

## Aufladung und Sekundärelektronenemission\*)

Von

Konrad Scherer, Nürnberg.

(Mitteilung aus dem Elektrotechnischen Institut I der T. H. Aachen.)

(Eingegangen am 28. 8. 1939.)

DK 537-533.8

**Übersicht.** Die Arbeit beschreibt kurz die bei Elektronenbeschießung fester Körper auftretenden Erscheinungen, nämlich die normale Sekundärelektronenemission, wenn der Körper auf Anodenpotential liegt, und die bei bestimmten Anodenspannungen erfolgende Aufladung, wenn der Körper hoch isoliert ist. Für den letzten Fall werden die bisherigen Meßverfahren und Meßergebnisse mitgeteilt. Eine neue Anordnung zur Aufladungsmessung wird angegeben und ihr Verhalten geprüft. Mit ihr werden Leiter, Isolatoren und Fluoreszenzmaterialien auf Aufladung untersucht. Endlich werden Aufladungsbilder einiger Schirme bei verschiedenartiger Elektronenbeschießung gezeigt und beschrieben.

### I. Allgemeines. Die Gleichgewichtsspannung.

Wird irgendein Körper mit Elektronen genügend hoher Geschwindigkeit, den Primärelektronen, beschossen, so beobachtet man, wenn kein störendes Gegenfeld vorhanden ist, einen von der getroffenen Stelle ausgehenden Elektronenstrom. Genauere Untersuchungen dieses Rückstromes<sup>1)</sup> zeigen, daß er in der Hauptsache aus Elektronen geringer Geschwindigkeit (0 bis 20 V), den Sekundärelektronen, besteht. Nur ein kleiner Bruchteil hat höhere Geschwindigkeit; er setzt sich aus reflektierten und rückdiffundierten Elektronen zusammen.

In vielen Fällen ist es von Wichtigkeit, den Sekundärelektronenstrom  $i_2$ , der von einem Primärelektronenstrom  $i_1$  ausgelöst wird, zu kennen. Das Verhältnis  $i_2/i_1$  wird als Ausbeute  $\eta$  bezeichnet. Sie ist abhängig von der Geschwindigkeit und dem Einfallswinkel der Primärelektronen sowie von der Zusammensetzung und der Oberflächenbeschaffenheit des beschossenen Körpers. Bild 1 zeigt den Zusammenhang zwischen Ausbeute  $\eta$  und Primärelektronengeschwindigkeit  $U_{el}$ . Mit wachsender Spannung steigt die Ausbeute von Null aus an, erreicht ein Maximum und nimmt dann wieder ab. Liegt das Maximum über  $\eta=1$ , so gibt es zwei Primärelektronengeschwindigkeiten  $U_{gl_1}$  und  $U_{gl_2}$ , für die  $\eta$  den Wert 1 besitzt.  $U_{gl_1}$  und  $U_{gl_2}$  werden im folgenden als 1. und 2. Gleichgewichtsspannung bezeichnet, weil bei diesen Spannungen der weggehende Sekundärelektronenstrom und der ankommende Primärelektronenstrom sich die Waage halten.

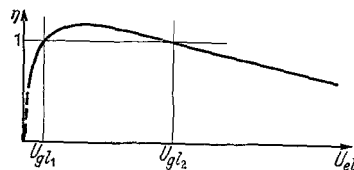


Bild 1. Ausbeute  $\eta = i_2/i_1$  in Abhängigkeit von der Primärelektronengeschwindigkeit  $U_{el}$ .

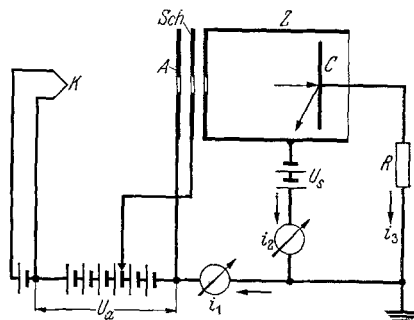


Bild 2. Schematische Versuchsanordnung zur Untersuchung der Sekundärelektronenemission des Körpers C. Bei vollkommener Isolation von C ist  $R = \infty$ .

### II. Meßmethoden zur Bestimmung der Sekundärelektronenemission fester Körper.

Zur Messung der Ausbeute  $\eta$  der Sekundärelektronenemission benutzt man gewöhnlich eine Anordnung nach Bild 2. Durch die Glühkathode K und die Anode A

\*) Teildissertation D 82.

