur Elektronen mit genügender Austrittsgeschwindigkeit gegen eine negative Spannung  $E$  anlaufen können. Die Konstante  $E_0$  ist gleich  $8,6 \cdot 10^{-5} T$ , also für  $T = 2300^\circ$  gleich 0,2 Volt, das heißt, der Strom  $I$  sinkt jedesmal auf  $1/2,7$  seines Wertes, wenn die Spannung  $E$  um 0,2 Volt negativer wird.

Das erste Grundgesetz ist besonders für Senderröhren wichtig, bei denen zur Erzielung eines großen Leistungsumsatzes ein möglichst großer Sättigungsstrom  $I_s$  erforderlich ist.

Das zweite Grundgesetz bildet die Grundlage für die einfache Theorie der Verstärkeröhren. Es bestimmt die Form der sogenannten Charakteristik, aus der sich der Verstärkungsgrad ableitet.

Das dritte Grundgesetz kommt schließlich für die Gleichrichterwirkung beim Audion und die Vorgänge beim Gitterstrom zur Anwendung. Aus ihm ergibt sich, daß schon bei geringen negativen Spannungen, etwa von  $E = -1$  Volt an der Strom  $I$  praktisch gleich 0 wird.

Diese drei Gesetze sind maßgebend für die Konstruktion und die Betriebsverhältnisse aller Röhren, worauf bei den verschiedenen Anwendungsgebieten noch näher einzugehen sein wird.

#### B. Röhren mit Gitter.

Fast alle Röhren, Sende- wie Verstärkeröhren, besitzen außer der Glühkathode noch zwei kalte Elektroden: das „Gitter“ und die „Anode“. Und zwar ist die Absicht, daß das Gitter den Emissionsstrom steuern soll, ohne selbst viel Strom zu verbrauchen; der gesteuerte Strom soll vielmehr möglichst ganz zur Anode fließen, so daß dort eine möglichst große Wechselstromleistung abgegeben werden kann, während das Gitter nur eine geringe Steuerleistung verbraucht.

Es ist dann zu unterscheiden zwischen dem aus dem Glühdraht austretenden Emissionsstrom  $J$ , dem Gitterstrom  $J_g$  und dem Anodenstrom  $I_a$ , wobei

$$J_e = J_g + J_a \quad (4)$$

ist. Die Verteilung des Stromes auf Gitter und Anode läßt sich nicht durch ein einfaches Gesetz ausdrücken. Im allgemeinen geht der Strom hauptsächlich nach der Elektrode mit dem höheren Potential. Oft springt er ziemlich plötzlich von der einen Elektrode zur anderen über, wenn man eine Spannung ( $E_g$ , Fig. 2) allmählich vergrößert, und diese größer als die andere ( $E_a$ ) wird. Im übrigen wird ein Gitter aus

feineren Drähten und mit weiteren Maschen natürlich mehr Strom zur Anode durchlassen. Ebenso würde eine absichtlich klein gehaltene Anode den Strom mehr zum Gitter hintreiben.

Unabhängig von der Verteilung ist die Frage nach der Größe des Emissionsstromes  $I_e$  selbst. Es muß jetzt sowohl die Gitterspannung  $E_g$  als auch die Anodenspannung  $E_a$  einen Einfluß haben. Und

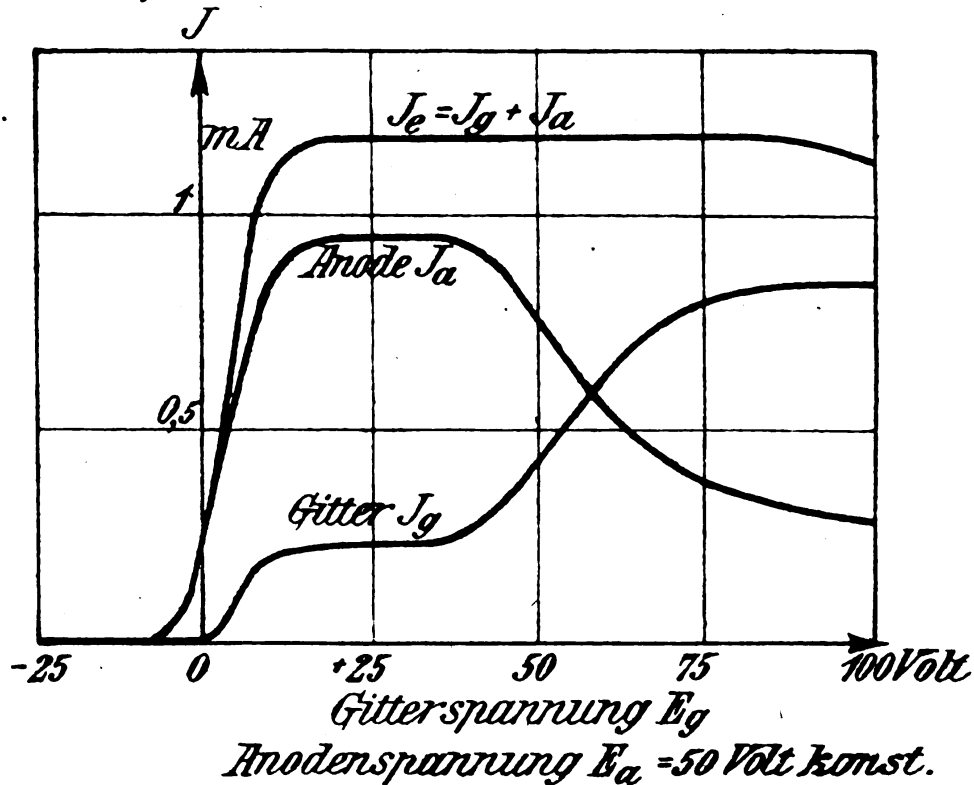


Fig. 2.

zwar ergibt sich praktisch, daß man die ganzen bisherigen Betrachtungen auf die Gitterröhre ohne weiteres übertragen kann, wenn man statt der früheren Spannung  $E$  die sogenannte Steuerspannung  $E_s = E_g + DE_a$  einführt. Z. B. ergibt sich für die zylindrische Anordnung der die Charakteristik bestimmende Raumladungstrom

$$J_e = 0,015 \frac{l}{r} E_s^{3/2} = 0,015 \frac{l}{r} (E_g + DE_a)^{3/2} \text{ Milliampere,} \quad (2)$$

wobei  $r$  der Abstand des Gitters vom Glühdraht ist. Die Formel gilt wieder nur so lange, wie die Steuerspannung  $E_s$  kleiner als die Sättigungsspannung bleibt. Wird  $E_s$  größer als  $E_a$ , so wird  $J_e$  unabhängig von der Höhe der Spannungen, nur abhängig von der Temperatur. Dabei ist es ganz gleichgültig, wie sich  $E_s$  aus  $E_g$  und  $E_a$  im einzelnen zusammensetzt.

