Untersuchungen an Hochspannungstransformatoren mit dem Braunschen Rohr.

Von

Hermann Behnken.

(Mitteilung aus der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt.)

Dem Verfasser wurde die Aufgabe, den zeitlichen Verlauf der Spannung an einem im Betriebe befindlichen Röntgenrohr zunächst qualitativ, nach Möglichkeit aber auch quantitativ festzustellen. Die Schwierigkeiten dieser Aufgabe sind dadurch bedingt, daß man es einmal mit sehr hohen Spannungen — es kommen bis $200 \text{ kV}_{\text{eff}}$ in Frage — zu tun hat. Außerdem ist die einem Röntgenrohr zugeführte Leistung gering. Ein technisches Therapierohr des Coolidge-Typs verträgt bei Dauerbelastung selten mehr als 2—3 Milliampere. Es muß also, um die Betriebsbedingungen für das Röntgenrohr möglichst wenig zu beeinflussen, eine Untersuchungsmethode gewählt werden, die so wenig Energie wie möglich verbraucht. Drittens ist, besonders wenn sich im Röhrenstromkreis ein rotierender Nadelschalter befindet, um die unerwünschte Stromrichtung vom Röntgenrohr abzuhalten, mit dem Auftreten von Hochfrequenzschwingungen zu rechnen. Diese Lage der Dinge ließ es als aussichtsreich erscheinen, einen Versuch mit dem Braunschen Rohr zu unternehmen. Eine schließlich als brauchbar befundene Versuchsanordnung soll im folgenden beschrieben werden. Damit ausgeführte Untersuchungen an Röntgenapparaturen werden später mitgeteilt werden.

Der Verfasser hat eine im Prinzip von A. Wehnelt¹⁾ angegebene Schaltungsweise der Braunschen Röhre benützt, die den zu stellenden Ansprüchen bis zu einem gewissen Grade genügte. Da es bei dem bekannten Prinzip der Braunschen Röhre wesentlich Sache des Ausprobierens ist, zu einer befriedigenden Versuchsanordnung zu gelangen, so soll die letztere hier genauer beschrieben werden, ohne daß damit behauptet wird, daß nicht auch andere Dimensionierungen der Apparatur, vielleicht sogar noch besser, zum Ziele führen.

Die Gestalt und die wichtigsten Abmessungen der benützten Röhre sind aus Bild 1 und 2 ersichtlich. Die Maße sind in cm angegeben. Die Kathode K besteht aus Alu-

Bild 1.

Bild 2.

¹⁾ A. Wehnelt, Ann. d. Phys. **47**, 1115, 1915.

