

man dies doch natürlich bei gleicher aufgewendeter elektrischer Energie tun, d. h. es müssen entweder Strom oder Spannung um (1 — Korrektionsfaktor) erhöht werden.

Dann lauten die Betriebsbedingungen:

		Röhrenspannung Scheitelwert	Milliampere Drehspuleninstr.
I. Gleichspannung		E	i_0
II. Sinusspannung			
1. Rohr mit konstantem „R“	a_1	E	$i_0/0,785$
oder	b_1	$E/0,785$	i_0
2. Rohr mit konstantem „i“	a_2	E	$i_0/0,637$
oder	b_2	$E/0,637$	i_0

(Abb. 3.)

In nachstehender Kurve sind die Strahlungsintensitäten $J\lambda$ als Funktion der Wellenlänge bei den früher bezeichneten 5 Betriebsbedingungen für eine Spannung von 60 kV dargestellt. Darf ich wiederholend fortfahren:

Bezogen auf Gleichspannung, belasten Apparate mit Sinusspannung bei gleicher Scheitelspannung und gleichem, vom Milliampereometer angezeigten Röhrenstrom die Röntgenröhre weniger.

Um eine möglichst hohe Strahlenausbeute bei gegebener Belastungsmöglichkeit einer Röntgenröhre zu erzielen, darf man bei Apparaten mit Sinusspannung, d. s. Halbwellenapparat und Vierventilapparat, die durch diese Apparattypen bedingte geringe Röhrenbeanspruchung nicht durch die Stromstärke kompensieren, sondern es muß die Röhrenspannung erhöht werden. Man darf je nach Röhrensättigung bis auf den 1,27—1,57fachen Wert der Gleichspannung gehen, wenn dies die Röhre ohne Durchschlagsgefahr aushält, was aber bis 110 kVmax bei Diagnostik und jetzt schon 230 kVmax bei Therapie- und Materialuntersuchungsröhren der Fall ist. Man erhält so eine härtere Strahlung mit einem geringeren Anteil von weichen Strahlen als bei Gleichspannung.



Abb. 3.

Das Intensitätsmaximum dieser Strahlung steigt bei der ideal gesättigten Röhre, deren Anwendung schon wegen der vollkommen unabhängigen Regulierung von Röhrenstrom und Röhrenspannung erwünscht ist, auf zirka das 1,5fache des mit Gleichspannung erzeugten. Da außerdem bei den Apparaten mit Sinusspannung (Halbwellenapparat, Vierventilapparat) geringe Gasausbrüche im Röntgenrohr für ihre Lebensdauer nicht von so gefährlichem Einfluß sind, wie schon Herr Jona in seiner Rede anmerkte, die Spannungsabfälle dieser Apparate sich aber kleiner halten als die Apparate mit rotierenden Gleichrichtern, die ein geräuschloses Arbeiten nicht ermöglichen, wozu noch die Vorteile des geringen Anteiles an weicher Strahlung im Spektrum bei der für gleiche Röhrenbelastung erforderlichen Erhöhung der Spannung kommen, zeigen diese Apparate einen erheblichen Vorteil im Dauerbetrieb (Durchleuchtung, Therapie) den anderen Apparattypen gegenüber. Für den kurzzeitigen Betrieb mit hoher Belastung gilt ebenfalls das oben Gesagte, doch spielt außerdem die zeitliche Verteilung der Belastung auf den Brennfleck eine wichtige Rolle, wodurch für kleine und mittlere Belastung der Halbwellenapparat, für große und extreme Leistungen die Vierventilapparat am richtigen Platze erscheint.

(76.) A. Bouwers (Eindhoven): Eine Metallröntgenröhre mit drehbarer Anode.