Der „Durchgriff“  $D$  ist dabei eine praktisch nur von den Röhrenabmessungen abhängige Konstante. Er stellt ein Maß dafür dar, wie weit die Anodenspannung im Verhältnis zur Gitterspannung auf die Emission einwirkt.  $D = 0.1$  bedeutet z. B. daß eine Änderung von  $E_a$  um 10 Volt nur ebenso viel wirkt, wie eine Änderung von  $E_g$  um 1 Volt. Der Name ist gewählt, weil bei der üblichen Anordnung, bei der das Gitter zwischen Anode und Glühdraht liegt, die Anodenspannung gewissermaßen durch die Gitterlöcher durchgreift. Doch gilt die Beziehung auch dann, wenn das Gitter durch eine Platte auf der entgegengesetzten Seite des Glühdrahtes gebildet wird, eine Anordnung, die sich prinzipiell weder in der Steuerwirkung, noch in der Stromverteilung von der normalen unterscheidet. Nur die Größenordnungen sind anders, der Gitterstrom infolge der großen Gitterfläche größer und besonders der Durchgriff sehr groß; bei gleichem Abstände beider Platten würde ja  $D = 1$  werden und selbst durch große Unterschiede im Abstand läßt sich  $D$  kaum unter 0,3 herunterdrücken, während für normal Gitterröhren  $D$  durch ein enges Gitter auf 0,01 und weniger heruntergebracht werden kann.

Der Durchgriff  $D$  ist nur angenähert eine Konstante. Nimmt man die Abhängigkeit des Emissionsstromes von der Gitterspannung bei zwei verschiedenen Anodenspannungen  $E_a$  und  $E_a'$  auf, so sollte man nach der Formel eine einfache foringetreue Parallelverschiebung der Charakteristik um  $D(E_a - E_a')$  erhalten. Praktisch findet man aber zuweilen auch eine geringe Änderung der Form der Charakteristik. Bei manchen Röhren wird der Abstand beider Charakteristiken nach oben hin größer, bei manchen kleiner. Doch kann man für Überschlagsrechnungen wohl immer mit einem konstanten Durchgriff rechnen. Eine gute Prüfung dafür ist die auch experimentell bestätigte Folgerung, daß man eine gleichgeformte Charakteristik nur in einem im Verhältnis  $1:D$  vergrößerten Maßstab für die Spannung erhalten muß, wenn man die Abhängigkeit der Emission von der Anodenspannung bei konstanter Gitterspannung aufnimmt.

Für Röhren mit zwei hintereinander liegenden Gittern, wie sie für Verstärkerzwecke von Vorteil sind, läßt sich in analoger Weise

eine Formel

$$J_0 = CE_a^2 = C[F_{g1} + D_g(F_{g2} + D_a E_a)]^2 \quad (2'')$$

aufstellen. Man kann durch solche Doppelgitter die Wirkung der Anodenspannung  $E_a$  also sehr weitgehend herabsetzen, da sie mit dem Faktor  $D_g \cdot D_a$  eingeht. Ist z. B.  $D_g = D_a = 1/50$ , so wird

$$D_g \cdot D_a = 1/2500.$$

## II. Verstärkung schwacher Wechselströme.

Das Problem, ganz schwache Wechselströme, die an sich mit dem Telephon oder einem sonstigen Indikator nicht mehr nachzuweisen wären, sich also völlig unserer Kenntnis entziehen würden, soweit zu verstärken, daß sie deutlich wahrnehmbar werden, hat praktisch für die ganze Nachrichtenübermittlung und auch sonst die allergrößte Bedeutung. Da ein 1000 Ohm-Telephon bei  $10^{-5}$  Ampere schon recht deutlich tönt, so ist eine verstärkte Leistung von  $10^{-6}$  Watt für die meisten Zwecke ausreichend, und es kommt darauf an, eine solche Leistung mit einer möglichst geringen Anfangsleistung zu erzeugen. Das ist nun in der Tat mit Hilfe der Verstärkerröhren in weitgehendstem Maße gelungen.

### A. Die Verstärkertheorie bei verschwindendem Gitterstrom.

1. Das Problem. Eine Verstärkerröhre (Fig. 3) besteht aus einer elektrisch geheizten Kathode  $K$ , aus der Anode  $A$  und dem Gitter  $G$ , das meist zwischen beiden angebracht ist. Die Wirkung der Röhre beruht darauf, daß eine Änderung der Gitterspannung eine Änderung des aus der Glühkathode austretenden Elektronenstroms und damit auch eine Änderung des Anodenstroms hervorruft. Der schwache Strom wird dem Gitter meist über einen Transformator  $Tr_g$  zugeführt, der verstärkte meist ebenfalls über einen Transformator  $Tr_a$  von der Anode abgenommen.

Nun gibt es ein einfaches Mittel, den am Gitter erforderlichen Leistungsaufwand praktisch vollkommen zu Null zu machen. Man braucht nur dem Gitter eine solche negative Gleichstromvorspannung zu geben, daß die Spannung auch bei Überlagerung der Wechselspannung stets kleiner als etwa  $-1$  Volt bleibt. Dann können nach dem dritten Grundgesetze keine Elektronen von der Glühkathode zum Gitter gelangen, und da bei gutem Vakuum die Elektronen den einzig möglichen Strom bilden, kann das Gitter keinen Strom aufnehmen.



von der Amplitude  $\mathfrak{I}_a = 0,2 \text{ mA}$ . Dieser überlagert sich dem Gleichstrom und kann z. B. durch einen Transformator von diesem getrennt weiter geleitet werden. Maßgebend für den Verstärkungsgrad ist die „Steilheit“  $S$  der Charakteristik.

$$\text{Steilheit} = \bar{S} = \left( \frac{\partial i_a}{\partial e_g} \right)_{e_a} = \text{tg} \alpha$$

In dem obigen Beispiel ist  $S = \frac{0,2 \cdot 10^{-3}}{2} = 10^{-4} \text{ Amp./Volt}$ .