minium und ist auf einen Aluminiumstiel aufgeschraubt. Dieser ist in den Kern-
teil eines Schliffes mit weißem Siegelack eingekittet. Etwa 2 cm oberhalb
der Kathode ist auf den Stiel eine kreisrunde Aluminiumplatte P aufgeschraubt
von solchem Durchmesser (ca. 2,4 cm), daß sie den Schliff gerade verschließt. Der
darüber befindliche Hohlraum ist in bekannter Weise mit Stanniolkügelchen aus-
gefüllt. Durch den Schliff wird es leicht ermöglicht, die Kathode herauszunehmen
und abzuschmirgeln, wenn ihre Oberfläche durch längeren Gebrauch gelitten hat.
Dicht unterhalb der Kathode ist außen um das Rohr ein Ring R aus Kupferdraht
herumgelegt und durch einen außen herumgeführten Draht D mit der Kathode
leitend verbunden. Hierdurch werden Durchschläge durch die Glaswand, die er-
fahrungsgemäß an dieser Stelle bei zu großer Härte des Rohres leicht eintreten
können, ausgeschlossen. Einige cm unterhalb der Kathode befindet sich ein seit-
liches Ansatzrohr mit einem Hahn, welches zu einer Gaede-Quecksilberpumpe führt.
Die Anode A. besteht aus einem kleinen oben offenen, zylindrischen Aluminium-
topfe, der das Rohr gerade ausfüllt, und besitzt einen in die Glaswand ein-
geschmolzenen dünnen Platindraht als Zuleitung. Die Anode dient gleichzeitig als
Blende für den Kathodenstrahl und hat dazu mitten in ihrem Boden ein kreisrundes
Löchlein D von $\frac{1}{2}$ mm Durchmesser. In einem erweiterten Teile des Rohres be-
findet sich der Ablenkungskondensator C, der aus zwei rechteckigen 15 cm langen
und 4 cm breiten Aluminiumblechen von 1 mm Dicke besteht. Die Bleche werden
gehalten durch je zwei Aluminiumstäbe, die in 4 seitliche Ansatzröhren mit weißem
Siegelack eingekittet sind und zugleich als Zuleitungen dienen. Unterhalb des
Kondensators verjüngt sich das Rohr zunächst wieder, um schließlich in einen breiten
Glaszylinder überzugehen, der unten mit einem eben geschliffenen Flansch endigt.
Auf diesen Flansch ist der Leuchtschirm L wieder mit weißem Siegelack aufgekittet.
L ist eine 5 mm dicke Spiegelglasplatte, die auf der Oberfläche eine sehr dünne
durchscheinende Schicht eines Kalziumwolframatpräparates trägt, das unter der Be-
zeichnung „Wolframsaures Kalzium geglüht für Schirme“ von der Firma C. A. F. Kahl-
baum, G. m. b. H., Adlershof bei Berlin, bezogen wurde. Bei Kathodenstrahlen-
beleuchtung erstrahlt es sehr hell kornblumenblau und leuchtet kaum merklich
grünlich nach. Zum Aufbringen der Leuchtsubstanz wurde die Spiegelglasplatte in
eine photographische Schale mit Alkohol gelegt und dann aus einer Höhe von etwa
25 cm das Leuchtpulver durch ein sehr feines Gazesieb aufgestreut, bis eine gleich-
mäßige dünne Schicht von geeigneter Stärke entstanden war. Dies erforderte einiges
Probieren. Dann wurde die Platte vorsichtig herausgenommen und vor Staub ge-
schützt getrocknet. Die Schicht haftet dann genügend fest, bleibt aber natürlich
leicht verletzlich. Da der Leuchtfleck vorwiegend in der Durchsicht beobachtet
werden soll, muß der Schirm außerordentlich dünn sein, um maximale Lichtstärke
zu bekommen. Um den Kathodenstrahl auf einen ganz kleinen scharfen Fleck auf
L zu konzentrieren, ist das Rohr dicht unter A von einer „Striktionsspule“ S um-
geben. Sie enthält ca. 450 Windungen aus baumwollisoliertem Kupferdraht und
wird von einem Gleichstrom von etwa 2 Ampere durchflossen. Dieser muß regulier-
bar sein, da er sich der jeweiligen Härte des Rohres anzupassen hat. Die genaue
Justierung von S ist wichtig. Die Spule muß deshalb in jeder denkbaren Richtung
außer der Drehung um ihre eigene Achse verschiebbar und drehbar sein, was im
vorliegenden Falle durch ein geeignet konstruiertes kräftiges Gestell aus Schmiede-
eisen erreicht wird. So ist es möglich, auf L einen sehr hellen, kleinen, scharfen
Leuchtfleck zu erzielen, während der von der Anode zur Kathode fließende Strom
nur etwa $\frac{1}{10}$ Milliampere beträgt, was für das Rohr keineswegs eine erhebliche
Belastung bedeutet.

Um dem Leuchtfleck noch eine zweite von der durch das Feld von C hervor-
gerufenen unabhängige Ablenkung geben zu können, sind nach bekanntem Prinzip
an der verjüngten Stelle des Rohres unterhalb C rechts und links zwei in Serie

geschaltete Spulen S_1 und S_2 so angeordnet, daß sich ihre Magnetfelder addieren. Sie sitzen mit Reibung verschiebbar auf je einem Messingrohr M_1 und M_2 , das je von einer hölzernen Stütze H_1 und H_2 gehalten wird. Die Spulen werden bequemerweise so justiert, daß die durch sie hervorgerufene Ablenkung auf derjenigen des elektrischen Feldes von C genau senkrecht steht. Sie sind auswechselbar. Meist wurde ein Spulenpaar aus umsponnenen Kupferdraht von 1 qmm Querschnitt von zusammen $2,5 \Omega$ Widerstand benützt, das von Strömen der Größenordnung 0,1 A. durchflossen wurde.