Der Röntgenologe verlangt für seine Aufnahmeröhren einen möglichst kleinen Brennfleck und eine möglichst große Ausbeute, um einerseits scharfe Bilder zu bekommen und andererseits in möglichst kurzer Zeit seine Aufnahmen machen zu können. Es läßt aber nun einmal die Natur für jeden Brennfleck nur eine gewisse maximale Belastung zu, welche von der Oberfläche des Brennflecks, von der Belastungszeit und auch von der Anode abhängt. Eine Belastung von 200 Watt pro mm² Brennfleckoberfläche während einer Sekunde ist bei einer richtig konstruierten Anode aus Wolfram und Kupfer zulässig, aber eine viel höhere Belastung hat unvermeidlich erhebliche Verdampfung oder sogar Schmelzen der Anode zur Folge. Belastungserhöhung durch Vergrößerung des Brennflecks liefert keinen wirklichen Vorteil, weil ein großer Brennfleck wegen der Bildschärfe einen größeren Abstand fordert und demzufolge eine entsprechend größere Belastung. Man kommt nur weiter, wenn man die Anode beweglich macht, und zwar so, daß der Brennfleck sich nicht mitbewegt, z. B. indem man die Anode rotieren läßt.

Die Idee einer beweglichen Anode ist keinesfalls neu und war schon im Jahre 1897 bekannt. In „La Revue Scientifique et Industrielle de l'année 1898—99“ schon wir in dem Buch von J. L. Breton „Les Rayons cathodiques et Rayons X“ schon eine Röhre beschrieben, welche während der Aufnahme rotiert, „de façon à changer constamment le point d'émission qui, par suite, n'a pas le temps de s'échauffer d'une façon dangereuse“. Nachher sind in verschiedenen Ländern eine Anzahl Patente angemeldet, mit Beschreibungen von Röhren mit rotierenden Anoden, und auf dem Zweiten Internationalen Kongreß in Stockholm im Jahre 1928 wurde von E. Pohl das Modell einer Röhre mit allerdings langsam beweglicher Anode ausgestellt.

Es ist Verfasser und seinen Mitarbeitern im Laufe des letzten Jahres gelungen, eine Röhre mit rotierender Anode zu bauen, welche auf jeden beliebigen Röntgenapparat ohne irgendwelchen Hilfsapparat angeschlossen werden kann und Belastungen zuläßt, welche ein Vielfaches sind von denen, welche man einer stillstehenden Anode mit derselben Brennfleckoberfläche zumuten darf. Das Prinzip der „Metalix“-Röhre war bei der Konstruktion, wie aus der Beschreibung hervorgehen wird, von wesentlicher Bedeutung.

Bevor ich aber zu einer Beschreibung der Röhre übergehe, möchte ich zuerst einige theoretische Erwägungen erwähnen betreffs der Drehungsgeschwindigkeit und der speziellen Konstruktion, welche für eine rotierende Anode erforderlich sind. Besonders hinsichtlich der Bewegungsgeschwindigkeit hat man sich bei früheren Konstruktionselementen oft geirrt. Die vielleicht nahe liegende Auffassung, daß man, um eine dreifache Belastbarkeit zu erhalten, nur zu veranlassen hat, daß die Anode sich während der Aufnahme über einen Abstand von dreimal die Brennfleckbreite bewegt, ist schon gar nicht der Wahrheit gemäß. Wir werden zeigen, daß man mit einer derartigen Geschwindigkeit schon außerordentlich wenig gewinnt.

Es handelt sich bei der drehenden Anode immer um Belastungszeiten von ganz kurzer Dauer, und dadurch sind wir in der Lage, die während der Belastung entstehende Temperatur in ziemlich einfacher Weise zu berechnen. Es sei t die Belastungszeit, x die Tiefe der Anode hinter dem Brennfleck, T die Temperatur und W die Anzahl Watts pro mm^2 Brennfleckoberfläche, dann lernt die Rechnung¹⁾, daß

$$T = CW \sqrt{t}.$$

Hierin ist C eine Konstante, die von der Wärmeleitungsfähigkeit und Wärmekapazität des Anodenmaterials abhängt. Für eine Anode aus Kupfer mit ganz dünner Wolframscheibe dürfte man annähernd setzen:

