

Ein Elektronenröhren-Generator kurzer elektrischer Wellen¹⁾.

Von M. T. Grechowa in Moskau.

Mit fünf Abbildungen. (Eingegangen am 12. Oktober 1925.)

Wenn die Gitter und die Anoden zweier Elektronenröhren durch je ein Drahtsystem veränderlicher Länge, wie in Fig. 1 gezeigt, verbunden werden, so wird dadurch ein Generator ungedämpfter Schwingungen bis 50 cm Wellenlänge herab erhalten. Wird dabei die Anodenspannung auf einem bestimmten Wert zwischen -5 und $+14$ Volt gehalten, so bekommen die beiden Gitter eine Spannung von $+50$ bis $+160$ Volt. Die Untersuchung der Abhängigkeit der Wellenlänge von Heizstrom, Gitterspannung, Anodenspannung und vom Verhältnis Anodendurchmesser—Gitterdurchmesser zeigte, daß die Wellenlänge von der Veränderung aller dieser Faktoren abhängig ist, was die Möglichkeit ergibt, eine gegebene Wellenlänge im Bereiche von 50 cm bis zu 1 m zu erhalten. Die Veränderung der Wellenlänge, die in diesem Generator durch die Veränderung der Gitterspannung E_g hervorgerufen wird, entspricht nicht den Formeln von Barkhausen und Kurz sowie nicht denen von Scheibe, was auf die kompliziertere Natur der Schwingungen hinweist, die in diesem Generator erzeugt werden und in starkem Maße von den Dimensionen des Anodenschwingungskreises abhängen.

Bei den Untersuchungen, die mit elektrischen Wellen von einer Wellenlänge kürzer als 1 m ausgeführt worden sind, sind meistens gedämpfte Schwingungen angewandt worden, die mittels eines Funkengenerators erzeugt wurden. Es ist aber von großem Interesse, auch in diesem Bereiche des elektrischen Spektrums für verschiedene Untersuchungen ungedämpfte Schwingungen zu gebrauchen. Deshalb ist vom Verfasser auf Anregung von Prof. Dr. W. I. Romanoff eine Methode für die Erzeugung kurzer ungedämpfter elektrischer Wellen von 50 cm bis zu 1 m Wellenlänge ausgearbeitet worden, die ihrem Schema nach von dem seinerzeit von Barkhausen und Kurz²⁾ beschriebenen Generator für Wellen derselben Länge verschieden ist und auch mit denselben Elektronenröhren Schwingungen größerer Intensität zu erzeugen erlaubt.

I. Der Generator. Der Generator besteht aus zwei Elektronenröhren, die symmetrisch auf einer horizontalen Hartgummiplatte befestigt sind (Fig. 1 und 2). Auf einer Seite der Platte befinden sich zwei parallele gerade Drähte AA' und BB' , je 3 mm Durchmesser und in 4 cm Entfernung voneinander. Von jedem Draht ist ein Ende mit je einer der Anoden verbunden. Die beiden anderen Drahtenden sind miteinander durch eine

¹⁾ Diese Arbeit wurde auf dem IV. Russischen Physikertag vorgetragen. Leningrad, September 1924.

²⁾ H. Barkhausen und K. Kurz, Phys. ZS. **21**, 1, 1920.

verschiebbare Brücke verbunden, welche folgende Beschaffenheit hat. An einer 5 cm langen und 2 cm breiten Kupferplatte sind in einer gegenseitigen Entfernung von 4 cm zwei Messingröhrchen senkrecht zur Platte angelötet, die solch einen inneren Durchmesser haben, daß die Anodendrähte mit leichter Reibung in sie hereingeschoben werden können. Es wurden Brücken mit Röhrchen verschiedener Länge, von 5 bis 20 cm, gebraucht. Die Verschiebung der Brücke veränderte die Länge der „Anodendrähte“. Zwei ebensolche Drähte mit einer gleichen Brücke werden mit den beiden Gittern verbunden und verlaufen in derselben horizontalen Ebene, aber in entgegengesetzter Richtung.

Die Glühdrähte wurden parallel geschaltet, der Heizstrom und die Heizspannung an dem Amperemeter A und dem Voltmeter V_3 abgelesen.