Die ganze bisher beschriebene Anordnung war auf ein kräftiges Brett montiert und nach dem Vorbilde von H. Faßbender und G. Hupka¹⁾ so aufgestellt, daß die Achse des Rohres mit der Richtung des magnetischen Erdfeldes zusammenfiel. Nicht zu große Abweichungen von dieser Richtung lassen sich mit Hilfe der Spule S korrigieren.

Ist man auf eine Influenzmaschine als Hochspannungsquelle angewiesen, so ist die Einrichtung vielfach nicht sehr betriebssicher. Dies betonte kürzlich Brenzinger²⁾ und benützte deshalb eine wohl zuerst von A. W. Hull³⁾ zum Betriebe von Röntgenröhren verwandte Anordnung, die darin besteht, daß eine große Kapazität genügender Durchschlagsfestigkeit durch einen Hochspannungstransformator und ein in Reihe geschaltetes Glühventil immer im gleichen Sinne aufgeladen wird und dann einen dauernden hochgespannten Gleichstrom, der nur etwa $\frac{1}{10}$ Milliampere zu betragen braucht, an das Braunsche Rohr liefert. Wie bereits Hull betont, kann die Kapazität um so kleiner sein, je höher die Frequenz des den Transformator speisenden Wechselstromes ist. Der Verfasser konnte feststellen, daß sich bei zweitausend Perioden die Kapazität meistens ganz entbehren läßt, wenn nicht gerade Vorgänge einer ähnlichen Frequenz untersucht werden sollen. Man kommt dann mit folgender einfachen Schaltung aus:

Bild 3.

T ist der Hochspannungstransformator für Spannungen bis etwa 30 kV, dessen eine Klemme geerdet ist. Die isoliert aufgestellte Akkumulatorenbatterie B von 6 Volt heizt über den Regulierwiderstand RW die Kathode des Ventils V mit einem einmalig einzustellenden Strom von 5—7 Ampere je nach der Art des Ventiles, das von der Osram-Kommanditgesellschaft, Berlin N, Sickingerstraße 71, bezogen werden kann. FW ist ein Flüssigkeitswiderstand von etwa 10^7 Ohm, der das Braunsche Rohr vor Stromüberlastung schützt. Die Anode A des Rohres ist zu erden.

Man sollte zunächst vermuten, daß mit dieser Schaltung, bei der dem Rohre keineswegs eine konstante, sondern eine mit der Frequenz 2000 pulsierende Gleichspannung zugeführt wird, so daß auch kein konstanter Gleichstrom fließen kann, ein genügend homogener Kathodenstrahl nicht zustande kommt. Wenn dies so wäre, so müßte der Leuchtfleck des Rohres z. B. bei der Annäherung eines permanenten Magneten nicht nur abgelenkt, sondern zu einem Streifen auseinandergezerrt werden, so daß eine saubere Analyse seiner Bewegung unmöglich würde. Der Versuch zeigt aber, daß der Fleck in Größe und Gestalt merklich unverändert bleibt. Nur bei sehr genauer Betrachtung entdeckt man an beiden Rändern je einen ganz schmalen, sehr lichtschwachen Saum, der von einer ganz geringen Inhomogenität der Kathodenstrahlen herrührt. Dies stört jedoch durchaus nicht und gelangt beim Photographieren des Fleckes gar nicht zur Darstellung. Es ist offenbar so, daß

¹⁾ Phys. Zeitschr. 13, 559, 1912.

²⁾ Phys. Zeitschr. 22, 491, 1921.

³⁾ A. W. Hull, Phys. Rev. 7, 405, 1916.

das Braunsche Rohr ähnlich wie eine Funkenstrecke spannungsregelnd wirkt. Sobald die Zündspannung erreicht ist, findet bei weiterer Spannungssteigerung des Transformators im Rohr nur noch eine Stromzunahme statt, ohne daß sich das Kathodengefälle erheblich ändert. Die Geschwindigkeit der Kathodenstrahlen hängt daher

a

Bild 4.

b

im wesentlichen von der Gestalt der Röhre und dem in ihr herrschenden Gasdruck ab, nicht aber von der Klemmenspannung des Transformators. Daß es sich aber um einen periodisch unterbrochenen Kathodenstrahl handelt, sieht man sofort, wenn

a

Bild 5.