$$T = 40 W \sqrt{t}.$$

Daß die Temperatur T nicht proportional mit der Zeit t steigen kann, sondern nur mit der Wurzel aus der Zeit, ist vielleicht auf den ersten Blick nicht einleuchtend; man kann es aber einsehen, wenn man bedenkt, daß die Wärme in der Anode bei höherer Temperatur tiefer eindringt. Die gesamte Wärmemenge, welche dem Material zugeführt wird, ist mit der Belastungszeit proportional und andererseits auch mit dem Produkte von Temperatur und mittlerer Eindringungstiefe der Wärme. Wenn man einsieht, daß anfangs diese Eindringungstiefe wieder proportional mit der Temperatur sein muß, so ist deutlich, daß T^2 mit t proportional ist oder T mit $\sqrt{t}$.

Man muß also die Belastungszeit viermal kleiner machen, um die Temperatur auf die Hälfte zurückzubringen, neunmal, um die Temperatur auf ein Drittel zu reduzieren usw.

Was geschieht nun bei der drehenden Anode?

Wir denken uns einfachheitshalber die Anode stillstehend und den Brennfleck bewegend über den Anodenspiegel, und zwar ein rechteckiger Brennfleck, bewegend von links nach rechts, wie in Abb. 1 angedeutet. Wenn der Brennfleck sich während der Aufnahmezeit über einen Abstand gleich n -mal

¹⁾ Da im ersten Augenblicke nur Wärmeabführung in einer Richtung stattfindet, lautet die Differentialgleichung einfach:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{k}{c} \frac{d^2 T}{dx^2}$$

dessen Lösung mit Rücksicht auf die unserem Problem angepaßten Randbedingungen und für $t < 0,05$ Sekunden lautet:

$$T = \frac{2Q}{\sqrt{kc\pi}} \sqrt{t}.$$

worin wie üblich Q die Wärmemenge pro cm^2 pro Sekunde und c und k bzw. Wärmekapazität und Wärmeleitungsfähigkeit bedeuten. Vgl. auch A. Bouwers, Über den Temperaturverlauf an der Anode einer Röntgenröhre, „Zeitschr. techn. Phys.“ 1927, 8, 271. (Der Faktor 2 ist in der entsprechenden Formel dort irrtümlicherweise ausgefallen).

sein Durchmesser (in der Bewegungsrichtung) verschiebt, so ist es klar, daß an jeder Stelle der durchlaufenen Bahn nur ein n -ter Teil der Zeit belastet wurde. Demzufolge wurde die erreichte Temperatur um ein Faktor $\sqrt{n}$ verkleinert.

In Abb. 1 stellt die Kurve 1 die Temperatur vor, wie sie wächst bei ruhender Anode, und Kurve 2 die Temperatur bei bewegender Anode mit derselben Belastung, und zwar mit einer Geschwindigkeit von 16mal die Brennfleckbreite während der Aufnahmezeit. Die Temperatur ist also auf $\frac{1}{4}$ des Maximalwertes T_1 reduziert. Es ist nur die linke Seite des nach rechts bewegenden Brennflecks, welche diese Temperatur erhält, die rechte Seite bleibt fortwährend kalt.

Bleiben wir bei Abb. 1, so ist es klar, daß eine vierfache Belastung bei drehender Anode die Temperatur 4, bei ruhender Anode die Temperatur 3 hervorrufen würde. Annehmend, daß die Temperatur T_1 der höchst zulässigen Temperatur (etwa 3000°C) entspricht, ist diese vierfache Belastungsvergrößerung also gerade erlaubt.

