

gen, die sich den Fällen 3 und 4 annähern, ist also noch eine erhebliche Verbesserung bei Nachbeschleunigungsanordnungen zu erhoffen. Eine in dieser Richtung erfolgreich durchgeführte Entwicklung läßt die Anwendung auch bei magnetisch abgelenkten Röhren lohnend erscheinen, wenngleich hier der Aufwand an ablenkendem Strom bei Erniedrigung der Strahlgeschwindigkeit im Ablenkraum nicht mit $1:U$, sondern $1/\sqrt{U}$ fällt.

Zusammenfassung.

Während Anordnungen vom Typ des Schellergitters das Auflösungsvermögen nur linear mit U_1/U_0 steigern, kann man durch Nachbeschleunigungsfelder in Plattennähe eine zusätzliche Steigerung erreichen. Im Falle einer sphärischen plattennahen Doppelfläche wächst das Auflösungsvermögen mit $(U_1/U_0)^{2/3}$.

Über das Auftreten von Röntgenstrahlen bei Braunschener Röhren.

Von Hans Werner Paehr.

Inhalt: Bei Fernsehprojektionsröhren treten wegen der hohen Anodenspannung Röntgenstrahlen auf, über deren Messungen hier berichtet wird. Aus den Meßergebnissen werden Schlüsse gezogen, welche Vorsichtsmaßnahmen beim Betrieb solcher Röhren getroffen werden müssen.

Um mit Projektionsröhren Bilder zu erzeugen, die in bezug auf Größe und Helligkeit mit einem Kinobild vergleichbar sind, ist man bei dem heutigen Stand der Kathodenstrahlröhrentechnik gezwungen, hohe Anodenspannungen, 40 kV und mehr, anzuwenden. Das bedeutet: Moderne Fernsehprojektionsröhren arbeiten mit Spannungen von der Größenordnung, wie sie in der Röntgentechnik benutzt werden. Es ist also ohne weiteres zu erwarten, daß beim Betrieb dieser Röhren Röntgenstrahlen auftreten. Als man im Frühjahr 1937 bei der Fernseh Aktiengesellschaft an die Entwicklung von Projektionsröhren für derartig hohe Spannungen heranging, wurden die Röntgenstrahlen auf photographischem Wege nachgewiesen, und mit der gleichen Methode auch die Wirksamkeit der Bleiabschirmungen kontrolliert. Als dann die Entwicklung zu einer weiteren Erhöhung der Anodenspannung drängte, wurden wegen der erhöhten Gefahr genauere Röntgenintensitätsmessungen vorgenommen.

Die schädigenden Wirkungen der Röntgenstrahlen, wie Keimschädigungen, Röntgenkrebs und ähnliche Erkrankungen, sind allgemein bekannt. Besonders gefährlich ist dabei, daß sich einzelne kleine Röntgenmengen über Jahre hinaus zu einer schädigenden Gesamtdosis addieren können. Als die Grenzintensität, die der menschliche Körper dauernd ohne Schaden vertragen kann, wird eine Intensität 10^{-7} r sec (siehe unten) angesehen. Diese Sekundendosis ist den „Vorschriften für Strahlenschutz in nichtmedizinischen Röntgenanlagen“ DIN RÖNT 6 1934 zugrunde gelegt, die vorläufig die einzigen Röntgenvorschriften sind, an die sich der Konstrukteur von Fernsehgroßprojektionsanlagen halten kann.

Allerdings beziehen sich die dort vorgeschriebenen Bleiabschirmungen auf Röntgenröhren mit Schwermetallantikathoden, die eine höhere Röntgenstrahlenausbeute als der Fluoreszenzschirm ergeben, und auf Strahlströme von 10 mA, während diese bei Kathodenstrahlröhren um eine Größenordnung tiefer liegen. Es ist also zu vermuten, daß man bei Braunschener Röhren mit geringeren Bleidicken auskommen kann, was auch die folgenden Messungen bestätigen.