<sup>1)</sup> Zusammenfassender Bericht bei R. Kollath, Phys. Z. 38 (1937) S. 202.

wird ein Elektronenstrom erzeugt, der nach Durchfliegen der Anodenblende und einer Schutzblende *Sch* innerhalb des Käfigs *Z* auf den zu untersuchenden Prüfkörper *C* trifft, der meist die Form einer Platte hat. Für den in die Plattenableitung eingezeichneten Widerstand *R* sind die Grenzfälle  $R=0$  und  $R=\infty$  von besonderer Bedeutung. Diesen Grenzfällen entsprechend wird anschließend von den Meßmethoden *A* und *B* gesprochen. Bei Zwischenwerten von *R*, die manchmal aus experimentellen Gründen oder wegen des Widerstandes des Prüfkörpers sich nicht vermeiden lassen, wird meist Annäherung an die Grenzfälle *A* und *B* erstrebt.

### Meßmethode A.

Die Prüfplatte *C* ist über einen Strommesser ( $i_1$ ) unmittelbar mit der Anode verbunden. Falls die Prüfplatte ein Halbleiter oder ein unvollkommener Isolator ist, sei der in den Käfig hineingelangende und damit auch der die Prüfplatte durchfließende Strom so klein, daß das Potential der Prüfplattenoberfläche noch praktisch gleich dem Potential der Anode *A* ist. Die Primärelektronengeschwindigkeit  $U_{el}$  entspricht unter diesen Bedingungen der Anodenspannung  $U_a$ . Ist die Saugspannung  $U_s$  genügend (bis etwa 100 V) hoch, so wandern alle Sekundärelektronen zum Käfig *Z* und bilden den Strom  $i_2$ . Da, wie leicht zu sehen,  $i_1$  der Primärelektronenstrom ist, ergibt sich aus den Strommessungen unmittelbar  $\eta = i_2/i_1$  in Abhängigkeit von  $U_{el}$ . Durch Anwendung kleiner negativer Saugspannungen läßt sich außerdem die Geschwindigkeitsverteilung der Sekundärelektronen bestimmen.

### Meßmethode B.

Die aus einem Leiter oder einem Nichtleiter bestehende Prüfplatte ist so gut isoliert, daß ein Strom von ihr nicht abfließen kann ( $i_3=0$ ). Bezüglich der Primärelektronen sind zwei Hauptmöglichkeiten in Betracht zu ziehen: 1. Es treffen von den in den Käfig hineingelangenden Primärelektronen überhaupt keine auf die Prüfplatte auf. Dies ist dann der Fall, wenn die Prüfplatte niedrigeres Potential besitzt als die Kathode; die Primärelektronen wandern sämtlich auf den Käfig und es ist also

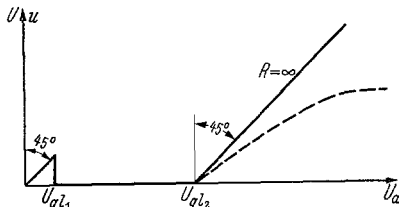


Bild 3. Negative Aufladung des Prüfkörpers  $U$  bzw.  $u$  in Abhängigkeit von der Anodenspannung  $U_a$  bei vollkommen (—) und unvollkommen (---) isoliertem Prüfkörper.

$i_1 = i_2$ . 2. Die Primärelektronen treffen alle auf die Prüfplatte auf. Damit  $i_3$  gleich Null wird, müssen ebensoviel Sekundärelektronen die Platte verlassen als Primärelektronen auftreffen. Die Sekundärelektronen wandern zum Käfig und es

wird also wieder  $i_2 = i_1$ . Dieser Fall tritt ein, wenn das Potential der Prüfplatte wesentlich höher liegt als das der Kathode. Die weitere Möglichkeit, daß von den in den Käfig eintretenden Primärelektronen einige auf die Prüfplatte, die übrigen auf den Käfig wandern, ist von untergeordneter Bedeutung.