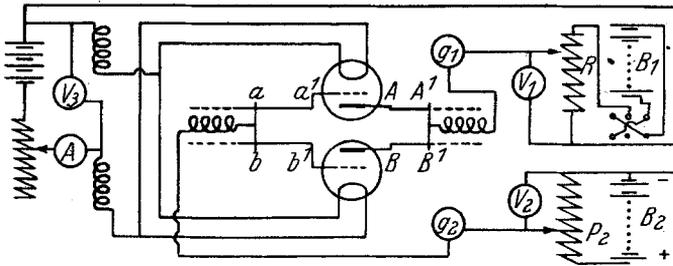


Fig. 1.

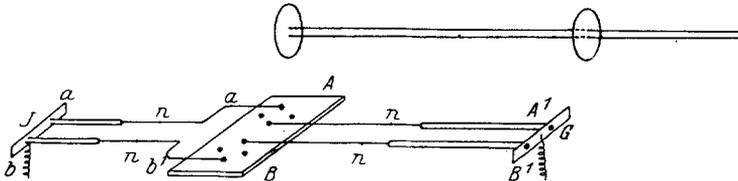


Fig. 2.

Die Gitter- und die Anodenspannung werden über die betreffende Brücke von den Batterien B_1 und B_2 durch die Potentiometer P_1 und P_2 zugeführt. Die Voltmeter V_1 und V_2 dienen zur Messung der Spannungsunterschiede Anode-Glühfaden und Gitter-Glühfaden. An den Mikroamperemetern G_1 und G_2 (im Nebenschluß) werden der Anodenstrom und der Gitterstrom gemessen. Der Heizstrom und die Anoden- und Gitterspannung werden über Drosselspulen zugeführt.

II. Die Erzeugung der Schwingungen. Die Schwingungen entstanden in einem Anodenspannungsbereich von -5 bis $+14$ Volt und einem Gitterspannungsbereich von $+50$ bis $+160$ Volt. Die Ver-

suche wurden mit Verstärkerröhren der „Odessaer Radiofabrik“, des „Schwachstromtechnik-Trusts“, des „Radiolaboratoriums in Nijni-Novgorod“ und der Firma E. Huth, sowie mit Röhren, die im hiesigen Laboratorium — Vakuumtechnische Abteilung des Staatlichen Elektrotechnischen Prüfungsinstituts — angefertigt wurden, ausgeführt.

Mit den Röhren von E. Huth und denen des „Radiolaboratoriums in Nijni-Novgorod“, die beide plattenartige Anoden haben, wurden keine Schwingungen erhalten. Mit den übrigen benutzten Röhrenarten, die zylindrische Elektroden haben, wurden Schwingungen erzeugt.

Das Vorhandensein von Schwingungen konnte durch die Annäherung an die „Anodendrähte“ oder die „Gitterdrähte“ von einigen Windungen dünnen Drahtes, die in Serie mit einem Kristalldetektor und einem Mikroamperemeter geschaltet waren, festgestellt werden. Eine andere Methode bestand darin, daß man einen Punkt der „Anodendrähte“ oder der „Gitterdrähte“ erdete und die dabei eintretende Änderung des Anodenstromes beobachtete. Bei Erdung eines Punktes, der einem Schwingungsbauche der „Anodendrähte“ entsprach, verschwand der Anodenstrom und die Schwingungen setzten aus. Bei der Erdung eines Spannungsknotens blieb der Anodenstrom unverändert. Auf diese Weise konnte man die Spannungsknoten und die Spannungsbäuche der Anodendrähte und der Gitterdrähte bestimmen. Dabei wies diese Veränderlichkeit des Anodenstromes auf die Anwesenheit von kurzwelligen Schwingungen hin. Nach der Lage der Schwingungsknoten und der Schwingungsbäuche konnte man annähernd die Wellenlänge bestimmen. Dabei ist bemerkenswert, daß der Spannungsknoten sich in unmittelbarer Nähe der die „Anodendrähte“ oder die „Gitterdrähte“ verbindenden Brücke befand. Die ungefähre Verteilung der Spannungsknoten J und G und der Spannungsbäuche n ist in Fig. 2 angegeben.

Zur Bestimmung der Spannungsknoten und -bäuche war es vorteilhafter, die „Anodendrähte“ zu benutzen, da in den „Gitterdrähten“ die Knoten und Bäuche nicht scharf ausgeprägt waren, und die Veränderung des Anodenstromes bei Erdung eines Spannungsbauches in diesem Falle nicht selten nur 25 Proz. betrug, während bei Erdung eines Spannungsbauches der „Anodendrähte“ der Anodenstrom bis zu Null sank.