Röntgenstrahlen werden durch die Messung der von ihnen hervorgerufenen Ionen bestimmt. Man nennt diejenige Strahlenmenge, die in einem cm³ Luft eine Ionenmenge erzeugt, deren Ladung gleich einer elektrostatischen CGS-Einheit ist, ein „r“. Diese Einheit ist kein eigentlich physikalisches Maß; denn die Absorption, und damit der zur Ionenbildung verbrauchte Teil der Strahlung, den man ja mißt, hängt von der Wellenlänge ab, so daß sich Röntgenintensitäten verschiedener Härte, die in r-Einheiten gemessen gleich groß sind, energiemäßig durchaus um Größenordnungen unterscheiden können. Andererseits ist die r-Einheit leicht reproduzierbar und daher überall eingeführt. Die Messung in Luft hat in biologischer Beziehung noch den Vorteil, daß Luft (N₂, O₂) im wesentlichen aus Elementen gleicher oder ähnlicher Atomnummer wie der menschliche Körper (H, C, N, O) besteht, und ihm daher in bezug auf Röntgenstrahlenabsorption, die von der Atomnummer stark abhängig ist, verwandt ist.

Am einfachsten mißt man Ionisationen nach dem Aufladeverfahren. Man benutzt als Ionisationskammer zum Beispiel einen Zylinderluftkondensator, dessen äußere Elektrode eine Spannung gegen Erde führt und dessen innere Elektrode mit einem Elek-

trometer verbunden ist (Abb. 1). Wird die Luft in der Kammer ionisiert, so fließt unter dem Einfluß des Feldes ein Ionenstrom und lädt die innere Elektrode auf. Aus dem Anstieg der Spannung $\frac{dU}{dt}$ am Elektrometer und der Kapazität der Anordnung kann man, wenn Sättigung vorhanden ist, auf die Stärke der Ionisation schließen und damit auf die Röntgenintensität nach der Formel

$$I = \frac{C}{v} \cdot \frac{dU}{dt} \cdot 3 \cdot 10^{19} \text{ r/sec.}$$

wobei C die Kapazität der Kammer und des Elektrometers in μF und v das Kammervolumen ist.

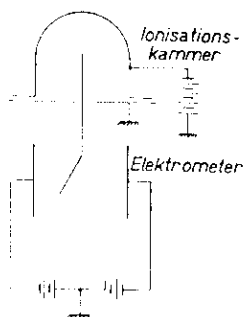


Abb. 1: Schaltschema des Meßgerätes.

Bei der Anwendung von geschlossenen Kleinkammern ist noch folgendes zu beachten: Die Definition der r-Einheit bezieht sich auf reine Luftionisation; aber, da die Röntgenstrahlenionisation auf der ionisierenden Wirkung der von den Strahlen ausgelösten Photo- und Comptonelektronen beruht und die Menge dieser Elektronen von der Atomnummer des von den Strahlen getroffenen Materials abhängt, tritt zu der Luftionisation bei geschlossenen Kammern noch eine die Messung fälschende Wandstrahlung hinzu, die vor allen Dingen eine starke Wellenabhängigkeit der Kammer verursachen kann. Um diesen Fehler klein zu halten, verwendet man Kammern aus einem Material, das eine ähnliche Atomnummer wie Luft besitzt¹⁾. Außerdem muß die Kammerwand möglichst dünn sein, damit sie nicht durch Absorption die Messung weicher Strahlen stört.

Es wurde daher eine Kammer aus Zeichenpapier benutzt, das mit einer leitenden Schicht aus Graphit (Hydrokollag) überzogen war. Die innere Elektrode bestand aus einer Bleistiftseele. Als Elektrometer wurde ein Lindemann-Elektrometer von Spindler und Hoyer verwendet. Bei einem Kammervolumen v von 125 cm^3 und einer Elektrometervorspannung von $\pm 1,5 \text{ Volt}$ ergibt sich für das Instrument die Eichkonstante $K = 3,65 \cdot 10^{-5} \text{ r/sec}$, bezogen auf die Auf ladegeschwindigkeit von 1 Skt/sec . Da aber aus den oben erwähnten Gründen diese Berechnung der Eichkonstante bei Kleinkammern nicht sehr zuverlässig ist, wurde das Instrument mit einem geeichten Dosimeter verglichen. Die Firma Elektrizitätsgesell-

schaft Sanitas stellte freundlicherweise ein Küster-Dosimeter zur Verfügung, von dem Eichkurven für Strahlen von 20 kV Anodenspannung an vorhanden waren. Die Abhängigkeit der Eichkonstante K von der Anodenspannung des Röntgenstrahlen emittierenden Rohrs, d. h. von der Härte der Röntgenstrahlung, stellt Abb. 2 dar, gemessen wurde hierfür in dem Bereich von 30 bis 80 kV.