Entsprechend den angegebenen Hauptmöglichkeiten ergibt sich die in Bild 3 dargestellte, von der Erfahrung (s. unter III) bestätigte Abhängigkeit der Spannung Anode—Prüfplatte  $U$  von der Spannung Anode—Kathode  $U_a$ . Im Anodenspannungsgebiet von 0 V bis zur 1. Gleichgewichtsspannung ist die Ausbeute kleiner als 1. Es werden auf der Prüfplatte also weniger Sekundärelektronen ausgelöst als Primärelektronen auftreffen. Die Prüfplatte lädt sich mithin stärker negativ auf. Dies setzt sie fort, bis sie das Potential der Kathode erreicht, bis also gar keine Primärelektronen mehr auf sie auftreffen.  $U$  wird gleich  $U_a$  (in Bild 3 Anstieg unter  $45^\circ$ , da Maßstäbe für  $U$  und  $U_a$  gleich groß). Liegt die Anodenspannung zwischen der 1. und der 2. Gleichgewichtsspannung, so ist die Ausbeute größer als 1, d. h. es wandern mehr Sekundärelektronen von der Prüfplatte zum Käfig als Primärelektronen auftreffen. Die Platte

lädt sich somit positiv auf. Dies kann sie jedoch nur solange, als praktisch alle Sekundärelektronen zum Käfig wandern. Würde die Platte das Käfigpotential wesentlich überschreiten, so würden keine Sekundärelektronen zum Käfig gelangen. Die Platte kann also höchstens etwa das Potential des Käfigs annehmen. Bei Anodenspannungen oberhalb der 2. Gleichgewichtsspannung wird  $\eta < 1$ . Die Prüfplatte lädt sich negativ auf. Dadurch nimmt die Auftreffgeschwindigkeit der Primärelektronen ab,  $\eta$  wird größer, die negative Aufladung schreitet langsamer voran; sie erreicht ihre Grenze bei  $\eta = 1$ . Dann ist die Spannung zwischen Prüfplatte und Kathode gleich  $U_{gl_2}$ , die Spannung  $U$  mithin  $U_a - U_{gl_2}$  (s. Bild 3: Anstieg unter  $45^\circ$  für  $U_a > U_{gl_2}$ , „Aufladegerade“!).

Methode *B* eignet sich praktisch nur zur Bestimmung der Gleichgewichtsspannung  $U_{gl_1}$  und  $U_{gl_2}$ . Zur Messung der Geschwindigkeitsverteilung der Sekundärelektronen ist sie nur oberhalb der 2. Gleichgewichtsspannung brauchbar, weil die Auftreffgeschwindigkeit  $U_{gl_2}$  der Primärelektronen hier genau bestimmt ist und gleichviel Elektronen weggehen wie auffallen. Wenn Methode *B* auch grundsätzlich über das Verhalten der Ausbeute  $\eta$  weniger auszusagen vermag als Meßmethode *A*, so hat sie doch letzterer gegenüber den Vorteil, daß man sie auch bei Isoliermaterialien anwenden kann.

### III. Bisherige Meßverfahren und Messungen nach der Meßmethode B.

In vielen technisch wichtigen Fällen ist die durch die Sekundärelektronenemission zustande kommende Aufladung elektrisch isolierter Körper von Bedeutung. Betreibt man einen Kathodenstrahloszillographen mit Spannungen, die über der 2. Gleichgewichtsspannung des in genügend dicker Schicht aufgebrachtten Fluoreszenzmaterials liegen, so lädt sich der Leuchtschirm negativ auf; der Kathodenstrahl wird abgebremst und die Lichtausbeute geschwächt. In Elektronenröhren können Aufladungen innerer Röhrenteile den Betriebsverlauf stark stören, wenn nicht ganz unmöglich machen. Demgemäß ist die Meßmethode *B*, mit der die Aufladung elektrisch isolierter Körper bei Elektronenbeschießung bestimmt werden kann, wichtig für die Bereicherung unserer Kenntnis über die Aufladung.