Zur genauen Bestimmung der Wellenlänge diente ein Lechersches Drahtsystem, welches aus zwei parallel gezogenen Kupferdrähten von 0,8 mm Durchmesser bestand, deren gegenseitige Entfernung 2 cm betrug. Das System war an einem Ende durch eine unbewegliche, am anderen durch eine verschiebbare Brücke geschlossen. Als Brücken dienten runde

Scheiben aus Kupfer oder Zink von 15 bis 30 cm Durchmesser. Der verschiebbaren Brücke war ein Thermoelement parallel geschaltet.

Um die schädliche Wirkung der „Gitterdrähte“ zu verringern, mußte die induktive Kopplung des Generators mit dem Lecherschen System in folgender Weise vorgenommen werden. Die Drähte des Lecherschen Systems wurden oberhalb der Anodendrähte in einer Entfernung von 15 bis 50 cm ihnen parallel gezogen, und die Brücken wurden so eingestellt, daß die „Gitterdrähte“ hinter der unbeweglichen Brücke blieben. Fig. 2 erläutert diese Versuchsanordnung.

Mit dieser Kopplungsart wurde eine scharfe Resonanzkurve erhalten (Fig. 3, Kurve I). Wenn dagegen das Lechersche System sich nicht nur über den „Anodendrähten“ allein, sondern auch teilweise über den „Gitterdrähten“ oder nur über letzteren allein befand, so wurde die Resonanzkurve flach, die Intensität der Schwingungen geringer und die

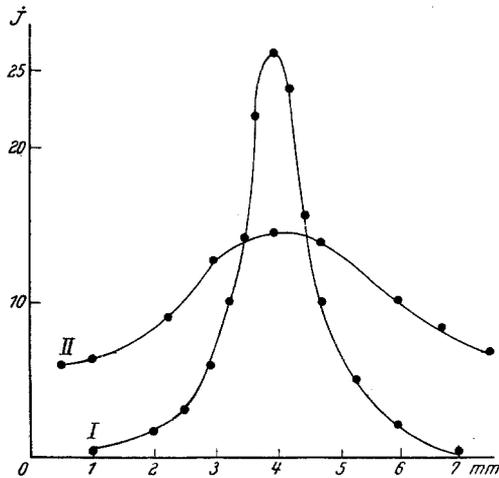


Fig. 3.

Ausschläge des mit dem Thermoelement verbundenen Galvanometers sanken bei keiner Lage der verschiebbaren Brücke bis auf Null (Fig. 3, Kurve II).

Um die Bedingungen für die Erzeugung elektrischer Wellen mittels des oben beschriebenen Schaltungsschemas zu ermitteln, wurde die Abhängigkeit der Wellenlänge vom Heizstrom, von der Anodenspannung, der Gitterspannung und vom Verhältnis Anodendurchmesser–Gitterdurchmesser untersucht. Die Resultate dieser Versuche sind in den Tabellen 1, 2 und 3 dargestellt, welche die Abhängigkeit der Wellenlänge von den verschiedenen Faktoren angeben. Die in diesen Tabellen benutzten Bezeichnungen sind folgende: E_a Anodenspannung in Volt, E_g Gitterspannung in Volt, J_a Anodenstrom in Skalenteilen (wobei 1 Skt. gleich etwa 7,6 mA ist), J_h Heizstrom in Ampere, d_a Anodendurchmesser, d_g Gitterdurchmesser, A Länge der „Anodendrähte“, G Länge der „Gitterdrähte“, λ Wellenlänge. Wie aus den Tabellen ersichtlich, wächst die Wellenlänge mit der Ver-

Tabelle 1.

Röhrenart	E_a	E_g	d_a mm	d_g mm	λ cm	d_a/d_g
„Schwachstrom- technik - Trust“	- 5	100	9,5	3	61,6	3,17
	0	100	9,5	3	73,6	3,17
	+ 5	100	9,5	3	96	3,17
	+ 10	100	9,5	3	100	3,17
	5	100	—	—	—	—
„Odessaer Radiofabrik“	- 5	100	9	4	56,8	2,25
	0	100	9	4	62,6	2,25
	+ 5	100	9	4	67,8	2,25
	+ 10	100	9	4	73	2,25
	—	—	—	—	—	—

Tabelle 2

$J_h = 1 \text{ Amp.}, A = 23 \text{ cm}$			$J_h = 1 \text{ Amp.}, A = 23 \text{ cm}, 28 \text{ cm}$		
E_g	E_a	λ cm	E_g	E_a	λ cm
95	0	66,5	95	0	66,5
110	0	63,0	95	5	72,5
120	0	60,0	95	8	75,8
135	0	59,2	120	0	60,8
140	0	58,7	120	5	67,0
150	0	57,5	120	8	72,4
160	0	56,2	120	10	75,0

Tabelle 3.