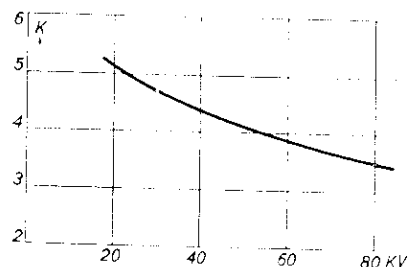


Abb. 2: Eichkonstante K in Abhängigkeit von der Anodenspannung der untersuchten Röhre.

Mit der Apparatur wurde an zwei Projektionsröhren verschiedener Bauart die Abhängigkeit der Röntgenintensität von der Anodenspannung bestimmt, und zwar jeweils in zwei verschiedenen Richtungen zur Röhrenachse. Röhre A war ein Aufsichtrohr aus Hartglas mit 3 bis 4 mm Wandstärke und einer ungefähr 12 mm starken Planscheibe, dessen Leuchtschirm auf einer Aluminiumplatte aufgebracht war (Abb. 3), während Röhre B, ein Durchsichtrohr aus Weichglas, eine Wandstärke von 2 bis 3 mm und eine Planscheibe von ungefähr 10 mm Dicke besaß (Abb. 4). Bei allen Messungen gelangte stets der volle Strahlstrom auf den Schirm, eine Beaufschlagung von Blenden fand nicht statt, so daß also als Entstehungsort der Röntgenstrahlen der Leuchtschirm anzusehen ist. Das Leuchtmaterial war ein handelsübliches mit Kupfer sensibilisiertes Zink-Kadmiumsulfid. Auch bei dem Aufsichtrohr handelt es sich um Röntgenstrahlung des Leuchtmaterials; denn, da die Eindringtiefe der Elektronen selbst bei 80 kV Kathodenstrahlen nur $\frac{1}{50} \text{ mm}$ beträgt, wird die Leuchtschirmunterlage von ihnen nicht getroffen. Die Messung wurde in einem Meter Abstand von der Mitte des Leuchtschirms, und bei 0,5 mA Strahlstrom angestellt bzw. auf diese Werte ungerechnet²⁾. Die Luftabsorption wurde nicht berücksichtigt, doch ergibt eine ungünstige Abschätzung, daß der dadurch bedingte Fehler bei 20 kV Strahlen unter 10 % liegt.

Der Anstieg der Kurven beruht erstens auf der Erhöhung der Ausbeute mit der Spannung und zweitens auf der geringeren Absorption durch die Glaswandung bei härteren Strahlen. Die ausgezogenen Kurven wurden seitlich vom Kolben an einem Punkt aufgenommen, der unter einem Winkel von 45° zur Leuchtschirmebene lag, während die gestrichelten Kurven die Intensität in der Richtung der Röhren-

²⁾ Auch alle übrigen in dieser Arbeit angegebenen Beobachtungen beziehen sich, wenn nicht anders vermerkt, auf diese Werte.

achse vor der stark absorbierenden Planplatte darstellen. Die Absorption durch die Glaswandung erkennt man auch aus den verschiedenen Fußpunkten der Kurven, die entsprechend den Glasstärken bei

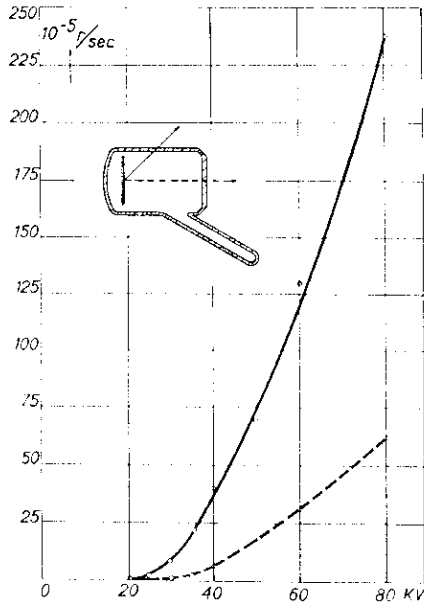


Abb. 3: Abhängigkeit der Röntgenintensität von der Anodenspannung bei einer Aufsichtsröhre.