Die Aufladungen isolierter elektronenbeschossener Leiter oder Halbleiter werden am einfachsten durch ein elektrostatisches Meßgerät, z. B. statisches Voltmeter, Kathodenstrahloszillograph oder Elektrometer angezeigt. Knoll<sup>1)</sup> stellt die im vorigen Kapitel beschriebene Abhängigkeit der Aufladespannung von der Anodenspannung fest. Ebenfalls mißt er die Ausbeute  $\eta$  in Abhängigkeit von der Anodenspannung. Durch Gegenüberstellen der erhaltenen Kurven zeigt er, daß sowohl die Werte  $\eta = 1$  der Ausbeutekurve als auch die Knicke der Aufladekurve bei gleichen Anodenspannungen, nämlich bei den Gleichgewichtsspannungen  $U_{gl_1}$  und  $U_{gl_2}$  liegen. Die 2. Gleichgewichtsspannung einer ausgeglühten Nickelplatte bestimmt er zu etwa 2000 V. Die Aufladung einer inhomogenen Leiterplatte (Nickel,  $\eta > 1$ , mit einem Kohlenstreifen,  $\eta < 1$ , in der Mitte) macht Knoll auf folgende Weise sichtbar. Er verbindet die von einem Elektronenstrahl überstrichene Platte mit der Ablenkplatte eines Kathodenstrahloszillographen, so daß die Aufladung durch die Ablenkung des Leuchtflecks angezeigt wird. Wenn er die Prüfplatte nach der beim Fernsehen üblichen Art abtastet, die Sekundärelektronenströme verstärkt und zur Helligkeitssteuerung eines Fernsehempfängers benutzt, erhält er ein Bild, das der Ausbeuteverteilung der Prüfplatte entspricht. Später zeigt Knoll<sup>2)</sup> auf dieselbe Art und Weise, daß die Stelle einer Isolatoroberfläche, die durch einen besonderen Elektronenstrahl beschossen wird, anscheinend weniger Sekundärelektronenemissions-Fähigkeit besitzt als die übrigen Stellen. Strübig<sup>3)</sup> bestimmt mittels statischen Voltmeters die 2. Gleichgewichts-

<sup>1)</sup> M. Knoll, Z. techn. Phys. 16 (1935) S. 467.

<sup>2)</sup> M. Knoll, Naturwiss. 24 (1936) S. 345.

<sup>3)</sup> H. Strübig, Phys. Z. 37 (1936) S. 402.

spannung für geglühtes Nickel zu 2600, für ungeglühtes zu 3500 und für Aluminium zu 2900 V. Für eine Kupferplatte mit dünnem Kalziumwolframatschirm findet er 4000 V. Diese für die Leuchtsubstanz selbst zu kleine Gleichgewichtsspannung erklärt er durch die Annahme, daß die Primärelektronen bis zum Kupfer vordringen.

Die Messung der Aufladespannung ausgesprochener Nichtleiter mittels normaler elektrostatischer Spannungsmesser ist nicht möglich, weil die Ladung vom Isolator nicht abfließen kann. Durch einen Kunstgriff gelingt es Hagen und Bey<sup>1)</sup>, die Aufladung dicker Isolatoren zu bestimmen. Sie benutzen den durch einen divergenten Elektronenstrahl ungefähr gleichmäßig beschossenen Isolator selbst als Meßelektrode eines Fadenelektrometers. Der Elektrometerfaden befindet sich zwischen Anode und Prüfplatte, sein Ausschlag zeigt die Höhe der Aufladung an. Als 2. Gleichgewichtsspannung finden die Verfasser für Glas 1900 V, für Zinksilikat 3100 V, für Willemite 4300 V und für Kalziumwolframat über 6000 V. Die Fluoreszenzstoffe waren mit destilliertem Wasser in 1 mm starker Schicht auf Glas aufgeschwemmt. Das Meßverfahren ist selbstverständlich auch für Metalle verwendbar. Bei Isolatoren ist nachteilig, daß sich der Ausschlag des Elektrometerfadens bei ungleichmäßiger Feldverteilung auf einen Mittelwert einstellt und so das Meßergebnis verfälscht.

#### IV. Neue Versuchsanordnung zur Aufladungsbestimmung elektronenbeschossener Isolatoren.

Beim Schreiben eines Fernsehstrichrasters mittels eines Kathodenstrahls auf dem Leuchtschirm eines Kathodenstrahloszillographen<sup>2)</sup> zeigte sich bei schrägstehendem Schirm eine merkliche Ablenkung des Rasters. Sie rührte her von Aufladungen des Fluoreszenzmaterials. Als rohes Maß für die Höhe der Aufladung konnte dabei die Abweichung der Ablenkung gegenüber der normalen angesehen werden.

Vorstehende Beobachtung läßt sich nach einem Vorschlag von Rogowski zu Sekundärelektronenemissions-Messungen verwerten. Statt eines einzigen Kathodenstrahls werden deren zwei verwandt, ein Hauptstrahl und ein Meßstrahl. Der Hauptstrahl beschießt eine hochisolierte Platte des auf Aufladung zu untersuchenden Materials. Der Meßstrahl wird dicht an der Platte vorbeigeschossen und zeigt auf einem Leuchtschirm das jeweilige Oberflächenpotential der Platte durch seine Ablenkung aus der Nulllage an.