Wir sehen also, daß, wenn man die Belastbarkeit mit Hinsicht auf einer stillstehenden Anode vervielfachen will, die Anode während dieser kurzen Zeit sich so schnell bewegen muß, daß mindestens

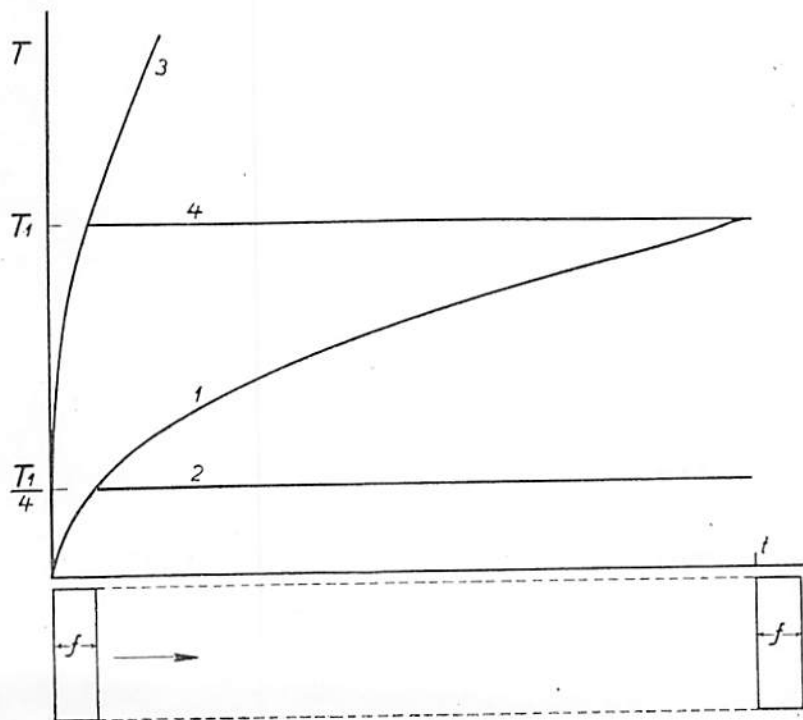


Abb. 1.

sechzehnmal die Brennfleckbreite durchlaufen wird. Für eine Verzehnfachung müßte die Geschwindigkeit so groß sein, daß die Brennfleckbreite mehr als hundertmal während der Aufnahmezeit durchlaufen würde, im allgemeinen für eine p -fache Verbesserung p^2 -mal. Und diese Geschwindigkeiten sind noch untere Grenzen, denn durch verschiedene Nebenumstände müssen sie in Wirklichkeit noch größer sein. Es breitet z. B. die Wärme sich nicht nur hinter dem Brennfleck, sondern auch einigermaßen in seitlicher Richtung aus, so daß bei Verschiebung der Anode nicht eine vollkommen kalte, sondern eine schon einigermaßen vorgewärmte Fläche zur Verfügung kommt. Auch geschieht nach etwas längerer Zeit die Temperaturzunahme weniger schnell als mit $\sqrt{t}$.

Aber weiter, und das ist gewöhnlich wichtiger, gelten die Berechnungen für homogene, nicht pulsierende Belastungen, während in der Praxis oft pulsierende Belastungen verwendet werden. Es ist leicht einzusehen, daß das Pulsieren der Belastung veranlaßt, daß die Temperatur höher wird, als bei gleichmäßiger Belastung der Fall sein würde, gleichfalls bei ruhender als bei rotierender Anode. Dieser Effekt ist aber bei rotierender Anode erheblich größer als bei ruhender Anode. Dies hängt damit zusammen, daß die Temperatur sich bei ruhender Anode während der Belastung fortwährend erhöht, bei drehender Anode demgegenüber nur mit dem Momentanwert der Belastung auf und ab geht. Denn eine Belastung braucht nur so lange zu dauern, als der Brennfleck braucht, um sich über einmal ihre

Breite zu verschieben, und schon hat die Anode (auf der linken Seite des Brennflecks) die entsprechende Temperatur angenommen. Man kann das durch Betrachtung der Abb. 1 leicht einsehen.

Bei Belastung mit normalem Wechselstrom ist der Momentanwert der Belastung maximal etwa 1,5mal den Mittelwert und wird also die höchste Temperatur bei rotierender Anode auch ungefähr 1,5mal diejenige sein, die bei gleichmäßiger Belastung mit derselben Energie entstehen würde. Die pulsierende Belastung verlangt also mehr als die doppelte Drehungsgeschwindigkeit. Bei Belastung

mit Drehstrom ist der Maximalwert etwa 10 % höher als der Mittelwert und deshalb die extra erforderliche Drehungsgeschwindigkeit etwa 20 %.

