Inneren gebundene Gas zu entfernen. Das geschieht teils durch Gasflammen von außen, teils durch die unmittelbar ins Innere einwirkende Hochfrequenzheizung, teils durch Einschalten der erforderlichenfalls erhöhten Heiz- und Anodenspannungen, die die Röhren im Betriebe brauchen.

Bei großen Senderöhren können im Betriebe besonders bei zu starker Überhitzung trotzdem noch Gasausbrüche vorkommen, die bei der hohen Spannung sofort zu einer Lichtbogenbildung führen und die Röhren in kürzester Zeit zerstören würden. Dadurch, daß man die hohe Betriebsspannung durch gittergesteuerte Gleichrichter erzeugt, kann man erreichen, daß die Spannung bei eintretendem Lichtbogen so schnell abgeschaltet wird, daß noch keine Schäden entstanden sind. Der durch den Lichtbogen gebildete Metalldampf hat aber auch eine Getterwirkung, so daß die Röhre nach dem Erlöschen des Lichtbogens meistens wieder ein gutes Vakuum besitzt und sofort wieder eingeschaltet werden kann. Es genügt, die Betriebsspannung nur 0,2 s lang auszuschalten. Dann macht sich eine solche Störung beispielsweise im Betriebe eines Rundfunksenders, abgesehen von einem kleinen Knack, oft überhaupt nicht bemerkbar!

2. Röhren ohne Gitter (Dioden)

§ 3. Elektronenaustritt aus glühenden Leitern[1])

a) Theorie. Ein gutes Vakuum ist an sich der vollkommenste „Nichtleiter", denn es erfolgt selbst bei den höchsten Spannungen keinerlei Stromdurchgang. Im guten Vakuum sind keine Elektrizitätsträger mehr vorhanden, und da aus kalten Metallen, abgesehen von außergewöhnlichen Verhältnissen (Feldstärken von 10^7 V/cm an der Metalloberfläche; vgl. später), auch keine austreten können, isolieren diese Röhren im Inneren so gut, daß sie bei Steigerung der Spannungen eher außen über die Zuleitungen durchschlagen als innen.

Erhitzt man aber ein Metall auf eine hohe Temperatur, so können aus ihm auch im höchsten Vakuum Elektronen austreten und diese, das Vakuum durchfliegend, einen elektrischen Strom bilden. Nach der Elektronentheorie der Metalle, die in ihrer Grundlage mit der

[1]) Vgl. auch das Buch von Herrmann und Wagener „Die Oxydkathode" 1. u. 2. Teil, J. A. Barth 1948 u. 1950.

kinetischen Gastheorie übereinstimmt, hat man sich die folgende, durch zahlreiche Versuche gut bestätigte Vorstellung gebildet.[1])

In metallischen Leitern bewegt sich eine große Zahl z_0 von Elektronen zwischen den unbeweglichen Metallmolekülen dauernd wirr durcheinander hin und her. Sie besitzen dabei alle möglichen Geschwindigkeiten v, die sich aber um eine mittlere Geschwindigkeitsgröße v_T nach den Gesetzen der Wahrscheinlichkeit gruppieren:

$$(3,1) \qquad z = z_0\, e^{-\left(\frac{v}{v_T}\right)^2} \qquad e = 2{,}718$$

(Wahrscheinlichkeitsgesetz von Maxwell),

z_0 ist die Zahl aller Elektronen, z die Zahl der Elektronen, die eine Geschwindigkeit größer als v haben. Geschwindigkeiten, die wesentlich größer als v_T sind, sind hiernach sehr unwahrscheinlich, sind nur in sehr kleiner Zahl z vertreten. Die kinetische Energie dieser Elektronenbewegung bildet den Wärmeinhalt der Metalle. Das wird durch die Gleichung[2])

$$(3,2) \qquad \frac{m v_T^2}{2} = kT$$

(T = absolute Temperatur in °K, $k = 1{,}37 \cdot 10^{-16}$ Erg/Grad = Boltzmannsche Gaskonstante bezogen auf ein Molekül) ausgedrückt, aus der sich z. B. für $T = 1000$ °K (= 727 °C) die mittlere Geschwindigkeit $v_T = 173 \cdot 10^5$ cm/s = 173 km/s berechnet. Nach (**1**,7) in § **1**b kann man diese Geschwindigkeit auch in Volt ausdrücken und erhält so die

$$(3,3) \qquad \text{„}\textit{Temperaturspannung}\text{“} \; E_T = \frac{T}{11600} = 8{,}6 \cdot 10^{-5}\, T.$$

Für $T = 1160$ °K ($\approx$ rotglühende Oxydkatode) ergibt sich z. B. $E_T = 0{,}1$ V, für $T = 2320$ °K ($\approx$ weißglühende Wolframkatode) $E_T = 0{,}2$ V. Nach dieser Vorstellung ist eine Temperaturerhöhung des Metalls nur ein anderer Ausdruck dafür, daß sich die Temperatur-

---

[1]) Vorzügliche Bestätigungen dieser Vorstellung sind unter anderen der exponentielle Verlauf des Anlaufstromes (vgl. § 4) und besonders das Wärmegeräusch und der Schroteffekt (vgl. Band 2, § **33**). Neuere Theorien von Fermi, Pauli und Sommerfeld gehen von etwas anderen Voraussetzungen aus, führen aber in den hier in Betracht kommenden Fällen zu denselben Ergebnissen.