verschiedenen kV-Werten in die Abzisse übergehen. Die Röntgenintensitäten bei niedrigen Spannungen sind aus Tab. I und II (siehe unten) zu entnehmen. Aus diesen Werten ergibt sich die niedrigste Spannung, bei der noch Strahlenschutz angewandt wer-

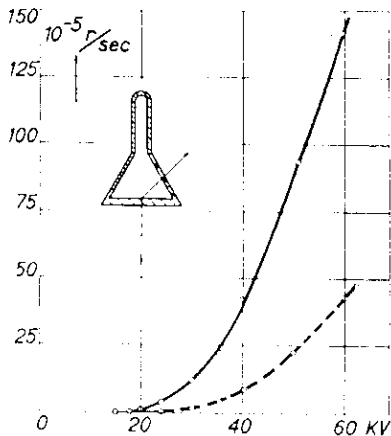


Abb. 4: Abhängigkeit der Röntgenintensität von der Anodenspannung bei einer Durchsichtsröhre.

den muß. Diese Spannung hängt demnach von der Glasstärke ab, daher ist auch bei normalen Braunschens Röhren, die einen größeren Schirmdurchmesser als Projektionsröhren haben und aus glas-technischen und Festigkeitsgründen mit starker

Glaswandung ausgeführt werden müssen, keine Röntgenstrahlung zu befürchten, solange ihre Anodenspannung nicht höher als 20 kV ist. Bei einem Versuch an einer solchen Röhre mit 50 cm Schirmdurchmesser und 7 bis 8 mm Wandstärke war in 20 cm Entfernung vom Kolben keine Strahlung nachzuweisen. Dabei arbeitete die Röhre mit 20 kV und 0,5 mA Strahlstrom, Betriebsdaten, die normalerweise nicht erreicht werden.

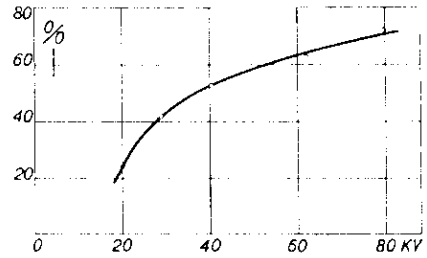


Abb. 5: Röntgenstrahlendurchlässigkeit einer 0,95 mm starken Spiegelglasscheibe in Abhängigkeit von der Strahlenhärte.

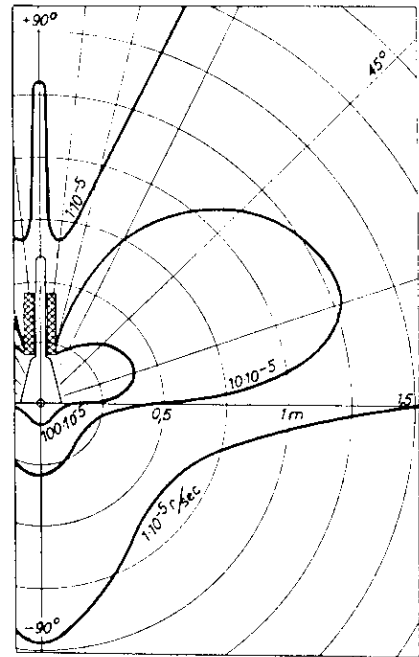


Abb. 6: Röntgenintensitätsverteilung um eine Projektionsröhre bei 30 kV und 0,5 mA Strahlstrom.

Um die Glasabsorption noch gesondert zu prüfen, wurde die Durchlässigkeit einer 0,95 mm starken Spiegelglasscheibe gemessen (Abb. 5). Diese Kurve bestätigt noch einmal, daß die Röntgenintensität durch die Glasstärke stark beeinflusst wird, besonders bei weicher Strahlung. Außerdem kann man aus dieser Kurve ersehen, inwieweit Messungen an zwei Röhren gleicher Bauart infolge von Glasdickenunterschieden schwanken können.

Auch die Verteilung der Röntgenintensität um eine Projektionsröhre (Röhre B siehe oben) wird,

abgesehen von der Absorption des Spulenpaketes durch die Glasstärke bestimmt bzw. durch den Winkel, unter dem die Röntgenstrahlen den Kolben durchdringen (Abb. 6). Es handelt sich im übrigen bei Abb. 6 nur um eine ungefähre Skizze, da für eine genaue Darstellung die Dichte der Meßpunkte nicht ausreicht. Gemessen wurde in der Richtung der Achsen und der in das Polardiagramm eingetragenen Radien. Da aber die Skizze das Wesentliche schon wiedergibt, wurde auf eine eingehendere Untersuchung verzichtet.