b

man durch gleichzeitiges Anlegen einer Wechselspannung an den Kondensator C und das Spulenpaar S_1, S_2 den Fleck Lissajoussche Figuren durchlaufen läßt. Diese bestehen dann nicht mehr aus einem glatten Kurvenzuge, sondern aus einer

a

Bild 6.

b

perlschnurartigen Punktfolge. Falls die Umschreibungsdauer einer Figur genau ein ganzzahliges Vielfaches der Periode der Kathodenstrahlunterbrechungen ist, scheinen die Punkte dem Betrachter still zu stehen, sonst wandern sie mehr oder weniger rasch die Kurve entlang, was zur Folge hat, daß auf einer photographischen Zeitaufnahme der Figur wieder ein glatter Kurvenzug erscheint. Beispiele von so aufgenommenen Figuren von 50periodigen Vorgängen sind in den Bildern 4 bis 11

a

b

Bild 7.

a

b

Bild 8.

a

b

Bild 9.

a

b

Bild 10.

a

b

Bild 11.

gegeben. In den Bildern 4a bis 11a sind die gleichen Figuren analysiert. Die Ablenkung in wagerechter Richtung ist dabei sinusförmig und durch das Magnetfeld der Spulen S_1 und S_2 erzeugt, während die senkrechte Ablenkung, die eine komplizierte Form hat, durch die Spannung am Kondensator C bewirkt ist. Ihr zeitlicher Verlauf kann also durch Analyse der Kurven ermittelt werden. Die in der Abbildung punktiert erscheinenden Stücke der Bilder 10 und 11 sind retuschiert, um sie reproduktionsfähig zu machen. Die Belichtungszeit betrug $1/10$ — $1/20$ Sekunden. Man sieht, daß bei diesen Aufnahmen die hochfrequente Unterbrechung des Kathodenstrahles durchaus nicht stört. Soll jedoch bei hochfrequenten Vorgängen die Kurve nur einmal überschrieben werden, so wird sich ein Ausgleichskondensator parallel zum Braunschen Rohr nicht entbehren lassen.

Bild 12

Bild 13.

Die Helligkeit des Leuchtfleckes ist groß genug, um bei nicht zu hohen Frequenzen auch nur einmalig überschriebene Kurven photographieren zu können. Es ist daher in bequemer Weise möglich, die zu untersuchende Spannung an C anstatt in Gestalt von Lissajousschen Figuren vielmehr so zu registrieren, daß die Abszissenachse der photographierten Kurve direkt der Zeit proportional wird. Man braucht dazu nach dem Vorbilde von Rogowski¹⁾, Brenzinger²⁾ und anderen nur dafür zu sorgen, daß die in Bild 1 gezeichneten Spulen S_1 und S_2 während der Beobachtungszeit von einem Strome durchflossen werden, der sich proportional der

Bild 14.

Bild 15.

Zeit ändert. Dann wird auch das Magnetfeld und damit die Ablenkung des Leuchtfleckes zeitproportional. Hierfür ist jedoch auch ein sinusähnlicher Strom geeignet, wenn man aus der ganzen Periode nur einen kleinen in der Nähe des Stromwechsels liegenden, nahezu gradlinigen Teil der Stromkurve herausgreift. Legt man dann außerdem die zu untersuchende Spannung an C an, so beschreibt der Fleck eine Kurve der gewünschten Art. Die Aufnahmen der Bilder 12—14 sind so hergestellt, daß eine zu untersuchende Wechselspannung von ungefähr 50 Perioden an C gelegt wurde, während ein sinusförmiger Wechselstrom von ungefähr 6 Perioden durch S_1 und S_2 floß. Die Amplitude der magnetischen Ablenkung wurde dabei so groß gewählt, daß der Leuchtfleck nur während des gradlinigen Teiles der Stromkurve im Gesichtsfeld des photographischen Apparates blieb. Trotzdem ist natürlich Momentbelichtung nötig, um ein zweimaliges Überschreiben der Kurve zu verhüten

¹⁾ Diese Zeitschrift 9, 115, 1920.

²⁾ l. c.

Bild 14, das eine 50periodige Wechselfspannung mit sehr starker 5. Oberfrequenz darstellt, ist für die Reproduktion retuschiert worden, desgleichen Bild 15, das den Spannungsverlauf zwischen den Sekundärklemmen eines größeren mit Gleichstrom und Quecksilberunterbrecher betriebenen Induktoriums darstellt.