$E_g = 100 \text{ Volt}, E_a = 0 \text{ Volt}, A = 23 \text{ cm}$			$E_g = 100 \text{ Volt}, E_a = 0 \text{ Volt}, A = 23 \text{ cm}$		
J_a	J_h	λ cm	J_a	J_h	λ cm
1,5	0,8	75	9	1,10	58,5
2	0,9	68	11	1,15	56
6	1,0	63	15	1,20	51
7	1,05	61	—	—	—

größerung des Verhältnisses d_a/d_g (Tabelle 1) sowie mit Steigerung der Anodenspannung und verkleinert sich mit Steigerung der Gitterspannung (Tabelle 2). Mit Steigerung des Heizstromes verkleinert sich die Wellenlänge (Tabelle 3). Außer dem Einfluß der Elektrodendurchmesser, des Heizstromes und der Spannungen hängt die Wellenlänge noch von der Länge der „Anodendrähte“ ab. Bei konstanten anderen Betriebsbedingungen ändert sich die Wellenlänge in Abhängigkeit von der Änderung der Länge der Anodendrähte so, daß mit Vergrößerung dieser Länge die Wellenlänge größer, mit Verkleinerung derselben kleiner wird. Tabelle 4 gibt diese Abhängigkeit an. Bei einer Veränderung der Länge der „Gitterdrähte“ wird nur die Intensität der Schwingungen, nicht aber die Wellen-

länge geändert. Wenn alle übrigen Bedingungen unverändert bleiben und nur die Länge der „Gitterdrähte“ verändert wird, so verläuft die Änderung der Schwingungsintensität der Änderung des Anodenstromes parallel. Tabelle 5 gibt die Abhängigkeit des Anodenstromes und folglich der Schwingungsintensität von der Länge der „Gitterdrähte“ an. Aus

Tabelle 4.

$E_a = 0, E_g = 110 \text{ Volt}$			$E_a = 0, E_g = 110 \text{ Volt}$		
A cm	G cm	λ cm	A cm	G cm	λ cm
40	21	72,0	40	31	72,1
35	21	69,6	35	31	69,8
30	21	67,2	30	31	67,2
25	21	64,5	25	31	64,6
20	21	62,6	20	31	62,2
15	21	60,5	—	—	—

Tabelle 5.

$E_a = 0, E_g = 110 \text{ Volt}$				$E_a = 0, E_g = 110 \text{ Volt}$			
A cm	G cm	λ cm	J_a	A cm	G cm	λ cm	J_a
30	10	67,2	0,3	20	10	62,2	3
30	15	67,2	2	20	15	62,2	5
30	20	67,2	2,5	20	20	62,2	5,8
30	25	67,2	8	20	25	62,2	7,5
30	30	67,2	12	20	30	62,2	6,4
30	35	67,2	4	20	35	62,2	4
30	40	67,2	1,5	20	40	62,2	0,5
30	45	67,2	0,3	20	45	62,2	0,2

dieser Tabelle ist ersichtlich, daß das Intensitätsmaximum bei einer bestimmten Länge der „Gitterdrähte“, also bei Resonanz zwischen Gitterkreis und Anodenkreis erhalten wird.

Es konnte also durch Variieren der Anodenspannung von -5 bis $+14$ Volt, der Gitterspannung von $+50$ bis $+160$ Volt, des Heizstromes von $0,8$ bis $1,2$ Amp. (diese Angabe bezieht sich auf zwei parallel geschaltete Röhren) und der Länge der „Antennendrähte“ von 10 bis 45 cm die Wellenlänge von 50 bis 85 cm verändert werden. Die Länge der „Antennendrähte“ wurde nur in einem Bereiche von 10 bis 45 cm variiert, weil bei Längen kleiner als 10 cm oder größer als 45 cm die Schwingungen verschwanden.