Zusammenfassend finden wir also, daß, um eine p malige Verbesserung zu erhalten, die Drehungsgeschwindigkeit so schnell sein muß, daß während der Aufnahme der zurückgelegte Weg beträgt:

- a) bei vollkommen gleichmäßiger Belastung mindestens p^2/f mm,
- b) bei Belastung mit Drehstrom mindestens $1,2 p^2/f$ mm,
- c) bei Belastung mit gewöhnli-

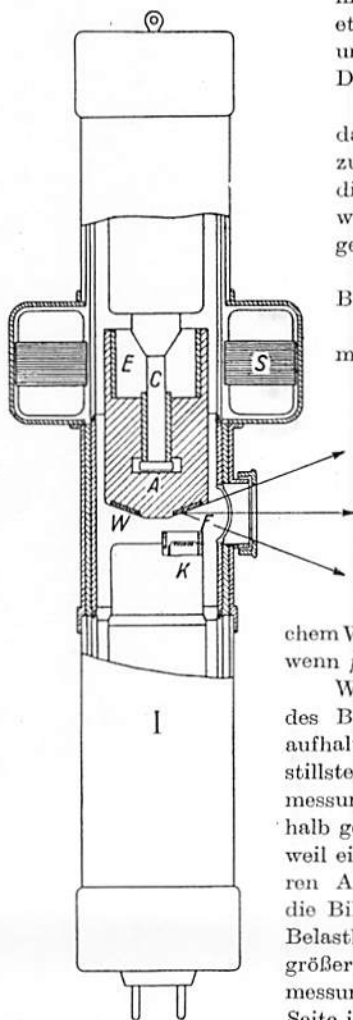
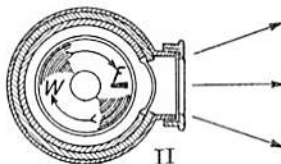


Abb. 2.



chem Wechselstrom mindestens $2,3 p^2/f$ mm, wenn f die Breite des Brennflecks ist.

Wir wollen uns bei den Abmessungen des Brennflecks noch einen Augenblick aufhalten, ebenso wie bei der Form. Bei stillstehenden Anoden spielen die Abmessungen des Brennflecks, wenn innerhalb gewisser Grenzen, keine große Rolle, weil ein größerer Brennfleck einen größeren Abstand fordert mit Hinsicht auf die Bildschärfe und deshalb eine größere Belastbarkeit hat, und zwar gerade soviel größer, als er wegen seiner größeren Abmessungen vertragen kann. An der kleinen Seite ist aber einem zweckmäßigen Brennfleck eine Grenze gesetzt, u. a. durch das Auftreten der „Verzerrung“¹⁾. Bei der

drehenden Anode hat aber ein kleiner Brennfleck prinzipielle Vorteile einem großen gegenüber, weil bei einer selben Drehungsgeschwindigkeit die Verbesserung, welche man erhält, um so größer ist, je nachdem der Brennfleck einen kleineren Durchmesser hat. Wo man diese Grenze setzen soll, hängt davon ab, ob man kürzeren Zeiten oder größerer Bildschärfe den meisten Wert beilegt und ob man die „Verzerrung“ mehr oder weniger für beschwerlich hält. Der zweckmäßigste Durchmesser wird aber im Falle eines „Strichfokus“ gewiß ungefähr 1,5 à 2 mm sein, wobei im Vergleich mit Röhren mit stillstehender Anode sowohl an Bildschärfe als an Zeit gewonnen wird.

