durch Ansprechen einer Funkenstrecke S entladen werden. Der Fluoreszenzfleck wird somit hier erst proportional der Zeit aus der Ruhelage verschoben, geht dann plötzlich bei Einsetzen der Funkenstrecke in seine Ruhelage zurück und verbleibt dort während des negativen Spannungsbuckels der Hilfsschwingung. Erst mit Beginn der positiven Spannung wiederholt er seine Bewegung, die in zeitlicher Folge durch Bild 8 gegeben ist. Man beachte, daß diese Methode von einem etwas verfrühten oder verspäteten Einsetzen der Funkenstrecke unabhängig ist, indem hierdurch nicht die gleichmäßige Verschiebung des Fleckes beeinflusst wird, sondern lediglich die größte Verschiebung, die der Fleck erreicht. Vorsicht erfordert der Umstand, daß in einem Teil der Zeit (während des negativen Spannungsbuckels der Hilfsfrequenz) der Fleck ruht. Diese Art der Fleckverschiebung dürfte sich daher im allgemeinen nur für periodische Vorgänge empfehlen. Auch erfordert die Funkenstrecke zu ihrem Ansprechen höhere Spannungen, als sie bei dem ersten Vorschlage notwendig sind.

Immerhin kann auch dieser Vorschlag sein Anwendungsgebiet finden.

Daß man beim ersten Vorschlag den Entladestrom der Röhren benutzen kann, den Fleck aus dem Gesichtsfelde herauszuwerfen und somit nur die Kurvenbilder für den Hingang des Fleckes sichtbar zu machen, mag nur beiläufig erwähnt werden.

An der experimentellen Prüfung der hier genannten Vorschläge hatte Herr Dr. Glage die Liebenswürdigkeit sich zu beteiligen. Wir berichten in der folgenden Arbeit über unsere Ergebnisse.

Einige Versuche mit einem verbesserten Kathodenstrahl-Oszillographen.

Von

W. Rogowski und G. Glage.

(Mitteilung aus dem Technisch-Physikalischen Institut der Universität Jena.)

I. Braunsche Röhre und Spannungsgeber. Im folgenden teilen wir einige Versuche mit, die wir mit der in der vorangehenden Arbeit von Rogowski¹⁾ angegebenen Verbesserung des Kathodenstrahl-Oszillographen angestellt haben.

Wir benutzten eine Braunsche Röhre der üblichen alten Bauart mit kalter Kathode. Die Elektronen wurden bei ihr somit durch Joneinstoß freigemacht. Die hierzu benötigte hohe Spannung wurde einer Influenz-Elektrisiermaschine von Wehrsen entnommen. Wir hatten somit rasche Elektronen und damit eine unempfindliche Röhre. Sie gab bei 440 Volt je nach der Härte etwa 1 bis 2 cm Ausschlag.

Die Ablenkung des Strahles geschah mit Hilfe zweier senkrecht zu einander stehender elektrischer Felder, die in üblicher Weise durch Ladung je zweier Platten hergestellt wurden. (Vergl. Bild 1. Die zu untersuchende Spannung lag an den Platten $a - b$, die dreieckförmige, der Zeit proportionale Hilfsspannung an den Platten $c - d$.) Da die Röhre keine Innenelektroden besaß, mußten wir die Platten außerhalb der Röhre anbringen. Das hat den Nachteil, daß sich bisweilen je nach der Härte der Röhre auf der Glaswand elektrische Ladungen niederschlagen, die das Feld der Ablenkungskondensatoren verzerren. Bei nicht zu hohem Vakuum der Röhre, die bei uns dauernd mit einer Gaedepumpe in Verbindung stand, ließ sich dieser Übelstand auf ein erträgliches Maß herabdrücken.

¹⁾ Rogowski, Archiv für Elektrotechnik, IX, S. 115.