Aus den Messungen geht hervor, daß man bei Betriebsspannungen oberhalb 20 kV Strahlenschutz

I kV	II 10^{-5} r/sec	III μ	IV H.S. mm Pb	V mm Pb	VI mm Pb
80	239	30,5	0,227	1,8	2,55
60	130	55,4	0,125	0,88	1,3
50	57,3	91	0,076	0,46	0,68
40	39,5	158	0,044	0,23	0,38
35	20,6	238	0,0291	0,13	0,22
30	8,61	339	0,0204	0,063	0,13
25	1,8	543	0,0128	0,011	0,053
20	0,22	926	0,0075	—	0,0085

Tabelle I.

I und II Meßwerte der ausgezogenen Kurven in Abb. 3.

III Absorptionskoeffizient μ in Blei ($\mu = \mu_0 e^{-\mu l}$; l die Bleidicke in cm).

IV Halbwertschicht in Blei.

V Bleidicke, welche die Intensität in II auf 10^{-5} r/sec schwächt.

VI Bleidicke, welche die Intensität in II auf 10^{-6} r/sec schwächt.

I kV	II 10^{-5} r/sec	III mm Pb	IV mm Pb
60	144	0,9	1,31
50	92,4	0,5	0,75
40	47,6	0,24	0,39
35	22,9	0,13	0,23
30	12,4	0,074	0,14
25	3,58	0,024	0,066
20	0,81	—	0,023
18	0,085	—	—
15	0,01	—	—

Tabelle II.

I und II Meßwerte der ausgezogenen Kurven in Abb. 4.

III Bleidicke, welche die Intensität auf 10^{-5} r/sec schwächt.

IV Bleidicke, welche die Intensität auf 10^{-6} r/sec schwächt.

anwenden muß, während sich unterhalb 20 kV eine Abschirmung erübrigt. Bei einer Anodenspannung von 20 kV, die für kleinere Projektionsröhren in Frage kommt, kann die Notwendigkeit eines Strahlenschutzes nur von Fall zu Fall geklärt werden, da für die Intensität, die den Beobachter erreicht, auch dessen Entfernung von der Röhre maßgeblich ist.

Um dem Konstrukteur von Fernsehempfängern einen Ueberblick über die aufzuwendenden Bleiabschirmungen zu geben, wurden die Bleidicken berechnet, die notwendig sind, um die an Projektionsröhren auftretenden Röntgenintensitäten auf einen unschädlichen Betrag zu drücken. Obwohl es sich bei diesen ungefiltert gemessenen Intensitäten, wie bei jeder Bremsstrahlung³⁾, um ein Gemisch von Strahlen verschiedenster Härte handelt, wurde bei der Berechnung der Bleidicken der Absorptionskoeffizient der härtesten Strahlung⁴⁾ zu Grunde gelegt, deren Wellenlänge nach der Gleichung $h\nu = eV$ der jeweiligen Anodenspannung entspricht. Damit wurde die Gesamtaborption zu gering angenommen, d. h. die in Tab. I und II angeführten Bleidicken enthalten noch einen Sicherheitsfaktor. Das zeigte sich auch an einigen Messungen. Bei Spannungen bis zu 60 kV war hinter einem 1 mm starken Bleischirm keine Strahlung nachzuweisen ($J < 10^{-7}$ r/sec.), bei 80 kV $6 \cdot 10^{-7}$ r/sec, während hinter 2 mm Blei die Strahlung unmeßbar blieb. Bei niedrigen Spannungen sind nach Tab. I und II die erforderlichen Blei-

Material		20 kV	30 kV
Holz	10 mm	68 %	80 %
Pertinax	10 mm	45 %	64 %
Aluminium	1 mm	26 %	47,5 %
Eisen	1 mm	—	0,8 %
	0,2 mm	1,3 %	—

Tabelle III.