Was die Form des Brennflecks betrifft, so ist für die rotierende Anode der „Strichfokus“ gewiß die günstigste. Denn abgesehen von den übrigen Vorteilen kann man hierdurch eine kleine Abmessung in der Drehrichtung erhalten, wodurch diese die größte Ausbeute hat. Bei einem „Strichfokus“ von $1,5 \times 6 \text{ mm}^2$ wird eine bestimmte Drehungsgeschwindigkeit mehr Effekt haben als die doppelte Ge-

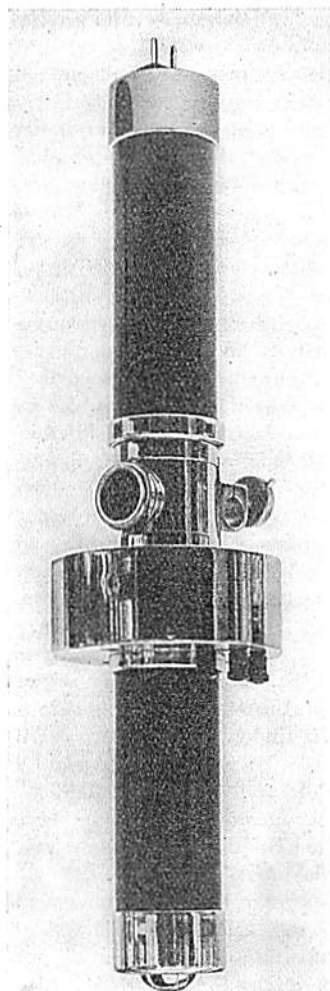


Abb. 3.

¹⁾ A. Bouwers, Der Brennfleck einer Röntgenröhre und die Belastbarkeit. Fortschr. Röntgenstr. 40,2, S. 284. 1929.

schwindigkeit bei einem „Rundfokus“, von über 3 mm Durchmesser, obwohl letzterer doch einen Durchmesser von mehr als 3 mm haben muß, um dieselbe Belastung ertragen zu können. Wir sehen hier also einen ganz neuen Vorteil des „Strichfokus“ auftreten.

Wir wollen uns hier nicht weiter mit theoretischen Betrachtungen befassen, sondern ziehen es vor, an der Hand der Abbildung eine Beschreibung zu geben von der von uns konstruierten Röhre mit rotierender Anode.

In der Röhre erkennt man die allgemeinen Züge der „Metalix“-Röhre mit Metall-Mittelstück aus Chromeisen, woran unmittelbar die Glaszylinder zur Isolation der Kathode und Anode angeschmolzen sind, ebenso wie ein Glasfenster zum Durchlassen der Strahlen. Um dieses Mittelstück herum ist ein Bleimantel gelegt, welcher den Strahlenschutz garantiert. Die Anode *A* aus Kupfer mit einer kegelförmig gestalteten Wolframscheibe *W* ist drehbar um die Achse *C* angeordnet. *S* ist das Gehäuse eines Drehstrommotors, das mit dem Mittelstück der Röhre in metallischer Verbindung steht. Hierdurch ist erzielt, daß man diesen Motor auf ein beliebiges Netz anschließen kann, denn für nicht zu hohe Spannungen kann immer ohne Nachteile die Mitte der „Metalix“-Röhre geerdet werden. Das Drehfeld des Stators induziert in das Kupfer des Anodenkörpers Wirbelströme, wodurch die Anode sich dreht, wenn die Drehspannung angelegt wird. Es bilden Stator und Anode zusammen einen sogenannten Induktionsmotor. Damit möglichst viele Kraftlinien das Kupfer der Anode durchdringen, ist in den Anodenkörper der Eisenzylinder *E* montiert und der Luftspalt zwischen diesem Eisenzylinder und den Polschuhen des Stators möglichst klein gestaltet. Von größter Bedeutung ist hierbei wieder die Tatsache, daß der Mittelteil der Röhre geerdet ist, denn dadurch hat auch das Glas in der unmittelbaren Nähe dieses Metallteils nur eine sehr niedrige Spannung, und konnte man sich mit den Polschuhen dem Glas der Röhre auf etwa 1 mm nähern. Es wäre eine derartige Lösung bei Glasröhren kaum denkbar.