Die Steilheit hat die Dimension eines Leitwerts oder reziproken Widerstands. Sie hängt einerseits von der Röhrenkonstruktion ab,

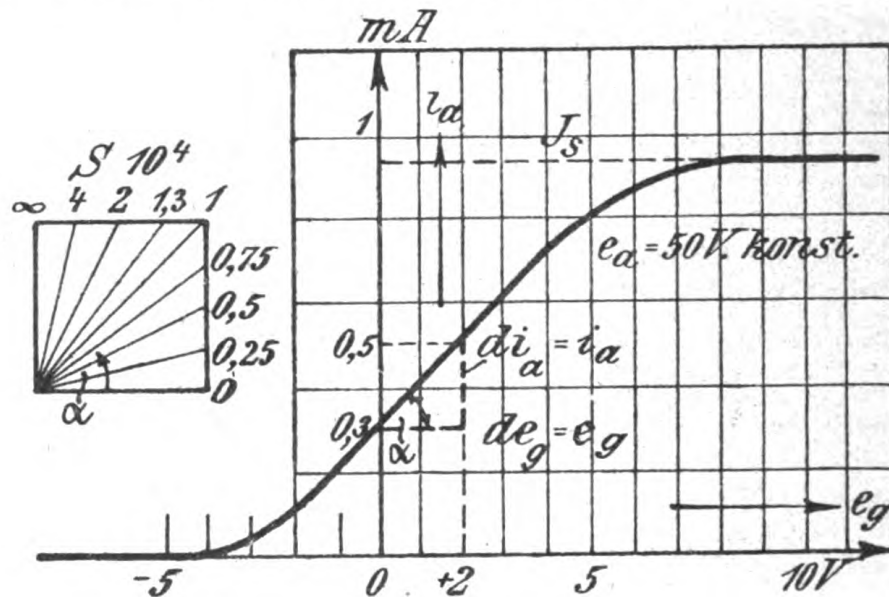


Fig. 4.

ist z. B. für die zylindrische Anordnung gemäß Gleichung (2') um so größer, je länger der Glühdraht ist und je dichter das Gitter den Glühdraht umgibt. Andererseits ist  $S$  aber auch abhängig von dem Punkte der Charakteristik, auf dem man arbeitet.  $S$  pflegt etwa in der Mitte der Charakteristik, wo der Strom gleich dem halben Sättigungsstrom wird, am größten zu sein. Nähert man sich dem Strom 0 oder auf der anderen Seite dem Sättigungsstrom  $I_s$ , so wird  $S$  kleiner. Schließlich wird da, wo die Kurve horizontal verläuft (bei  $i_a = 0$  und bei  $i_a = I_s$ ) die Steilheit  $S = 0$ , d. h. es treten bei Schwankungen der Gitterspannung überhaupt keine Stromschwankungen mehr auf, der

erzeugte sich überlagernde Wechselstrom wird gleich Null. Bedingung für eine gute Verstärkung ist also, daß an einem Punkte der Charakteristik gearbeitet wird, wo ihre Steilheit groß ist.

3. Innerer Widerstand  $R_i$ . Die Charakteristik (Fig. 4) ist bei konstanter Anodenspannung  $e_a$  aufgenommen. Sie stellt daher die Beziehung zwischen  $e_g$  und  $i_a$  nur richtig dar, wenn die Anodenspannung  $e_a$  konstant bleibt. Das trifft bei einer Änderung der Gitterspannung nur dann zu, wenn die Anode direkt an die Batterie angeschlossen ist. Liegt aber in der Anodenleitung ein Apparat, z. B. ein Transformator mit dem Wechselwiderstand  $\mathfrak{R}_a$ , so wird, wenn der Anodenstrom um  $di_a$  steigt, in dem Widerstand  $\mathfrak{R}_a$  ein erhöhter Spannungsabfall eintreten, d. h. die Anodenspannung wird um

$$de_a = -di_a \mathfrak{R}_a$$

sinken. Das bewirkt aber rückwärts ein Sinken des aus der Kathode austretenden Elektronenstroms, da dieser ja nicht nur von der Gitterspannung, sondern auch von der Anodenspannung beeinflusst wird. Die Stromänderung wird daher bei einem Widerstand  $\mathfrak{R}_a$  in der Anodenleitung nicht den vollen aus der Charakteristik (für konstantes  $e_a$ ) entnommenen Wert erreichen, und zwar um so weniger, je stärker der Anodenstrom sich mit der Anodenspannung ändert, d. h. je größer  $\frac{\partial i_a}{\partial e_a}$

ist. Mathematisch drückt sich dies folgendermaßen aus: Der Strom  $i_a$  ändert sich einerseits durch Änderung von  $e_g$  auch wenn  $e_a$  konstant bleibt, andererseits durch Änderung von  $e_a$  wenn  $e_g$  konstant bleibt. Bei kleinen Änderungen überlagern sich beide Einflüsse einfach. Also:

$$di_a = \left(\frac{\partial i_a}{\partial e_g}\right) de_g + \left(\frac{\partial i_a}{\partial e_a}\right) de_a = S de_g - \frac{1}{R_i} di_a \mathfrak{R}_a$$

und daraus

$$di_a = \frac{S}{1 + \frac{\mathfrak{R}_a}{R_i}} de_g \quad 1)$$

d. h. die Stromänderung wird durch den äußeren Widerstand  $R_a$  im Verhältnis  $1 : \left(1 + \frac{\mathfrak{R}_a}{R_i}\right)$  verkleinert. Hierbei ist

$$R_i = \frac{1}{\left(\frac{\partial i_a}{\partial e_a}\right) e_g} = \left(\frac{\partial e_a}{\partial i_a}\right) e_g$$

1) Ähnliche Rechnungen sind von Latour und Vallauri durchgeführt. Vgl. Jahrbuch, Bd. 12, S. 280 und 349.

der scheinbare „innere Widerstand“ der Röhre gegen Stromschwankungen. Diese Größe ist zwar physikalisch kein gewöhnlicher Ohmscher Widerstand, verhält sich aber gegenüber schwachen Wechsel-