Bei der Messung der Abhängigkeit des Anodenstromes von der Anodenspannung und von der Gitterspannung wurden Kurven erhalten, die in Fig. 4 und 5 dargestellt sind. Die Kurven der Fig. 4 geben die Beziehung zwischen Anodenstrom und Gitterspannung bei vier ver-

schiedenen Anodenspannungen an. Diese letzte Kurve hat das Aussehen einer gewöhnlichen Kennlinie, und bei der ihr entsprechenden Anodenspannung werden Schwingungen bei keiner Gitterspannung erhalten. Bei den Kurven I, II, III werden Schwingungen von den Punkten a , b , c an bei weiterer Steigerung der Gitterspannung ungefähr im Bereiche 85 bis 160 Volt erhalten — weiter konnte die Gitterspannung wegen der ungenügenden Entgasung der bei diesen Versuchen verwandten Röhren nicht gesteigert werden —, da bei höheren Spannungen ein Aufleuchten der Röhren, also starke Ionisation der Restgase, welche die Schwingungen

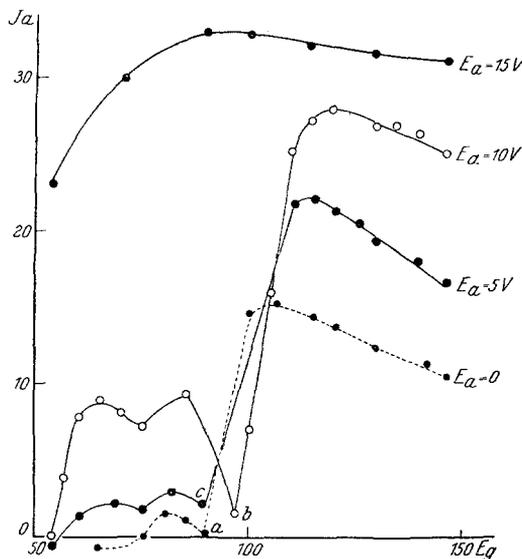


Fig. 4.

herabsetzte und das Leben der Röhre gefährdete, eintrat. Die Kurven der Figur beziehen sich auf Röhren der „Odessaer Radiofabrik“. Die für andere Röhrenarten aufgezeichneten Kurven haben den gleichen Charakter, nur sind die Punkte a , b , c , d. h. der Anfang des steilen Anstieges der Kurve, nach der einen oder der anderen Seite verschoben.

Wenn man die Veränderung des Anodenstromes mit der Änderung der Anodenspannung verfolgt, so erhält man Kurven wie die in Fig. 5 aufgezeichneten. Der Bereich der Schwingungen im Falle der Kurven I, II, III, erstreckt sich vom Nullpunkt der Kurven — $E_a = 0$ — bis zu den Punkten n , p , d. i. bis zum Anfang des steilen Abfallens der Kurven, in welchem Punkte die Schwingungen plötzlich aussetzen. Der Teil dieser Kurven, der durch eine punktierte Linie dargestellt ist,

konnte nicht aufgenommen werden, weil hier bei einer Steigerung der Anodenspannung auf 0,1 Volt die Schwingungen und der Anodenstrom plötzlich verschwanden und die Anodenspannung ohne weitere Berührung des Potentiometers auf einen Betrag von 2 bis 3,5 Volt stieg. Im Falle der Kurve IV, also bei $E_g = 140$, erstreckte sich der Bereich der Schwingungen von der Anodenspannung Null bis zu den Stellen der Kurven, die nicht ausgezogen sind, wo die Schwingungen, allmählich schwächer werdend, verschwanden.

Die Punkte m , n , p , q und a , b , c , d können sich um einige Volt nach der einen oder nach der anderen Seite hin verschieben, und zwar je

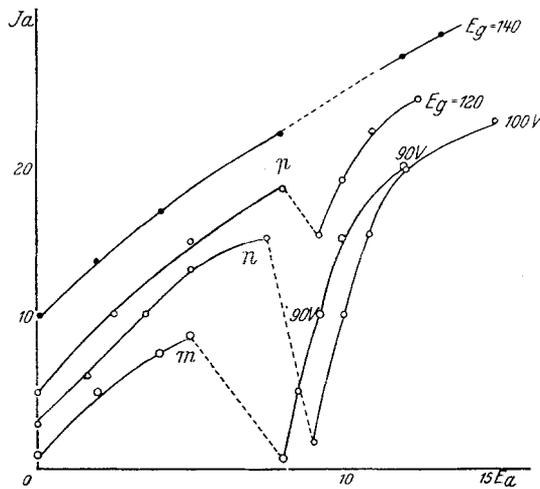


Fig. 5.