Die Vorrichtung zur Erzeugung der dreieckförmigen Hilfsspannung, die den Fluoreszenzfleck gleichmäßig hin- und herführen soll, ist in Bild 2 zu sehen. Bild 3 gibt die zugehörige Schaltung. Beim Bau ist auf peinlichste Isolation Wert gelegt, denn die Ströme dieser Vorrichtung sind klein, die Spannungen entsprechend der Unempfindlichkeit der benutzten Braunschen Röhre ziemlich hoch. Wir wollten daher Isolationsströme so weit herabdrücken als möglich. So sind denn die Akkumulatoren A, die Widerstände B, die Strommesser D zur Heizung der Ventilröhren C getrennt auf Porzellansockel gesetzt. Als Ventilröhren benutzen wir normale Verstärker oder Senderöhren, bei denen wir Gitter und Anode verbunden. Die Steckkontakte der Ventilröhren waren auf Hartgummi montiert, ebenso waren die der Anode vorgeschalteten Anodenstrommesser durch Hartgummiunterlagen sorgfältig isoliert. K ist der Kondensator, der durch den Sättigungsstrom der Ventilröhren geladen und entladen werden und somit eine dreieckförmige Wechselfspannung erhalten soll.

Die Spannung zum Betrieb dieser Anordnung wurde einem Transformator (Übersetzungsverhältnis 110/2000) entnommen, der primär an eine Wechselstrommaschine von der Frequenz 50 Perioden/Sekunde angeschlossen war. (In Ausnahmefällen wurde er auch mit der Frequenz 500 Per/sec betrieben.) Bei diesen langsamen Vorgängen erwies es sich nicht als notwendig, den Sekundärklemmen des Trans-

Bild 1. Benutzte Braunsche Röhre mit Ablenkungsplatte.

Bild 2. Spannungsgeber.

Bild 3. Schaltung des Spannungsgebers.

formators einen Kondensator parallel zu schalten. Die Stromänderungen erfolgten auch ohne ihn genügend rasch¹⁾. Mit den Klemmen des Kondensators K waren die horizontalen Ablenkungsplatten c d der Braunschen Röhre verbunden.

Wenn man diese Anordnung in der früher beschriebenen Weise betreibt, fällt einem sofort auf, daß die beiden Anodenstrommesser E (Bild 2) gleiche Werte anzeigen, selbst dann wenn die Heizung der beiden Ventilröhren verschieden eingestellt ist. Der Grund liegt darin, daß die Strommesser mittlere und nicht momentane Werte des pulsierenden Anodenstromes angeben. Daß sie gleichweit ausschlagen, besagt nichts anderes, als daß die Elektrizitätsmenge für Ladung und Entladung des Kondensators K denselben Wert hat. Ist J_1 der Lade-, J_2 der Entladestrom, t_1 die Lade-, t_2 die Entladedauer, so ist offenbar:

$$J_1 t_1 = J_2 t_2.$$

Die Dauer einer Ladung und Entladung muß im periodischen Falle mit T, der Periodendauer des Hilfswchselstromes, übereinstimmen:

$$t_1 + t_2 = T.$$

¹⁾ Vergl. Rogowski, a. a. O. S. 117.

Die Anodenstrommesser zeigen offenbar $\frac{J_1 t_1}{T}$ oder $\frac{J_2 t_2}{T}$ an.

Lade- und Entladedauer verhalten sich umgekehrt wie die zugehörigen Lade- und Entladeströme:

Bild 4. Dreieckförmige Wechselspannungen.

a) gleichschenklige,

b) schiefwinklige.

Heizen wir die Ventilröhren verschieden, so muß der Fluoreszenzfleck der Röhre rascher hin- als zurückwandern oder umgekehrt. Dies ist ein gutes Mittel, um die Kurven, die der Oszillograph beim Hingang und Rückgang schreibt, zu unterscheiden.

Bild 5. Lade- und Entladestrom des Kondensators K (Bild 2 u. 3). Ventilröhre: Schottische Senderöhre.

- a) Wechselspannungen 600 Volt,
 - b) " 1400 "
 - c) " 2200 "
- Gleiche Heizung beider Ventilröhren.