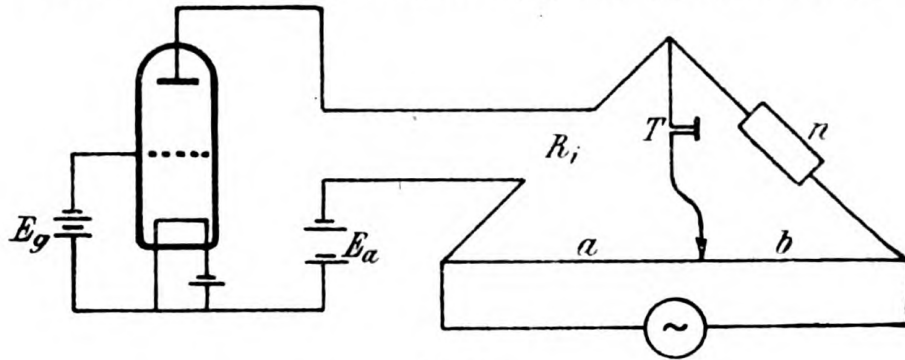


Fig. 5.

strömen genau so. Er läßt sich wie jeder andere Wechselstromwiderstand in der Wheatstoneschen Brücke messen etwa wie in Fig. 5 veranschaulicht. Man kann ihn auch aus der Steilheit der Anodenstromkennlinie entnehmen, der Kurve, die die Abhängigkeit des Anoden-

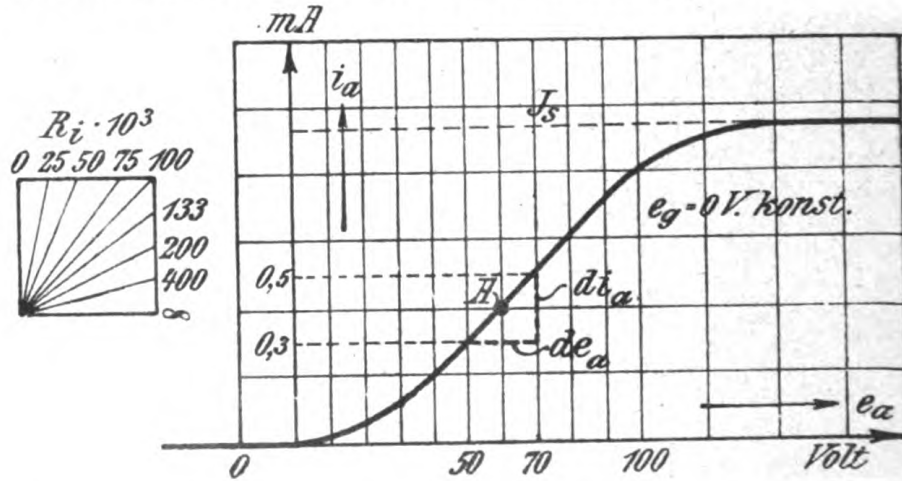


Fig. 6.

stroms von der Anodenspannung bei konstanter Gitterspannung darstellt. Aus Fig. 6 ergibt sich z. B. für den Arbeitspunkt A:  $\partial i_a = 0,2 \cdot 10^{-4} \text{ A}$ ;  $\partial e_a = 20 \text{ Volt}$ , also

$$R_i = \frac{20}{2 \cdot 10^{-4}} = 100\,000 \text{ Ohm}$$

Der Widerstand ist von dem Punkte  $A$  auf dieser Kurve abhängig, an dem gearbeitet wird; er ist um so größer, je flacher die Kurve dort verläuft, ist also an der steilsten Stelle etwa in der Mitte am kleinsten, wird nach beiden Seiten zu immer größer und schließlich in den horizontalen Gebieten unendlich groß. Es sei bemerkt, daß die Messung in der Wheatstoneschen Brücke gemäß Fig. 5 dies Ergebnis durchaus bestätigt. Den Arbeitspunkt auf der Kurve kann man während der Messung durch Regulieren der Spannungen  $E_a$  und  $E_g$  leicht verschieben und findet dann in der Tat einen Widerstand, der immer der reziproken Steilheit an der betreffenden Stelle der Kurve gleich ist. Man muß bei der Messung nur darauf achten, daß die Wechselspannung so klein bleibt, daß die Kurve in dem überdeckten Gebiet als geradlinig angenommen werden kann, etwa unter 0,5 Volt bleibt. — Man findet  $R_i$  bei Tonfrequenzen, wie zu erwarten, als reinen Ohmschen Widerstand, da ja eine Phasenverschiebung nur durch eine Trägheit des Elektronenstroms hervorgerufen werden könnte, die selbst bei den Frequenzen der drahtlosen Telegraphie noch nicht merklich wird.

4. Beziehungen zum Durchgriff  $D$ . Es wurde im ersten Abschnitt bemerkt, daß die Anodenstromkennlinie (Fig. 6), die Abhängigkeit des  $i_a$  von  $e_a$ , im allgemeinen mit der Charakteristik, der Abhängigkeit des  $i_a$  von  $e_g$ , identisch ist, nur daß der Maßstab für  $e_a$  wie  $1/D$  vergrößert ist ( $D < 1$ ). Dabei bezeichnete  $D$  den Durchgriff, eine Größe, die von den Röhrenabmessungen, insbesondere von der Lochweite des Gitters abhängt, im übrigen aber praktisch konstant ist. Dann verhalten sich aber auch die Steilheiten der zwei Kurven wie  $1:D$  oder, da  $R_i$  gleich der reziproken Steilheit der  $e_a i_a$ -Kurve ist, so ist die Steilheit der Charakteristik

$$S = \frac{1}{D} \cdot \frac{1}{R_i}, \text{ also } S R_i D = 1 \text{ oder } R_i = \frac{1}{S D}$$

Der innere Widerstand  $R_i$  ist also umgekehrt proportional dem Durchgriff  $D$  und der Steilheit  $S$  und zahlenmäßig direkt gleich dem reziproken Produkte beider.

Für  $S = 10^{-4}$  Amp./Volt und  $D = 10\% = 0,1$  wird z. B.  $R_i = 100\,000$  Ohm.

Innerer Widerstand  $R_i$  und Durchgriff  $D$  sind beide ein Maß für die Rückwirkung der Anodenspannung auf den Anodenstrom. Ersterer stellt diese Rückwirkung unmittelbar dar, letzterer vergleicht sie mit der Wirkung der Gitterspannung, gibt also an, wievielfach die Anodenspannung schwächer als die Gitterspannung auf den Anodenstrom wirkt.

Dieser Zusammenhang kommt mathematisch zum Ausdruck durch die Formel

$$\left(\frac{\partial i_a}{\partial e_a}\right)_{e_g} = \left(\frac{\partial i_a}{\partial e_g}\right)_{e_a} \cdot \left(-\frac{\partial e_g}{\partial e_a}\right)_{i_a}$$

Das Glied links ist gleich  $\frac{1}{R_i}$ , die Faktoren rechts gleich  $S$  und  $D$ , so daß die Formel identisch ist mit  $\frac{1}{R_i} = SD$ .