Die Abbildung zeigt, wie die Kathode exzentrisch angeordnet ist. Der Brennfleck, ein Strichfokus, fällt, wie es aus der Abbildung hervorgeht, in der Richtung der erzeugenden Linie des von der Anodenoberfläche gebildeten Kegelmantels. Es ist, wie Abb. 2 II zeigt, der Brennfleck *F'* etwas trapezförmig, und zwar so, daß der Durchmesser nach außen ungefähr proportional mit dem Radius zunimmt. Demzufolge ist die Drehungsgeschwindigkeit relativ zum Brennfleckdurchmesser überall dieselbe.

Der mittlere Durchmesser der Brennfleckbahn beträgt in den bis jetzt konstruierten Röhren ungefähr 40 mm, der mittlere Brennfleckdurchmesser ungefähr 2,2 mm und die Drehungsgeschwindigkeit 20 Touren pro Sekunde.

Die Verbesserung gegenüber stillstehenden Anoden ist nach dem Obenstehenden hieraus leicht zu bestimmen. Nehmen wir z. B. eine Aufnahmezeit von $\frac{1}{25}$ Sekunde, so hat sich die Anode während der Aufnahmezeit gerade einmal gedreht, so daß der zurückgelegte Weg $\pi \times 40 \text{ mm} = 125 \text{ mm}$ beträgt. Wir finden also die Verbesserung *p* bei Drehstrom aus $1,2 p^2 f = 56$, also $p = \text{rund } 6,5$.

Es wurde eine Anzahl Röhren von der beschriebenen Konstruktion während längerer Zeit geprüft und zwar hauptsächlich mit Drehstrombelastung. Es zeigte sich dabei, daß wir jetzt in der Tat eine ungefähr sechsfache Verbesserung gegenüber stillstehenden Anoden erreichten. Eine Röhre mit einer Brennfleckoberfläche von ungefähr 15 mm^2 hielt auch auf die Dauer Belastungen von 0,1 Sekunden mit 30 kW leicht aus.

Ein besonders schweres Problem bei der Konstruktion dieser Röhre war die Lagerung in Vakuum, wo selbstverständlich jede Schmierung unmöglich war. Es gelang aber durch geeignete Wahl der Metalle, selbstschmierende Gleitlager zu konstruieren, welche bisher sehr befriedigt haben.

Der Anodenkörper besteht aus einem schweren Kupferklotz mit genügender Wärmekapazität, um die Energie von etwa fünfzig Aufnahmen hintereinander in sich zu bergen, bevor er zu heiß wird. Die Abkühlung geschieht teilweise durch Strahlung, während auch der in den „Metalix“-Röhren übliche Gasdruck (Wasserstoff oder Helium) hierbei eine wichtige Rolle spielt. Es sind dadurch auf die Dauer bei den jetzigen Röhren etwa 20 Aufnahmen pro Stunde erlaubt. Wenn nötig ist diese Zahl aber im Prinzip erheblich aufzuführen.

Eine Röhre mit drehender Anode wurde vorgeführt (Abb. 3) und außerdem eine Anzahl mit dieser Röhre gemachten Bilder.

Natuurkundig Laboratorium, N. V. Philips Gloeilampenfabrieken, Eindhoven (Holland).

Aussprache zu Vortrag 76.

Chantraine (Betzdorf-Sieg): Dr. Bouwers hat mir liebenswürdigerweise eine Röhre mit drehbarer Anode zur Verfügung gestellt und ich habe bereits über 200 Aufnahmen mit ihr gemacht. Der Götze-brennfleck der Röhre war leider nicht gut geraten. Der Brennfleck ist $2\frac{1}{2} \text{ mm}$ breit und ungefähr so lang wie breit. Außerdem ist er ungleichförmig belegt. Bei gleichförmiger Belegung würde er höchstens $1\frac{1}{2} \text{ mm}$ breit sein. Trotzdem hielt die Röhre bei 38 kV Gleichspannung 600 mA $\frac{1}{10}$ Sekunde lang über 200 mal aus, ohne daß der Brennfleck die mindeste Spur von Aufrauung zeigte. Der Brennfleck leuchtet