2. Nachweis der Dreiecksspannung. Wenn die Wechselspannung des Kondensators K (Bild 2 u. 3) auf die Kathodenröhre einwirkt, wird der Fleck zu einem Band auseinandergezogen. Wir untersuchten dieses auf seine Zeitabhängigkeit mit Hilfe eines rotierenden Spiegels. Wir erhielten durchaus nicht immer die erwartete dreieckförmige Gestalt. Bei niedriger Hilfsspannung erhielten wir gewöhnlich eine unregelmäßige Kurve. Erst wenn wir die Spannung steigerten, erhielten wir die erwartete Dreieckskurve, die bisweilen sogar ausgezeichnet war. Steigerten wir die Spannung noch höher, so wurde die Kurve gewöhnlich wieder etwas schlechter. Je nach der Heizung der beiden Röhren erhielten wir gleichschenklige oder schiefwinklige Dreiecksform (Bild 4). Die beobachteten Abweichungen von der Dreiecksform veranlaßten uns, die Kurve des Kondensatorstromes mit dem Simensschen Oszillographen zu

untersuchen, und dies ist auch der Hauptgrund, warum wir zunächst bei niedrigen Frequenzen blieben.

Bild 5 zeigt die Lade- und Entladeströme, die wir erhielten, wenn wir als Ventilröhre Schott'sche Senderöhren (kleines Modell, normaler Heizstrom 1,35 Ampere) benutzten. Die Oszillographenschleife wurde unmittelbar vor den Kondensator K (Bild 2 u. 3) geschaltet. Kurve a ist bei niedriger Spannung (etwa 600 Volt), b bei höherer (etwa 1400 Volt), c bei höchster Spannung (etwa 2200 Volt) aufgenommen. Bei gleichmäßiger Heizung der Ventilröhren und genau dreieckiger Spannungskurve erwarten wir im Oszillogramm eine rechteckförmige Stromkurve. Sie ist bei der

Bild 6. Lade- und Entladestrom bei ungleicher Heizung beider Ventilröhren.

niedrigsten Spannung nicht vorhanden. Bei mittlerer Spannung bereits deutlich ausgeprägt, wenn auch der Übergang von Lade- zu Entladestrom nur langsam erfolgt. Bei höchster Spannung geht auch dieser Übergang plötzlich vor sich, dafür beulen sich die geradlinigen Teile etwas aus. Bild 6 ist bei ungleicher Heizung aufgenommen. Wir sehen deutlich, daß zum größeren Strome die kürzere Zeit gehört. Auch hier

ist die Konstanz des Ladestromes ziemlich gut erfüllt.

Bild 7. Sättigungsstrom der benutzten Schott'schen Senderöhre. Gitter mit Anode verbunden.

Bild 8. Sättigungsstrom einer Seddig-Verstärkerröhre. Gitter mit Anode verbunden.

Wir nahmen sofort an, daß die Mängel, die unsere Ladeströme zeigen, dadurch verursacht sind, daß unsere Ventilröhren Gas enthielten oder bei der starken Beanspruchung abgaben und somit von eigentlichen Sättigungsströmen nicht die Rede sein konnte. Eine Aufnahme ihrer Charakteristiken bestätigte dies (Bild 7). Wir suchten nun nach besseren Ventilröhren und fanden solche in Seddig'schen Verstärkerröhren (Heizstrom 0,54 Ampere Anodensp. 90 Volt). Nach Bild 8 ergaben diese sogar eine ganz vorzügliche Konstanz des Stromes, der sich zwischen 50 und 700 Volt um weniger als 1% änderte. Wir wiederholten die oszillographischen Aufnahmen mit solchen Röhren und fanden nun unsere Erwartungen vorzüglich bestätigt (Bild 9). Damit der Siemensche Oszillograph nennenswerte Ausschläge gab, mußten die Ventilröhren überanstrengt werden. Das hatte zur Folge, daß auch sie nach kurzem Gebrauch die in Bild 5 vorhandenen Ausbuchtungen ergaben (Bild 10). Möglicherweise lag eine solche Überanstrengung bereits bei den Schott'schen Röhren vor, da diese schon längere Zeit vor der Aufnahme der Oszillogramme in der Apparatur benutzt waren. Solche Überanstrengungen sind bei passender Wahl des Kondensators K leicht zu vermeiden.