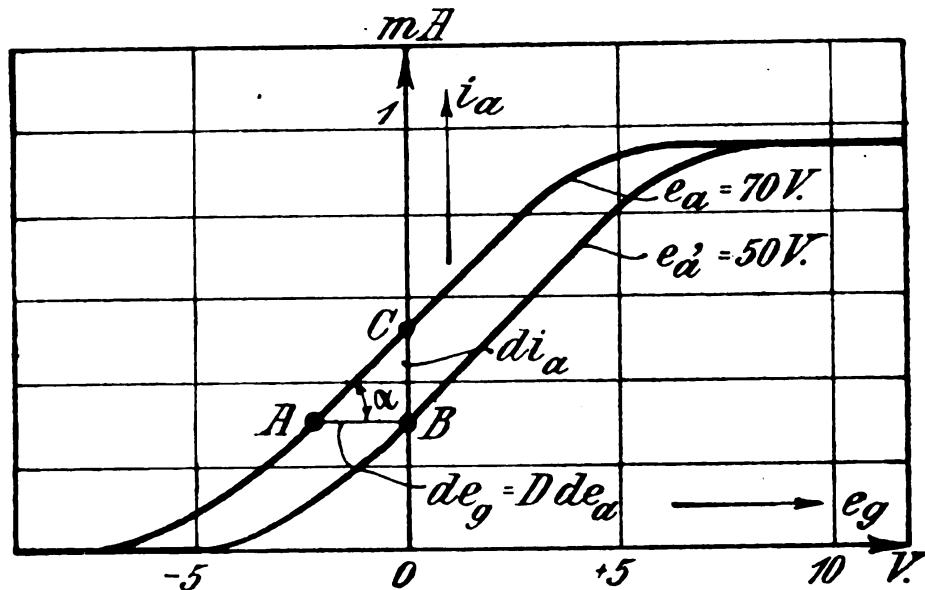


Fig. 7.

Dies läßt sich auch an Hand der Fig. 7 veranschaulichen, auf der zwei Charakteristiken für  $e_a = 70$  Volt und  $e_a' = 50$  Volt dargestellt sind. Aus dieser ergibt sich für das Arbeitsgebiet  $A, B, C$

$$S = \left(\frac{\partial i_a}{\partial e_g}\right)_{e_a} = \frac{BC}{AB} = \frac{0,2 \cdot 10^{-3}}{2} = 10^{-4} \text{ Amp./Volt}$$

$$D = -\left(\frac{\partial e_g}{\partial e_a}\right)_{i_a} = \frac{AB}{e_a - e_a'} = \frac{2}{20} = 0,1 = 10\%$$

$$\frac{1}{R_i} = \left(\frac{\partial i_a}{\partial e_a}\right)_{e_g} = \frac{BC}{e_a - e_a'} = \frac{0,2 \cdot 10^{-3}}{20} = \frac{1}{10^5} \text{ Ohm}$$

Man sieht, wie man durch eine Gleichstrommessung, die Aufnahme zweier Charakteristiken bei verschiedenen Anodenspannungen oder sogar

nur der drei Punkte  $A, B, C$  ohne weiteres für jeden Arbeitspunkt die Größen  $S, R_i$  und  $D$  findet, aus denen sich das ganze Verhalten der Röhre bei der Verstärkung schwacher Wechselströme ableiten läßt.

Diese Beziehungen sind rein mathematischer Art und daher für jeden Arbeitspunkt stets gültig. Die Tatsache, daß sich im allgemeinen nur  $S$  und  $R_i$  mit dem Arbeitspunkt ändern, während  $D$  für eine bestimmte Röhre eine konstante Größe ist, daß die beiden Charakteristiken der Fig. 7 also formgetreu nur um die Strecke  $AB$  verschoben sind, und in der Form mit der Kurve Fig. 6 übereinstimmen, läßt sich mathematisch natürlich nicht nachweisen und ist auch nur angenähert richtig.

5. Die Arbeitsweise der Röhre. Wenn also im Anodenstromkreis ein Widerstand  $\mathfrak{R}_a$  liegt, so ruft eine Änderung der Gitterspannung um  $de_g$  eine Änderung der Stromstärke  $di_a =$

$$-\frac{S}{1 + \frac{\mathfrak{R}_a}{R_i}} de_g$$

hervor. Ändert sich die Gitterspannung periodisch, d. h. überlagert sich der mittleren Spannung  $E_g$  eine Wechselspannung  $e_g$ , so wird sich dem Anodengleichstrom  $I_a$  auch ein Wechselstrom  $i_a$  überlagern, der

durch die Gleichung  $i_a = \frac{S}{1 + \frac{\mathfrak{R}_a}{R_i}} e_g$  bestimmt ist. Diese Gleichung

kann man auch schreiben

$$S R_i e_g = \frac{e_g}{D} = i_a (R_i + \mathfrak{R}_a)$$

Vergleichen wir dies mit der Gleichung eines Generators mit der E.M.K.  $e$  und dem inneren Widerstand  $R_i$

$$e = i(R_i + \mathfrak{R}_a)$$

so ergibt sich folgender wichtige Satz:

Wird dem Gitter eine Wechselspannung  $e_g$  zugeführt, so ist die Verstärkeröhre in bezug auf die Wechselstromvorgänge im Anodenkreis identisch mit einem Generator von der elektromotorischen Kraft  $e = \frac{e_g}{D}$  und dem inneren

Widerstand  $R_i = \frac{1}{SD}$ , der auf ein beliebiges äußeres System mit dem Widerstande  $\mathfrak{R}_a$  arbeitet<sup>1)</sup>. Hierdurch ist das gesamte

1) Einen entsprechenden Satz hat nach privater Mitteilung schon vor mir Herr Dr Schottky aufgestellt.

Verhalten der Röhre in einfachster Weise gekennzeichnet. Bei Kurzschluß, d. h.  $\mathfrak{R}_a = 0$  erhält man den Kurzschlußstrom

$$i_a = \frac{e}{R_i} = \frac{e_g}{D R_i} = S e_g$$

Das ist die aus der Charakteristik bei konstanter Anodenspannung unmittelbar abzulesende Gleichung. In der Tat liegt ja für  $\mathfrak{R}_a = 0$  die konstante Batteriespannung  $E_a$  unmittelbar an der Anode, es treten keine Spannungsschwankungen  $e_a = i_a \mathfrak{R}_a$  auf.