Diese Aufladungsmessung ist offensichtlich verwandt mit derjenigen, bei der ein Elektrometerfaden zwischen Anode und Prüfplatte das Prüfplattenpotential anzeigt. Wie die Elektrometermethode eignet sich auch die neue Methode praktisch nur zur Ermittlung der 1. und 2. Gleichgewichtsspannung (s. Meßmethode B). Gegenüber der Elektrometermethode bietet sie jedoch den Vorteil, bei Anwendung eines schlanken Meßstrahls durch Abtasten des Meßobjektes bis zu einem gewissen Grade die Verteilung der Aufladung erkennen zu können.

Die nach dem erwähnten Vorschlag durchgebildete Versuchsanordnung besteht in der Hauptsache aus zwei aufeinander senkrecht stehenden Kathodenstrahlröhren (Bilder 4 und 5), deren Mittelachsen sich in einem gemeinsamen Gehäuse *a* schneiden. Das aufrechtstehende Rohr *b* erzeugt den Hauptstrahl und das waagrecht liegende *c* den „Meßstrahl“. Eine Quecksilberdiffusionspumpe pumpt die Apparatur durch eine kurze, weite Pumpleitung, die an das Gehäuse bei *d* angeschlossen ist, aus. Zur Erzeugung des Hauptstrahles wird das von Thielen<sup>3)</sup> beschriebene, mit Kaltkathode und Hilfsentladung arbeitende Entladungsrohr benutzt, dessen Kathodenstrahlvakuum durch das Lufteinlaßventil *e* eingestellt wird. Das genannte Entladungsrohr

<sup>1)</sup> C. Hagen u. H. Bey, Z. Phys. 104 (1937) S. 681.

<sup>2)</sup> K. Scherer u. R. Rübsaat, Arch. Elektrotechn. 31 (1937) S. 821.

<sup>3)</sup> H. Thielen, Arch. Elektrotechn. 32 (1938) S. 38.

bietet den Vorteil, bei Anodenspannungen von 4 bis 20 kV den Strahlstrom in bequemer Weise, und zwar durch geeignete Wahl der Hilfsentladungsspannung und des Vorkonzentrationsstromes auf den gewünschten Wert einstellen zu können. Durch elektrische und magnetische Ablenfelder  $f$  kann der Hauptstrahl auf beliebige Stellen der Prüfplatte gelenkt werden. Man kann mit ruhendem, aber auch mit bewegtem Hauptstrahl arbeiten, z. B. einen Strich (50 ~) oder ein Fernsehrastrer (etwa mit 20 Bildern je s von 100 Zeilen) schreiben. Der Prüfkörper  $g$ , meist eine Platte von  $100 \times 100 \text{ mm}^2$ , ist im Gehäuse  $a$  untergebracht. Durch die Anbringung des Pumpstutzens am Gehäuse wird erreicht, daß das Vakuum in der Umgebung der Prüfplatte verhältnismäßig gut ist. Die auf der Platte ausgelösten Sekundärelektronen werden vom Gehäuse, das bei der Versuchsanordnung den Käfig  $Z$  von Bild 2 ersetzt, gesammelt und abgeleitet. Die Platte wird zwecks guter Isolation von 4 Bernsteinstäbchen  $h$  getragen

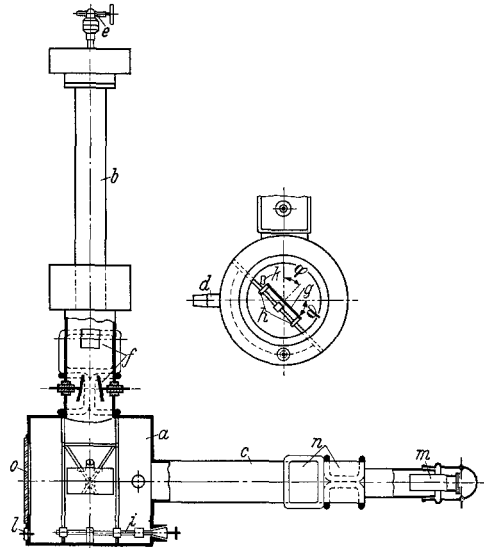
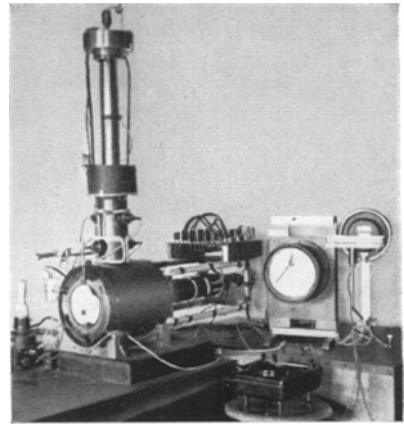