Mit dem Vorstehenden ist der Nachweis geführt, daß in der Tat ein Laden und Entladen eines Kondensators mit konstanten Strömen möglich und daß demzufolge eine dreieckförmige Spannungskurve ohne Schwierigkeit herzustellen ist.

Bild 9. Lade- und Entladestrom des Kondensators K (Bild 9), Ventilröhre: Seddigsche Verstärkerröhre.

a) bei hoher, b) bei mittlerer, c) bei niedriger Wechsellspannung.
Gleiche Heizung beider Ventilröhren.

Bild 10. Niedrige Wechsellspannung.

Kurve a) bei mässiger, Kurve b) bei starker Überanstrengung der Ventilröhren; gleiche Heizung
Kurve c) ungleiche Heizung der Ventilröhren.

Bild 11a zeigt den bei einer dreieckförmigen Wechsellspannung erhaltenen Fluoreszenzstreifen. Es ist an seiner durchweg gleichmäßigen Tönung sofort zu erkennen, ob die ablenkende Spannung wirklich dreieckförmig ist. Denn sowie sie hiervon abweicht (Bild 11b Sinusspannung, Bild 11c Sinusspannung mit dritter

Oberwelle), sieht man sofort gewisse Stellen des Bandes heller leuchten als andere. Wie die Betrachtung im rotierenden Spiegel ergab, war bei Bild 11 a eine ausgezeichnete Dreiecksspannung vorhanden. Das Auge vermochte in dem Fluoreszenzbande keine Ungleichmäßigkeiten zu entdecken. Trotzdem zeigt die photographische Aufnahme Spuren hiervon. Dies ist vielleicht so zu erklären, dass die Lichtschicht kleine Unregelmäßigkeiten enthielt, die auf die photographische Platte stärker wirken als auf das Auge.

Weiter stellten wir Versuche bei der Frequenz von 500 Per/sec an und überzeugten uns auch hier mit dem rotierenden Spiegel, daß ausgezeichnete Dreiecksspannungen zu erhalten waren.

Es ist für den weiteren Ausbau der Versuche von Wichtigkeit zu wissen, ob bei Hochfrequenz zwei Schwingungen so weit intakt bleiben, daß das Oszillogramm auf dem Fluoreszenzschirm still steht und nicht wandert. Um hierüber Klarheit zu erhalten, ließen wir auf die Platten c d Bild 1 die Spannung eines Röhrensenders einwirken, der auf die Welle von 800 m eingestimmt war. Die Platten a b wurden an einen zweiten Röhrensender angeschlossen, der auf die Welle von 200 m eingestimmt war. Bei genügender Vorsicht stand die Lissajonsche Figur fast vollkommen still, so daß alle Einzelheiten der Kurven zu beobachten waren. Die geringste Kapazitätsänderung verursachte bereits ein Wandern der Kurven. Wir glauben, daß sich so die genauesten Kapazitätsabgleichungen werden darstellen lassen.

3. Kondensator- und Ventilspannung. Im folgenden wollen wir uns noch genauer mit den Spannungen an Kondensator und Ventilröhren beschäftigen. Lade- und Entladestrom seien zunächst als gleich vorausgesetzt:

Bild 12. Konstruktion des gleichschenkligen Spannungsdreiecks.