Für solche Aufnahmen ist freilich eine sehr lichtstarke photographische Optik nötig (Blendenöffnung zu Bildweite = 1:4 bis 1:3). Eine solche wurde in der Weise improvisiert, daß vor einen gewöhnlichen kleinen Handapparat („Ica-Niclas“ mit „Novar-Anastigmat“, 1:6, 8, Foc. 12 cm, Plattenformat 6×9 cm) ein zweites sehr lichtstarkes Objektiv (Petzval-Objektiv) von 9 cm Brennweite gesetzt wurde, so daß die Bildweite erheblich verringert wurde, während die Blendenöffnung die gleiche blieb¹⁾. Wie man sieht, gelingt eine qualitativ richtige Veranschaulichung der Kurven so ganz gut. Für die quantitative Auswertung verdienen aber die Lissajousschen Figuren wegen ihrer größeren Exaktheit den Vorzug.

Wie zu Anfang mitgeteilt ist, war der Zweck der beschriebenen Anordnung die Analyse von Hochspannungen von der Größenordnung 100 kV. Natürlich kann man so hohe Spannungen nicht einfach an den Kondensator C des Braunschens Rohres legen. Dazu müssen sie auf eine Größenordnung von etwa 50 Volt reduziert werden. Wehnelt²⁾ benutzte dazu eine kapazitive Unterteilung, die in Bild 16 schematisch dargestellt ist. Dabei sind die Hochspannungsklemmen des Transformators

Bild 16.

H an zwei Metallplatten A und B geführt, die sich in solchem Abstände gegenüberstehen, daß ein Überschlag zwischen ihnen sicher ausgeschlossen ist. Die Platten bilden so einen Kondensator von einigen Zentimetern Kapazität. In der Mitte zwischen A und B befinden sich zwei weitere Kondensatorplatten C und D in nahem Abstände, die als Sonden dienen, um aus dem Gesamtfelde zwischen A und B einen kleinen, der Gesamtspannung proportionalen Teil herauszugreifen und dem Kondensator des Braunschens Rohres BR zuzuführen. Diese Schaltungsweise führte jedoch in vorliegendem Falle zu ungleichmäßigen Ergebnissen, da die Platten im Ablenkungskondensator des Braunschens Rohres leicht statische Ladungen annahmen, die nicht abfließen konnten und allerlei Verzerrungen der Kurven in ganz unkontrollierbarer und unreproduzierbarer Weise zur Folge hatten. Die Schaltung mußte deshalb so abgeändert werden, daß die störenden Ladungen abfließen konnten. Bewährt hat sich folgende, in Bild 17 dargestellte Anordnung³⁾:

Die eine Hochspannungsklemme von H war geerdet. Die andere führte an den kleinen Kondensator C_1 , der aus zwei mit Stanniol überzogenen kreisförmigen Holzplatten von 20 bzw. 10 cm Durchmesser bestand, die sich in Abständen bis zu 56 cm verschiebbar und isoliert gegenüberstanden. Die Platten waren 3 cm dick und an den Rändern abgerundet, um das Sprühen zu unterdrücken. In Reihe mit C_1 befand sich ein Plattenkondensator C' von ca. 6000 cm Kapazität, dessen zweite Belegung geerdet war. Parallel hierzu lag der Kondensator C des Braunschens Rohres, dessen eine Belegung somit ebenfalls geerdet war. Von der anderen Belegung wurden die störenden Ladungen durch einen Flüssigkeitswiderstand R von $3 \times 10^6 \Omega$

¹⁾ Diesen Ausweg aus einer unter den heutigen Verhältnissen nicht unerheblichen Schwierigkeit verdankt der Verfasser Herrn Dr. A. Wetthauer, der auch das Petzval-Objektiv aus seinem Privatbesitz freundlichst zur Verfügung stellte. Hierfür sei ihm auch an dieser Stelle gedankt.

²⁾ l. c.