Bild 4. Versuchsanordnung.

und im Gehäuse  $a$  so angebracht, daß die zu untersuchende Oberfläche vom Hauptstrahl getroffen und vom Meßstrahl dicht überstrichen wird<sup>1)</sup>. Durch eine von außen betätigte Drehvorrichtung  $i$  mit Winkelanzeige kann die Prüfplatte um die Achse des Meßstrahlrohres geschwenkt werden. Dadurch wird der Auftreffwinkel  $\varphi$  der Primärelektronen geändert.  $\varphi = 0^\circ$  soll senkrechtetes Auftreffen der Primärelektronen bezeichnen; damit ist  $\varphi$  durch den Winkel zwischen Hauptstrahl und Plattennormale gegeben. Er entspricht also auch der Drehung der Prüfplatte aus ihrer Normallage. Der Hauptstrahlstrom wird dadurch gemessen, daß der Strahl in einen kleinen, besonders dafür vorgesehenen Strommeßkäfig  $k$  hineingelenkt und der von ihm abgeleitete Strom an einem Strommesser abgelesen wird. Der Strommeßkäfig ist an einer zu Meßstrahlrohrachse parallelen Seite der Prüfplatte befestigt. Bei Drehung der Platte stellt er sich selbsttätig in eine solche Richtung, daß er die auf ihn hingelenkten Hauptstrahlelektronen aufnimmt. Die die Ladungen des Käfigs abführende Meßleitung ist bei  $l$  unter Bernsteinisolation nach außen geführt. Dadurch ist, solange nicht der Strommesser zur Strahlstrommessung angeschlossen ist, eine gute Isolation der Prüfplatte gewährleistet. Bei Verwendung einer mehr oder

Bild 5.  
Ansicht des Versuchsstandes.

<sup>1)</sup> Zwecks Erweiterung des Meßbereichs schickt H. Scholtheis, der die Versuche führte, den Meßstrahl dicht unterhalb der Prüfplatte her, unter der sich im Abstände von 5 cm eine gleich große isolierte Metallplatte (Gegenplatte) befindet. Nun hängt die Ablenkweite des Meßstrahles nur vom Spannungsunterschied der beiden Platten ab. Durch passende Bemessung der Gegenplattenspannung kann man den Meßstrahl auch bei höheren Aufladespannungen, die seinen normalen Meßbereich übersteigen, innerhalb des Anzeigeleuchtschirmes halten. Der Meßbereich erweitert sich von 1100 auf 2600 V, wobei die Empfindlichkeit über den ganzen Meßbereich ungeändert und konstant bleibt. Die Aufladung von Isolatoren kann jedoch mit dieser Prüfplattenanordnung nicht untersucht werden.