nach der Richtung, in welcher man den Verlauf der Kurven beim Variieren der Anodenspannung oder der Gitterspannung verfolgt, sowie auch nach der Reihenfolge, in welcher Heizstromkreis, Anodenstromkreis und Gitterstromkreis geschlossen werden. Wie daraus ersichtlich, sind die Bedingungen des Einsetzens und des Verschwindens der Schwingungen nicht ganz stabil.

Von Barkhausen und Kurz¹⁾ ist eine Theorie für die Schwingungen dieser Art aufgestellt worden, die weiter von Scheibe²⁾ entwickelt worden ist. Nach dieser Theorie soll die Wellenlänge nicht von den Dimensionen des Anoden- und Gitterkreises abhängen, sondern nur durch die innere Beschaffenheit und die Betriebsbedingungen der Röhre bedingt sein. Da die Schwingungen, die in der hier beschriebenen Schaltung erzeugt werden, eine Abhängigkeit von der Länge der „Anoden-

¹⁾ Barkhausen und Kurz, l. c.

²⁾ A. Scheibe, Ann. d. Phys. **73**, 54, 1924.

drähte“, wie aus den Tabellen 5 und 6 ersichtlich, zeigen, und da andererseits ihre Wellenlänge auch durch die inneren Betriebsbedingungen bestimmt wird, so war es interessant, die Wellenlänge, die bei einer bestimmten Länge der „Anodendrähte“ gemessen wurde, mit der nach den Formeln von Barkhausen-Kurz und Scheibe berechneten zu vergleichen.

Tabelle 6.

E_g Volt	Bereich der beobachteten λ cm	λ berechnet Barkhausen- Kurz cm	λ berechnet Scheibe cm
110	72 bis 60,5	85,8	81
130	68 „ 55	78,9	74,5
160	64 „ 51	70,8	66,75

Tabelle 6 enthält in der dritten Spalte die Wellenlängen nach der Formel von Barkhausen-Kurz:

$$\lambda = \frac{1000}{\sqrt{E_g}} \frac{d_a E_g - d_g E_a}{E_g - E_a}$$

berechnet. Die vierte Spalte enthält dieselbe Wellenlänge nach der Formel von Scheibe:

$$\lambda = \frac{4c}{\sqrt{2c/m E_g} 10^8} r_g \left\{ f(\sqrt{I_{ge} r_g / r_0}) + g\left(\sqrt{\frac{E_g}{(E_g - E_a)} I_{ge} \frac{r_a}{r_g}}\right) \right\}$$

berechnet. Dabei bedeuten; r_0 Glühfadenradius, r_g Gitterradius, r_a Anodenradius. $f(x)$ und $g(x)$ sind die Funktionen $f(x) = x e^{-x^2} \int_0^x e^{u^2} du$, $g(x) = x e^{x^2} \int_0^x e^{-u^2} du$. Die zweite Spalte der Tabelle 6 zeigt den Bereich der

Wellenlängen, die sich bei derselben Gitterspannung und derselben Anodenspannung, aber bei verschiedenen Längen der „Anodendrähte“ ergibt.

Die Abweichung zwischen den beobachteten und den berechneten Werten zeigt, daß wir in den Schwingungen, die in der in dieser Arbeit benutzten Schaltung entstehen, einen komplizierteren Fall haben, welcher sich in den Rahmen der Theorie von Barkhausen und Kurz nicht einfügen läßt. Darauf scheint auch die Abhängigkeit des Entstehens dieser Schwingungen von den Vakuumverhältnissen der Röhren, was den Gegenstand weiterer Untersuchungen bilden soll, hinzudeuten.

Zum Schluß erlaube ich mir, Herrn Prof. Dr. W. I. Romanoff für die ständige Leitung dieser Arbeit sowie für die mir zur Verfügung gestellten Apparate und Mittel meinen tiefgefühlten Dank auszusprechen.

Moskau, Vakuumtechn. Abt. d. Staatl. Elektrotechn. Prüfungsinstituts, Sept. 1924.