Bei Leerlauf, d. h. wenn der Wechselstrom  $i_a = 0$  wird, wenn also ein sehr großer Widerstand ( $\mathfrak{R}_a = \infty$ ), etwa eine große Drosselspule im Anodenkreis liegt, wird die Klemmenspannung  $e_a = \frac{e_g}{D}$ , d. h.

gleich der E.M.K. Die Anodenwechselspannung ist in diesem Falle das  $1/D$ fache der am Gitter liegenden Wechselspannung, z. B. für  $D = 0,1$  das 10fache, für  $D = 0,01$  das 100fache. Man erhält also bei kleinem Durchgriff  $D$  eine sehr erheblich verstärkte Wechselspannung an der Anode; nur ist gerade dann die Voraussetzung, daß  $\mathfrak{R}_a$  groß gegen  $R_i$  sein muß, praktisch nicht leicht zu erfüllen, da  $R_i$  auch wie  $1/D$  anwächst, bei kleinem  $D$  also sehr groß wird.

Bei einer Belastung mit einem Widerstand  $\mathfrak{R}_a$  wird der Strom

$$i_a = \frac{e_g}{D(R_i + \mathfrak{R}_a)}$$

und die Klemmenspannung sinkt auf

$$e_a = \frac{e_g}{D} - i_a R_i = \frac{e_g}{D} \frac{\mathfrak{R}_a}{R_i + \mathfrak{R}_a}$$

Dabei kann der äußere „Widerstand“  $\mathfrak{R}_a$  auch induktiv oder kapazitiv sein, überhaupt aus ganz beliebig geschalteten Apparaten bestehen. Es sind dann nur  $R_i$  und  $\mathfrak{R}_a$  nicht mehr in Phase und die Amplituden  $\mathfrak{I}_a$  und  $\mathfrak{E}_a$  nach bekannten Regeln vektoriell zusammenzusetzen.

Bei Belastung durch eine Spule mit dem Wechselwiderstand  $\mathfrak{R}_a = \sqrt{R_a^2 + \omega^2 L_a^2}$  wird z. B.

$$\mathfrak{I}_a = \frac{\mathfrak{E}_g}{D} \cdot \frac{1}{\sqrt{(R_i + R_a)^2 + \omega^2 L_a^2}}; \quad \text{tg } \varphi = \frac{\omega L_a}{R_i + R_a}$$

6. Güte der Röhre. Die an die Spule abgegebene Leistung wird dann

$$N_a = \frac{\mathfrak{I}_a^2 R_a}{2} = \frac{1}{2} \left( \frac{\mathfrak{E}_g}{D} \right)^2 \frac{R_a}{(R_i + R_a)^2 + \omega^2 L_a^2}$$

Sie wird ein Maximum bei induktionsfreier Belastung durch einen Widerstand  $R_a$ , der gleich dem inneren Widerstand  $R_i$  ist, nämlich

$$N_{a \max.} = \frac{\mathcal{E}_g^2}{8 D^2 R_i} = \frac{\mathcal{E}_{g \text{ eff.}}^2}{4 D^2 R_i}$$

Das Verhältnis

$$\frac{4 N_{a \max.}}{\mathcal{E}_{g \text{ eff.}}^2} = \frac{1}{D^2 R_i} = S^2 R_i = \frac{S}{D} = G_r$$

wird zweckmäßig als „Güte der Röhre“ bezeichnet. Es ist gleich der vierfachen von der Röhre maximal abzugebenden Wechselstromleistung  $N_a$  in Watt, wenn dem Gitter eine Wechselspannung  $\mathcal{E}_{g \text{ eff.}}$  von 1 Volt zugeführt wird. Für  $S = 10^{-4}$  und  $D = 0,1 = 10^0/0$  wird z. B.  $G_r = 10^{-3} = 1/1000$  Watt/Volt<sup>2</sup>, d. h. bei 1 Volt am Gitter kann die Röhre an der Anodenseite maximal 1/4000 Watt Wechselstromenergie abgeben, bei 0,1 Volt nur noch 1/400 000 Watt. Daß im Nenner die Spannung quadratisch eingeht, rührt daher, daß sich beim Vermindern der Gitterspannung sowohl Spannung wie Stromstärke in der Anodenseite vermindern, die Leistung also quadratisch abnimmt.

Die Güte der Röhre ist maßgebend für die maximal mit der Röhre erreichbare Verstärkung. Es ist daher wichtig sich zu merken, daß die Güte der Röhre um so größer ist, je steiler die Charakteristik verläuft und je kleiner der Durchgriff der Röhre ist. Ersteres ist ohne weiteres verständlich. Letzteres beruht darauf, daß der Durchgriff die Anodenrückwirkung darstellt, die ja vermindern auf den Anodenwechselstrom einwirkt.

7. Anodenbatterie. Durch die beiden Bedingungen, daß erstens das Arbeitsgebiet an einer möglichst steilen Stelle der Charakteristik liegen soll und zweitens das Gitter eine negative Vorspannung  $E_g$  von etwa  $-1$  Volt haben muß, wird die Größe der Anodenbatterie vollständig festgelegt.

Die Anodenspannung  $E_a$  muß nämlich so groß sein, daß die durch sie bewirkte Verschiebung der Charakteristik um  $D E_a$  eine steile Stelle der Charakteristik in das Gebiet von 1 Volt negativer Gitterspannung bringt.

Fig. 8 veranschaulicht diese Verhältnisse. Bei der Anodenspannung  $E_a = 0$  fängt die Charakteristik erst vom Nullpunkt der Gitterspannung  $E_g$  aus zu steigen an. Im Arbeitspunkt  $A$  bei  $E_g = -1$  Volt würde also keine Verstärkerwirkung eintreten. Erhöht man die Anodenspannung auf 50 Volt, so verschiebt sich bei einem Durchgriff von

10% die Charakteristik um  $DE_a = 50 \cdot 0,1 = 5$  Volt nach links. Dadurch kommt die Charakteristik gerade in die richtige Lage, da der Arbeitspunkt  $A'$  jetzt nahezu an der steilsten Stelle der Charakteristik liegt. Würde man die Anodenspannung auf 100 Volt steigern, würde sich die Charakteristik nochmals um 5 Volt verschieben; dann läge der Arbeitspunkt  $A''$  schon in dem Sättigungsgebiet, wo die Charakteristik wieder flacher verläuft, die Verstärkung also wieder geringer wird. Der Versuch läßt sich an jedem Verstärker leicht ausführen. Man