Röntgenstrahlendurchlässigkeit einiger Baumaterialien von Fernsehempfängern bei Strahlen von 20 und 30 kV.

stärken sehr gering, so daß zu untersuchen ist, ob in manchen Fällen schon die üblichen Baumaterialien von Fernsehempfängern, wie Holz, Pertinax, Aluminium und Eisen, die Strahlung genügend schwächen. Holz und Pertinax sind für diesen Zweck selbst bei

³⁾ Es spielt bei dieser Betrachtung keine Rolle, in welchem Maße Resonanzstrahlungen der im Leuchtmaterial enthaltenen Elemente auftreten. Es ist aber zu vermuten, daß sich diese Resonanzstrahlungen im wesentlichen zu einer bremsstrahlungsähnlichen Strahlungsverteilung überlagern.

⁴⁾ Die Absorptionskoeffizienten wurden der Arbeit Karl Schulz, Ann. d. Phys. (5) 27, 1936, 1 entnommen.

20 kV unbrauchbar, dagegen absorbiert Eisen bei 20 und 30 kV schon ganz beträchtlich (Tab. III). So wird z. B. die Strahlung bei 30 kV, die nach Tab. III $12,4 \cdot 10^{-5}$ r/sec. beträgt, durch 1 mm Eisen auf $1 \cdot 10^{-6}$ r/sec. heruntergesetzt, so daß erst ungefähr in 30 cm Entfernung vom Leuchtschirm die zulässige Sekundendosis von 10^{-5} r/sec. überschritten wird. In diesem Zusammenhang ist noch zu erwähnen, daß nach den bisherigen Untersuchungen die Absorption der Projektionsobjektive ausreichend ist, um eine besondere Abschirmung der Projektionseinrichtung überflüssig zu machen. So beträgt z. B. die Röntgenintensität bei der 80 kV Großprojektionsanlage der Fernseh Aktiengesellschaft in 15 cm von der Objektivfassung 10^{-5} r/sec. Man könnte im Bereich des Lichtkegels auch höhere Intensitäten zulassen, wenn man die Gewähr hat, daß die Streustrahlung, welche die Zuschauer erreichen kann, unterhalb von 10^{-5} r/sec liegt.

Nun scheinen aber neuere Erfahrungen darauf hinzudeuten, daß die zulässige Sekundendosis besonders im Hinblick auf Keimschädigungen mit 10^{-5} r/sec nicht niedrig genug angenommen ist ⁵⁾. Es ist daher empfehlenswert, diese Sekundendosis wesentlich zu unterschreiten. Da man aber in den meisten Fällen bei Großprojektionsanlagen Bleiabschirmungen verwenden muß, ist diese Forderung unschwer zu er-

füllen ⁵⁾, denn wenn man überhaupt Bleiabschirmungen anwendet, spielt eine zusätzliche Bleidicke von dem Bruchteil eines Millimeters keine Rolle.

Zusammenfassung.

Bei Fernsehprojektionsröhren treten wegen der hohen Anodenspannung Röntgenstrahlen auf. Da sich Röntgenstrahlendosen über einen längeren Zeitraum addieren, sind auch kleine Intensitäten schädlich, soweit sie nicht unterhalb der Toleranzdosis (10^{-5} r/sec) liegen. Die DIN-Vorschriften über Röntgenstrahlenschutz fordern daher eine Herabsetzung der Intensität auf wenigstens 10^{-5} r/sec.

Nach einigen allgemeinen Betrachtungen über das Messen von Röntgenstrahlen wird über Messungen an Projektionsröhren verschiedener Bauart (Aufsicht- und Durchsichttypen) berichtet. Es wurde die Abhängigkeit der Röntgenstrahlenintensität von der Spannung bei konstantem Strom in dem Bereich von 15 bis 80 kV bestimmt.

Aus den Messungen geht hervor, daß man bei Spannungen oberhalb 20 kV Röntgenstrahlenschutz anwenden muß. Die hierfür notwendigen Bleidicken wurden unter der Voraussetzung berechnet, daß es sich um monochromatische Strahlung handelt. Zum Schluß werden einige Angaben über die Röntgenstrahlenabsorption der üblichen Baumaterialien von Fernschempfängern gemacht.

⁵⁾ (Vgl. Tab. I Spalte V und VI und Tab. II Spalte III und IV.)

⁵⁾ R. Jäger und H. Stubbe, Phys. Zs. 39, 1938, 671.