[2]) Es ist hier unter v_T die mittlere Geschwindigkeitskomponente in einer bestimmten Richtung zu verstehen, die auch bei allen späteren Berechnungen allein in Betracht kommt.

spannung, d.h. die mittlere Geschwindigkeit der Elektronen im Metall erhöht hat.

An der Metalloberfläche werden die wirr hin- und herfliegenden Elektronen durch starke molekulare Anziehungskräfte zurückgehalten. (Im Innern heben sich diese Kräfte, weil nach allen Seiten gleich stark wirkend, gegenseitig auf.) Aus der Oberfläche können daher nur Elektronen austreten, die eine so große Geschwindigkeit besitzen, daß ihre kinetische Energie zur Überwindung der molekularen Anziehungskräfte ausreicht, ebenso wie ein Geschoß aus dem Anziehungsbereich der Erde nur dann in den freien Weltenraum hinausfliegen kann, wenn man ihm eine ganz bestimmte, theoretisch genau berechenbare Geschwindigkeit erteilt.

Die zum Austritt erforderliche Geschwindigkeit der Elektronen kann wieder in Volt ausgedrückt werden. Man nennt sie dann „*Austrittsarbeit*" E_0. Sie hängt vom Material ab. Für Wolfram ist $E_0 = 4{,}5$ V, für reines Thorium 3,3 V, für Wolfram mit einem nur ein Molekül dicken Überzug von Thorium merkwürdigerweise nur 2,6 V. Ebenso ist E_0 für reines Barium 2,1 V, dagegen für dünne Bariumschichten auf Wolfram nur 1,7 V, mit einer dünnen Zwischenschicht von Bariumoxyd sogar nur 1,1 bis 1,0 V. Vergleicht man diese Zahlen mit der durch (**3**,3) gegebenen Temperaturspannung, so sieht man, daß die mittleren Geschwindigkeiten, die man den Elektronen im Metall durch Steigerung der Temperatur praktisch erteilen kann, viel zu klein sind, um die Austrittsarbeit zu überwinden. Denn die Temperaturen sind dadurch begrenzt, daß die Metalle schmelzen oder in dem hohen Vakuum zu schnell verdampfen. E_T ist für die höchstmöglichen Temperaturen etwa 20mal kleiner als E_0. Es können daher nur die wenigen Elektronen austreten, deren Geschwindigkeit mehr als $\sqrt{20}$mal größer ist als die mittlere Temperaturgeschwindigkeit v_T. Die Wahrscheinlichkeit dafür ist nach (**3**,1)

$$e^{-\frac{E_0}{E_T}} \approx e^{-20} \approx 10^{-9},$$

d.h. unter je 10^9 Elektronen ist im Mittel nur eins, das die zum Austritt erforderliche Geschwindigkeit hat. Die Zahl der austretenden Elektronen vermindert also die 10^9mal größere Zahl der im Metall bleibenden Elektronen praktisch gar nicht. Auf die Dauer kehren aber stets ebensoviel Elektronen durch Leitung zum Metall zurück als aus ihm austreten. Denn sonst würden in kürzester Zeit freie Ladungen und ungeheure Kräfte zwischen den ausgetretenen negativen Elektronen und dem dann positiv geladenen Metall auftreten. Wegen der außerordentlich großen Elektronenzahl im Metall kann der winzige Bruchteil davon, der austritt, aber doch eine Stromstärke normaler Größe darstellen. Man erhält für diesen austretenden Strom in A je cm² Oberfläche

$$(3{,}4) \qquad \boldsymbol{I_s = 120\, T^2\, e^{-\frac{b}{T}} = 1{,}6 \cdot 10^{10} E_T^2 \cdot 10^{-0{,}43 \cdot \frac{E_0}{E_T}}\, \frac{A}{cm^2}}$$

Sättigungsstromgesetz gültig für $U > U_S$

Darin ist $b = 11\,600\, E_0$ die in Temperaturgraden, E_0 die in Volt gemessene Austrittsarbeit; T ist im zweiten Ausdruck ebenso gemäß (**3**,3) in E_T umgerechnet; 0,43 ist gleich $^{10}\log e$.