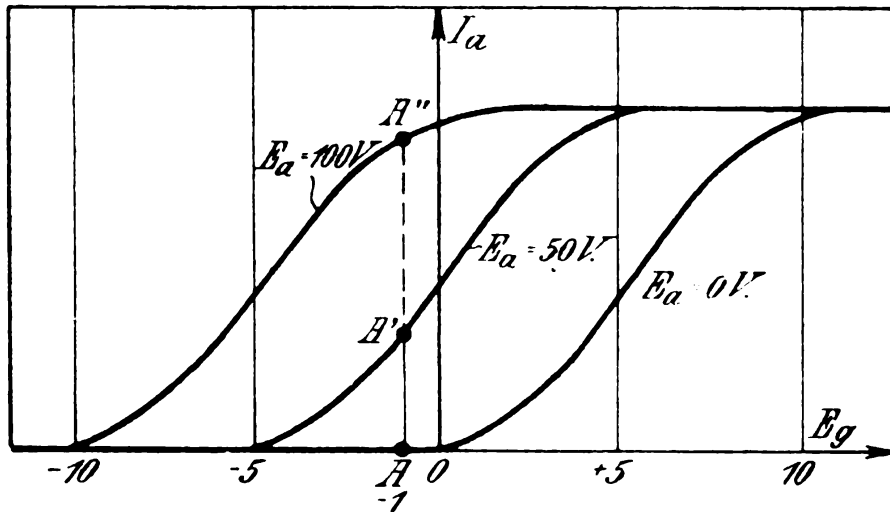


Fig. 8.

findet dann bei Steigerung der Batteriespannung in der Tat, daß die Verstärkung anfangs null ist, dann ein Maximum erreicht und schließlich wieder bis auf Null sinkt, genau dem Verlauf der Steilheit der Charakteristik entsprechend. Der Versuch gelingt besonders leicht bei schwacher Heizung des Glühfadens. Bei starker Heizung tritt die Sättigung, das Umbiegen der Charakteristik erst spät ein und man muß recht hohe Anodenspannungen anwenden, um sie bei  $-1$  Volt Gitterspannung zu erreichen.

8. Richtlinien für die Röhrenkonstruktion. Im allgemeinen ist die Form der Charakteristik durch die Anordnung von Glühfaden und Gitter gegeben, wie im ersten Abschnitt gezeigt wurde. Es kommt besonders darauf an, das Gitter recht nahe an den Glühfaden zu bringen, weil dadurch einerseits die Steilheit der Charakteristik vergrößert wird, andererseits die steilste Stelle näher an den Nullpunkt rückt. Es ist dann auch nur eine geringere „Verschie-

nungsspannung“ erforderlich, um diese Stelle in das Arbeitsgebiet bei  $-1$  Volt Gitterspannung zu verschieben. Bei gegebener Charakteristik ist auch die zweckmäßigste Verschiebungsspannung gegeben. In Fig. 8 liegt z. B. die steilste Stelle zwischen 4 und 6 Volt. Es ist also eine Verschiebungsspannung von 5 bis 7 Volt erforderlich, um die steilste Stelle auf  $-1$  Volt zu bringen. Es muß also das Produkt  $D E_a$  5 bis 7 Volt groß sein. Man hat dann noch die Wahl, entweder den Durchgriff  $D$ , die Löcher im Gitter, groß zu machen, so daß man mit kleiner Anodenbatterie  $E_a$  auskommt, oder  $D$  klein zu machen, und eine Batterie von höherer Spannung  $E_a$  zu verwenden. Letzteres hat den Vorteil, daß mit kleinerem  $D$  die Güte der Röhre  $G_r = \frac{S}{D}$  wächst.

Man kann daher geradezu sagen: Die Güte einer Röhre läßt sich proportional der aufgewandten Anodenspannung steigern, indem man  $D$  entsprechend kleiner wählen kann. Dabei ist freilich zu beachten, daß die Güte nur so lange ein Maß für die erzeugte Wechselstromleistung bleibt, als der äußere Widerstand gleich dem inneren gemacht wird. Es ist aber  $R_i = \frac{1}{SD}$ , d. h.

der innere Widerstand wächst umgekehrt proportional zu  $D$ , also in gleicher Weise, wie die Anodenspannung. Hohe Widerstände und besonders hohe Spannungen sind freilich in der Praxis nicht gern gesehen und man wird oft auf Kosten der Verstärkung die Spannung heruntersetzen, zumal wenn es sich um kleine transportable Apparate handelt.

9. Doppelgitterröhren<sup>1)</sup>. Die Vorteile kleinen Durchgriffs lassen sich mit den Annehmlichkeiten kleiner Anodenspannungen vereinigen, wenn man Doppelgitterröhren verwendet (Fig. 9). Für den Emissionsstrom gilt dann angenähert die Gleichung (vgl. Abschnitt I)

$$J_e = C E_a^{3/2} = C(E_{g_1} + D_g E_{g_2} + D_g \cdot D_a E_a)^{3/2}$$

Man legt nun wie bei Einfachgitterröhren an das erste Gitter  $G_1$  den zu verstärkenden Strom und gibt ihm eine geringe negative Vorspannung  $E_{g_1}$ . Das zweite Gitter  $G_2$ , das man auch Voranode nennen könnte, dient nur dazu, die erforderliche Verschiebung der Charakteristik herzustellen und zwar wählt man den Durchgriff  $D_g$ , die Löcher im ersten Gitter, sehr groß, so daß man mit einer kleinen Spannung

1) Solche Röhren sind zuerst von Schottky vorgeschlagen und ausgeführt worden. Es scheint, daß etwa gleichzeitig in Amerika solche Röhren aufgekommen sind.



so groß, so daß es schwer wird, die Güte durch einen gleich großen äußeren Widerstand voll auszunutzen.

Man kann Doppelgitterröhren auch in einer anderen Schaltung verwenden (Fig. 10). Hier dient das zweite Gitter als Steuergitter. Es ist wie bei Einfachröhren schwach negativ vorgespannt und erhält den unverstärkten Strom; die Anode leitet den verstärkten Strom ab.

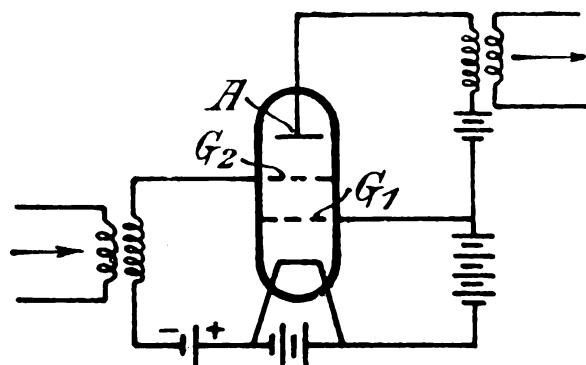


Fig. 10.