³⁾ Anmerkung bei der Korrektur: Wie dem Verfasser nachträglich bekannt wurde, ist die Beseitigung der störenden Ladungen durch einen hohen Widerstand im Prinzip bereits von C. Samson (Dissertation, Berlin, 1918) benützt worden. Der Einfluß dieser Schaltung auf die Form der Kurven ist von Samson jedoch nicht erörtert.

zur Erde abgeleitet. Die Hochspannung lag also an einem System vom Schema des Bildes 18, wo C_2 den Wert $C' + C$ hat. Maßgebend für die Bewegung des Lichtfleckes der Braunschen Röhre ist die Spannungsdifferenz zwischen den Punkten P_1 und P_2 . In welchem Verhältnis diese zu der gesuchten Gesamtspannung steht, ist mit Hilfe der symbolischen Darstellung durch komplexe Größen wie folgt zu berechnen:

Die Gesamtspannung sei $\mathfrak{E}$, die Spannung zwischen P_1 und P_2 sei $\mathfrak{E}_1$. Dann verhält sich $\mathfrak{E}_1$ zu $\mathfrak{E}$ wie der Widerstandsoperator der Elemente C_2 und R in Parallelschaltung, welcher w_1 genannt sei, zu dem Widerstandsoperator des gesamten Systemes w . w_1 berechnet sich aus

$$\frac{I}{w_1} = \frac{I}{R} - \frac{\omega C_2}{j} = \frac{j - R \omega C_2}{R j}$$

zu

$$w_1 = \frac{R j}{j - R \omega C_2} = \frac{R}{1 + j R \omega C_2}.$$

Der Widerstandsoperator des gesamten Systemes ist:

Bild 17.

Bild 18.

$$w = w_1 - \frac{j}{\omega C_1} = \frac{R}{1 + j R \omega C_2} - \frac{j}{\omega C_1} = \frac{R \omega C_1 + R \omega C_2 - j}{\omega C_1 (1 + j R \omega C_2)}.$$

Da nun $\frac{\mathfrak{E}_1}{\mathfrak{E}} = \frac{w_1}{w}$ ist, folgt:

$$\mathfrak{E}_1 = \mathfrak{E} \cdot \frac{w_1}{w} = \mathfrak{E} \cdot \frac{\omega C_1 (1 + j R \omega C_2)}{R \omega (C_1 + C_2) - j} \cdot \frac{R}{(1 + j R \omega C_2)} = \mathfrak{E} \cdot \frac{R \omega C_1}{R \omega (C_1 + C_2) - j}$$

$$\mathfrak{E}_1 = \mathfrak{E} \cdot \frac{R \omega C_1 [R \omega (C_1 + C_2) + j]}{R^2 \omega^2 (C_1 + C_2)^2 + 1}.$$

Der reelle Teil des komplexen Bruches ist

$$a = \frac{R^2 \omega^2 C_1 (C_1 + C_2)}{R^2 \omega^2 (C_1 + C_2)^2 + 1}.$$

Der imaginäre Teil ist

$$b j = \frac{R \omega C_1}{R^2 \omega^2 (C_1 + C_2)^2 + 1} \cdot j.$$

Hiernach findet man die Phasenverschiebung δ zwischen $\mathfrak{E}_1$ und $\mathfrak{E}$ aus

$$\operatorname{ctg} \delta = \frac{a}{b} = R \omega (C_1 + C_2).$$

Das Verhältnis der Amplituden wird

$$\frac{E_1}{E} = \sqrt{a^2 + b^2} = \sqrt{\frac{(R \omega C_1)^2 (\operatorname{ctg}^2 \delta + 1)}{(\operatorname{ctg}^2 \delta + 1)^2}} = \frac{R \omega C_1}{\sqrt{\operatorname{ctg}^2 \delta + 1}},$$

oder da $R \omega = \frac{\operatorname{ctg} \delta}{C_1 + C_2}$ ist

$$\frac{E_1}{E} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot \frac{\operatorname{ctg} \delta}{\sqrt{\operatorname{ctg}^2 \delta + 1}} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot \cos \delta.$$

Im vorliegenden Falle ist aber C_1 nur etwa 1/100 von C_2 , so daß man einen zu vernachlässigenden Fehler begeht, wenn man setzt:

$$\operatorname{ctg} \delta = R \omega C_2 \quad \text{und} \quad \frac{E_1}{E} = \frac{C_1}{C_2} \cdot \cos \delta.$$