Bild 13. Maschinenspannung und gleichschenkliges Spannungsdreieck.

$$J_1 = J_2 = J.$$

Nach bekannten Beziehungen ist:

$$J = \frac{dQ}{dt} = \frac{CdV}{dt};$$

Q = Ladung; C = Kapazität; V = Spannung des Kondensators K (Bild 2); somit ist

$$\frac{dV}{dt} = \frac{J}{C} = \operatorname{tg} \varphi;$$

wo φ den Winkel bedeutet, den bei zeichnerischer Darstellung die Kondensatorspannung mit der Zeitgeraden bildet. Hiermit ist die Dreieckform der Spannung

festgelegt: Wir zeichnen über der Strecke $AB = T$ (Periodendauer der Hilfsschwingung) ein gleichschenkliges Dreieck mit den gleichen Basiswinkeln φ (Bild 12). Man liest ihm ab, daß die Schwingungsweite der Kondensatorspannung

$$e = \frac{JT}{C4}$$

beträgt.

Wir tragen nun noch in demselben Maßstab die Hilfsspannung (Maschinenspannung) auf. Offenbar ist im periodischen Falle nur dann die in Bild 12 gezeichnete Spannung möglich, wenn wir das Dreieck in die Spannungskurve der Maschine derart hineinklappen können, daß die Basis der Zeitachse parallel liegt und die Eckpunkte in die Sinuslinie hineinfallen. Hierzu ist erforderlich, daß die Amplitude der Maschinenspannung größer als $\frac{JT}{C4}$ ist. Ist sie kleiner oder war die Heizung der Ventilröhre zu stark einreguliert, oder der benutzte Kondensator zu klein, so kann sich keine dreieckförmige Kondensatorspannung einstellen, wir erhalten dann

Bild 14. Konstruktion des schiefwinkligen Spannungsdreiecks.

Bild 15. Maschinenspannung und schiefwinkliges Spannungsdreieck.

Kurven von der Form a (Bild 5). Man kann in einem solchen Falle durch dreierlei Mittel die Dreiecksspannung wieder herstellen:

1. Man steigert die Maschinenspannung,
2. man schwächt die Heizung der Ventilröhren,
3. man vergrößert die Kapazität des Kondensators K (Bild 2).

Es hat somit gar keine Schwierigkeit, die Dreieckform zu erhalten, aber man darf nicht blindlings Spannung und Heizung und Kondensator beliebig wählen. Man merke sich am besten: Man darf Spannung und Kapazität nicht unter, die Heizung nicht über einen gewissen Wert wählen. Im übrigen sind den Größen keine Grenzen gezogen.

Die Ordinatenabschnitte zwischen Sinus- und Dreieckskurve (Bild 13) geben die Anodenspannungen der Ventilröhren an. Es ist früher gesagt worden, die Maschinenspannung müsse groß sein gegen die Sättigungsspannung der Ventile. Richtiger müssen wir sagen die durch Bild 13 gegebenen (schraffierten) Anodenspannungen müssen es sein. Durch Steigerung der Maschinenspannung ist die Forderung ja immer zu erfüllen. Immerhin wird man im Interesse der Lebensdauer der Röhre nicht weiter gehen als notwendig. Auch ist es empfehlenswert, die Sättigungsspannung so tief als möglich zu wählen, was durch Einbau passender Gitter (Langmuirscher Spannungsgitter) und schwache Heizung zu erreichen ist.

Bei ungleicher Heizung wird das Spannungsdreieck ungleichschenkelig. Die Basiswinkel φ_1 und φ_2 sind durch die Ausdrücke:

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{J_1}{C}; \quad \operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{J_2}{C}; \quad J_1 = \text{Lade-}, J_2 = \text{Entladestrom}$$

gegeben. Im periodischen Falle muß auch hier wie vorhin das Dreieck in die Spannungskurve der Maschine hineingeklappert werden können.

In Bild 14 ist dies für einen besonderen Fall gezeichnet. Die Bedingungen für das Zustandekommen der Dreiecksspannung sind die gleichen wie früher. Wichtig ist, daß in diesem Falle die Anodenspannungen der Ventilröhren ungleich groß sind, wie sich aus der Betrachtung der Ordinatenabschnitte zwischen Sinus- und Dreieckskurve ergibt.