Das erste Gitter dagegen, das man zweckmäßig als „Vorgitter“ bezeichnet, liegt unmittelbar an einer positiven Spannung. Diese ist so groß, daß der Emissionsstrom nahezu gesättigt ist, also etwa 10 Volt groß. Die Elektronen fliegen dann durch das erste Gitter hindurch und bilden eine Raumladung zwischen erstem und zweitem Gitter. Bei stark negativem zweitem Gitter werden sie wieder zurückgestoßen, freilich nur zum kleinen Teil zum Glühdraht; fast der ganze Strom geht dann zum ersten, positiven Gitter. Bei schwach negativem zweitem Gitter mit dahinter liegender durchgreifender positiver Anode werden sie dagegen zur Anode gezogen. Zweites Gitter und Anode spielen etwa dieselbe Rolle, wie Gitter und Anode bei der Einfachgitterröhre. Nur werden die Raumladungen durch das erste Gitter aus der unmittelbaren Nähe des dünnen Glühdrahtes, wo sie schwer zu beeinflussen sind, entfernt und auf einen größeren Radius verteilt; sie lassen sich dann leichter steuern, man erhält eine größere Steilheit der Charakteristik und braucht eine kleinere Verschiebungsspannung. Bei hinreichend großem Durchgriff des zweiten Gitters genügt schon eine sehr geringe Anodenspannung, so daß man sogar Anode und erstes Gitter an dieselbe Spannung legen kann. Zweckmäßiger wählt man aber die Anodenspannung höher, da sonst das erste Gitter zu viel Strom ver-

schluckt. Der praktische Vorteil dieser Anordnung mit Vorgitter gegenüber der erst genannten mit Voranode besteht darin, daß der innere Widerstand der Röhre nicht so groß wird, im Gegenteil infolge größerer Steilheit und kleineren Durchgriffs sogar verringert wird. Doch lassen sich hier allgemeine Angaben nur schwer machen, da die Verteilung der Raumladungen und die Ungleichförmigkeit des Feldes bei großem Durchgriff, also großen Löchern in den Gittern, die Verhältnisse verschieben. Es hat sich praktisch gezeigt, daß Doppelgitterröhren besonders geeignet sind, wenn es auf kleine Anodenspannungen ankommt. Man erreicht etwa die gleiche Güte mit 10 Volt wie bei Einfachgitterröhren für 100 Volt. Umgekehrt ist bei gleichen Anodenspannungen die Güte der Doppelgitterröhren etwa 10 fach überlegen; man erreicht mit ihnen eine  $\sqrt{10}$ , d. h. rund 3 mal größere Verstärkung als mit Einfachgitterröhren.

Natürlich kann man auch Röhren mit 3 Gittern herstellen, von denen das erste als Vorgitter, das zweite als eigentliches Steuergitter und das dritte als Voranode wirkt. Das bedeutet elektrisch noch einen weiteren Fortschritt, der aber durch die konstruktiven Nachteile wohl im allgemeinen aufgewogen wird.

#### Zusammenfassung.

1. Das Gitter muß eine schwach negative Gleichspannung erhalten, dann ist sein Strom- und Energieverbrauch Null.
2. Für das gesamte elektrische Verhalten der Verstärkerröhre sind dann nur zwei Größen: Steilheit und Durchgriff, maßgebend
3. Die Steilheit ist um so größer, je näher das Gitter dem Glühdraht liegt.
4. Der Durchgriff ist um so größer, je größer die Löcher im Gitter sind.
5. Die wirksame E.M.K. für den Anodenstrom ist gleich der Gitterwechselspannung dividiert durch den Durchgriff.
6. Der innere Widerstand dieser E.M.K. ist gleich dem reziproken Produkt aus Steilheit mal Durchgriff.
7. Der äußere Widerstand ist möglichst gleich dem inneren zu machen.
8. Sehr hohe äußere Widerstände sind praktisch schwer herzustellen und erhöhen die Neigung zum Pfeifen und sonstigen Störungen. Daher kleinerer innerer Widerstand (größerer Durchgriff) erwünscht.
9. Die „Güte“ der Röhre ist gleich der Steilheit dividiert durch den Durchgriff.

10. Durchgriff mal Anodenspannung muß gleich der Verschiebungsspannung gemacht werden, die erforderlich ist, um die steilste Stelle der Charakteristik in das Gebiet negativer Gitterspannung zu verschieben.

11. Die Anodenspannung ist daher dem Durchgriff umgekehrt proportional.

12. Steilheit, Durchgriff und innerer Widerstand lassen sich für jede Röhre durch eine einfache Gleichstrommessung bestimmen. Die umständlicheren Wechselstrommessungen ergeben die gleichen Werte.

13. Durch Doppelgitterröhren, die in zweierlei Schaltungen verwendbar sind, läßt sich die Güte der Röhren etwa verzehnfachen.

(Fortsetzung folgt.)

Dresden, Institut für Schwachstromtechnik.

---

## Das Dynatron, eine Vakuumröhre mit der Eigenschaft des negativen elektrischen Widerstandes.

Von **Albert W. Hull** (Untersuchungs-Laboratorium der General Electric Company in Schenectady, New York).

### 1. Erklärung.

Das Dynatron gehört zu der mit dem Namen Kenotron<sup>1)</sup> bezeichneten Art von Hochvakuumröhren mit Glühkathode, die in dem Untersuchungslaboratorium entworfen worden sind. Zwei Vertreter dieser Röhrenart, der Kenotron-Gleichrichter und das Pliotron sind bereits in den Proceedings of the Institute of Radio Engineers und zwar im Septemberheft 1915 beschrieben worden. Das grundlegende Kennzeichen des Kenotrons besteht darin, daß seine Wirkung in keiner Weise auf der Gegenwart von Gasen in der Röhre beruht.

In seiner Bauart ähnelt das Dynatron dem Kenotron-Gleichrichter und dem Pliotron. Im Grundgedanken und in der Wirkungsweise sind diese drei jedoch grundsätzlich voneinander verschieden. Jede dieser

---

1) Über die sprachliche Herleitung der Bezeichnungen Kenotron und Pliotron vgl. Jahrb. 10, 528—529.