Man nennt den Vorgang des Elektronenaustritts *Emission* und I_s den *Sättigungsstrom*, weil der Strom nicht über diesen Wert ansteigen kann, bei dem sich alle austretenden Elektronen an der Strombildung beteiligen.

(**3**,5) *Man muß also stets durch eine genügend große und heiße Katode dafür sorgen, daß ein Sättigungsstrom vorhanden ist, der gleich, oder besser größer als der größte Elektronenstrom ist, der beim Betriebe der Röhre auftreten soll.*

Kleiner als I_s kann der Emissionsstrom dagegen ohne weiteres werden, wenn die äußere Spannung U kleiner als die Sättigungsspannung U_s wird und deswegen nicht sämtliche emittierten Elektronen fortfliegen, wie in § **5** gezeigt werden wird. Aus diesem Grunde wurde auch in (**3**,4) die Bedingung $U > U_s$ vermerkt.

Man beachte, daß der Exponent $0{,}43 \cdot \frac{E_0}{E_T}$ in (**3**,4) kleiner oder gleich 10 sein muß, wenn $I_s \geqq 1{,}6 \cdot E_T^2 \approx 0{,}02$ A/cm² sein soll, d.h. wenn die Emission merklich werden soll. Ändert sich der Exponent dann um $\pm$ 10%, d.h. wird er gleich 11 oder 9, so wird I_s nahezu 10mal so klein oder groß. Weil E_T proportional T ist, folgt daraus:

(**3**,6) *Eine Erhöhung oder Erniedrigung der absoluten Temperatur je* 10% *steigert oder erniedrigt den Sättigungsstrom um etwa je das zehnfache;* 20% *ergeben also das hundertfache,* 1% *würde das* $10^{0,1} = 1{,}26$*fache, d.h.* 26% *Änderung ergeben.*

Dieser Satz gilt ganz allgemein für alle Materialien, bezogen auf eine Temperatur, bei der sie gleich stark emittieren, nämlich etwa 0,02 A/cm². Daraus ergibt sich, daß die Emission praktisch außerordentlich schnell ganz aufhört, wenn die Temperatur einen gewissen Wert unterschreitet oder umgekehrt die Emission erst von einer bestimmten Temperatur ab praktisch anfängt, dann aber mit steigender Temperatur rapide wächst. Vgl. Tafel I, Spalte 4 und Bild 5f.

Äußere elektrische Felder können den Elektronenaustritt aus glühenden Metallen nur schwer beeinflussen. Die molekulare Anziehungskraft, d. h. der zu überwindende Spannungsabfall von E_0 Volt, erstreckt sich auf nur etwa 10^{-7} cm, ergibt in diesem Bereich also Feldstärken von einigen 10^7 V/cm. Nur dann, wenn die von außen wirksamen elektrischen Felder an der Metalloberfläche diese Größenordnung annehmen, können sie beim Elektronenaustritt in merklicher Weise helfend eingreifen. Nach der Theorie von Schottky[1] erniedrigen sie dann den Betrag der Austrittsarbeit E_0 um den Betrag

$$\Delta E_0 = 3{,}8 \cdot 10^{-4} \sqrt{\mathfrak{E}_0}\ \mathrm{V} \tag{3,7}$$

($\mathfrak{E}_0$ = Feldstärke an der Drahtoberfläche in V/cm).

Hiernach wird selbst für eine Feldstärke von 10^6 V/cm erst $\Delta E_0 = 0{,}38$ V, d. h. eine Entladung aus einer kalten Elektrode noch nicht möglich. Praktisch geht man trotzdem ungern über 10^5 V/cm hinaus, teils aus Sicherheitsgründen, teils weil an Kanten oder Schrammen an der Oberfläche örtlich wesentlich höhere Feldstärken entstehen können, als man bei Vernachlässigung dieser unberechenbaren Einflüsse annimmt. Solche Spitzenwirkungen können besonders durch Staubteilchen hervorgerufen werden, die während der Erhitzung bei der Fabrikation verkohlen und sich auf den Elektroden einbrennen. – Bezeichnet man den ohne Feld nach (3,4) berechneten Sättigungsstrom mit I_{s0}, so wird mit Feld

$$I_s = I_{s0}\, e^{\frac{\Delta E_0}{E_T}} = I_{s0}\, e^{4{,}39 \frac{\sqrt{\mathfrak{E}_0}}{T}}. \tag{3,8}$$

Für 10^5 V/cm wird $\Delta E_0 \approx 0{,}1$ V. Für $E_T = 0{,}1$ V wird dann $I_s = e \cdot I_{s0}$, der Sättigungsstrom also $e = 2{,}718$mal größer.

[1] W. Schottky, Z. Physik **14**, 63 (1923); ferner R. Haefer, Z. Physik **16**, 604 (1940).