Ist das Produkt $R \omega C_2$ sehr groß, so wird δ nahezu 0. $\mathcal{E}_1$ und $\mathcal{E}$ sind also in Phase. $\cos \delta$ wird nahezu 1. Das Amplitudenverhältnis wird mithin von ω unabhängig und einfach gleich dem Verhältnis der Kapazitäten C_1 und C_2 . Dies ist der ideale Fall, der z. B. bei unendlich großem R eintreten würde. Ist aber $R \omega C_2$ kleiner, so nähert sich δ immer mehr dem Wert $\frac{\pi}{2}$, d. h. die Phasenverschiebung zwischen $\mathcal{E}_1$ und $\mathcal{E}$ wächst. Außerdem wird sie von ω abhängig in dem Sinne, daß sie mit abnehmendem ω größer wird. Infolgedessen wird auch $\frac{E_1}{E}$ von ω abhängig, und zwar so, daß es mit abnehmendem ω ebenfalls abnimmt. Dies bedeutet, daß die Oberfrequenzen mit erheblich vergrößerter Amplitude und stark verschobener Phase im Vergleich zur Grundfrequenz erscheinen, so daß das Kurvenbild stark entstellt wird. Man wird sich also möglichst dem Idealfalle anzunähern suchen. In der Praxis ist man jedoch zu einem Kompromiß gezwungen, indem nämlich ein großes C_2 ein kleines R bedingt, da die störenden Ladungen von einer großen Kapazität langsamer abfließen als von einer kleinen.

Es soll nun für den vorliegenden praktischen Fall, wie er auf S. 135 beschrieben wurde, Art und Größe der möglichen Verzerrungen ermittelt werden. Hier ist also einzusetzen:

$$C_2 = 6000 \text{ cm} = 6,67 \cdot 10^{-9} \text{ F.} \quad R = 3 \cdot 10^6 \Omega.$$

$$\omega = 2 \pi \cdot 50 = 314.$$

$$R \omega C_2 = \operatorname{ctg} \delta = 6,28. \quad \delta = 9^\circ 3'. \quad \cos \delta = 0,988.$$

Die Gesamtspannung eilt also für den Fall der Grundfrequenz bei 50 Perioden der Spannung am Ablenkungskondensator um $9^\circ 3'$ nach. Das Amplitudenverhältnis unterscheidet sich von dem idealen Werte $\frac{C_1}{C_2}$ durch den Faktor 0,988, erscheint also um etwas über 1% zu klein.

Für die dritte Oberfrequenz dagegen wird

$$\omega = 942. \quad R \omega C_2 = \operatorname{ctg} \delta = 18,84. \quad \delta = 3^\circ 2'. \quad \cos \delta = 0,999.$$

Die Nacheilung ist hier also schon erheblich geringer als bei der Grundfrequenz. Die Phasenverschiebung gegenüber der Grundfrequenz beträgt $6^\circ 1'$. Das Amplitudenverhältnis erreicht praktisch bereits den Idealwert. Für höhere Oberfrequenzen wird die Phasenverschiebung von $\mathcal{E}_1$ gegen $\mathcal{E}$ noch geringer. Die Phasenverschiebung der Oberfrequenz gegen die Grundfrequenz dagegen nimmt zu bis zu höchstens $9^\circ 3'$.

Hieraus ergibt sich, daß wir in der Tat für den Fall der Frequenz 50 noch mit einer geringen Verzerrung der Kurven zu rechnen haben, die weniger die Amplituden der Oberfrequenzen im Vergleich zur Grundfrequenz, als vielmehr ihre Phasenverschiebung betrifft, die bis zu $9^\circ 3'$ betragen kann. Für höhere Frequenzen wird diese Verzerrung immer geringer. Für den hier vorliegenden Zweck der Analyse der Spannung am Röntgenrohr sind so geringe Entstellungen der Kurvenform meist ganz belanglos, da so geringe Verschiedenheiten der Form der Spannungs-kurve auf die Quantität und Qualität der erzeugten Röntgenstrahlung keinen nachweisbaren Einfluß ausüben. Untersuchungen über diesen Gegenstand sollen später an anderer Stelle mitgeteilt werden.

Zusammenfassung.

In vorstehender Arbeit wird eine Ausführungsform des Braunschen Rohres beschrieben, die eine sehr scharfe und lichtstarke Wiedergabe von Wechselspannungskurven ermöglicht. Es wird eine Schaltung angegeben, die die Analyse von hohen Wechselspannungen von 100 kV und mehr gestattet und speziell geeignet ist, den Spannungsverlauf an Röntgenröhren zu untersuchen.