weniger leitenden Prüfplatte kann man aber auch in Sonderfällen mittels der Durchführung einen beliebigen Ableitwiderstand an die Prüfplatte legen. Der Meßstrahl wird von einer direkt geheizten Glühkathode mit anschließender elektrostatischer Linsenordnung  $m$  geliefert. Die Geschwindigkeit der Meßstrahlelektronen beträgt bei allen Messungen 4000 V (Grund s. weiter unten). Durch zwei miteinander fest verbundene, um das Meßstrahlrohr drehbare Ablenkspulenpaare  $n$  kann der Meßstrahl sowohl senkrecht zur Plattenoberfläche als auch parallel zu ihr abgelenkt werden. Mittels letzterer Ablenkungsart kann man die Prüfplatte abtasten. Verwendet man als Ablenkstrom 50periodischen Wechselstrom, so erhält man, solange die Prüfplatte gleichmäßig aufgeladen ist, auf dem Leuchtschirm  $o$  der Abschlußscheibe des Gehäuses einen parallel zur Prüfplatte verlaufenden Strich. Aus der Ablenkung des Striches gegenüber seiner Nullage kann man auf das Potential der Oberfläche der Prüfplatte schließen. Sind, falls es sich um eine nichtleitende Platte handelt, die verschiedenen Zonen der Prüfplatte, über die der Meßstrich hinwegstreicht, verschieden stark aufgeladen, so wird der Meßstrahl entsprechend der Aufladung der einzelnen Stellen mehr oder weniger abgelenkt. Dadurch entsteht auf dem Leuchtschirm ein photographisch festzuhaltendes Bild der Potentialverteilung der Prüfplatte. Zur genauen Ablesung der Ablenkung des Meßstriches dient ein auf die Abschlußscheibe gelegter Glasmaßstab. Um Parallaxe zu vermeiden, besitzt der Glasstab auf der dem Leuchtschirm anliegenden Seite eine mm-Teilung und auf der anderen Seite eine cm-Teilung. Die Teilstriche der cm-Teilung liegen bei Blickrichtung senkrecht zum Glasstab genau vor den 10 mm-Teilstrichen der mm-Teilung. Bei der Ablesung der Strahlablenkung werden entsprechende Striche zur Deckung gebracht.

### V. Prüfung der Versuchsanordnung.

Vorerst mußte untersucht werden, ob der Meßstrahl irgendwie vom Hauptstrahl beeinflusst wird. Zu diesem Zweck wurde an Stelle der Prüfplatte eine geerdete Metallplatte genommen und ein scharfer Meßstrahlfleck eingestellt. Dann wurde der Hauptstrahl eingeschaltet. Es ergab sich keine Verschiebung oder sonstige Änderung des Meßstrahlfleckes, weder bei ruhendem, noch bei in Strich- oder Rasterform bewegtem Hauptstrahl. Eine gegenseitige Beeinflussung findet also nicht statt.

Die Höhe des Ableitwiderstandes der Prüfplatte soll bei Anwendung der Meßmethode B zur Aufładungsmessung möglichst groß sein. Zur Kontrolle wurde die Ableitung einer eingelegten Metallplatte, die mit der Durchführung verbunden war, gemessen. Die Prüfplatte wurde aufgeladen; mittels Elektrometers wurde die Zeitkonstante der Spannungsabsenkung gemessen. Sie betrug 1,5 h. Die Isolation kann also als ausgezeichnet angesehen werden.

Eine größere Beeinflussung der Aufladung der Prüfplatte ist von dem die Platte streifenden Meßstrahl zu erwarten. Es ist bekannt, daß die Ausbeute  $\eta$  um so größer ist, je schräger die Primärelektronen auftreffen. Die Meßstrahlelektronen laufen parallel zur Prüfplatte und verursachen somit relativ beträchtliche Sekundärelektronenemission. Entsprechend ihrer Geschwindigkeit von 4000 V ist von vornherein anzunehmen, daß sie einen  $\eta$ -Wert haben, der größer als 1 ist und daß sie also für sich allein eine positive Aufladung der Platte ergeben. Dies wurde geprüft und bei allen als Prüfplatten verwandten Metallen als richtig gefunden. Ob der vom Meßstrahl ausgelöste Sekundärstrom die Aufladung der Prüfplatte beeinflussen kann, hängt vom Verhältnis seiner Größe zu der des Hauptstrahlstromes ab. Die Beeinflussung wird zu vernachlässigen sein, wenn der vom Meßstrahl ausgelöste Sekundärelektronenstrom klein ist gegen den vom Hauptstrahl ausgelösten, oder, was auf dasselbe herauskommt, wenn er klein ist gegen den Hauptstrahlstrom selber (es wird bei Meßmethode B ja bei  $\eta=1$  gemessen). Zur Kontrolle wurde als Prüfplatte eine Aluminiumplatte, betriebsmäßig gut isoliert, in das Gehäuse eingelegt, auf 1000 V

negativ aufgeladen und bei nicht eingeschaltetem Hauptstrahl vom Meßstrahl in genau derselben Weise, wie es bei normalen Messungen geschieht, überstrichen. Die allmähliche Entladung der Platte, die durch das Absinken des Meßstriches aus seiner höchsten Lage in seine normale angezeigt wurde, dauerte 30 s. Da die Kapazität der Prüfplatte gegen das Gehäuse 20 pF betrug, errechnet sich der vom Meßstrahl ausgelöste Sekundärelektronenstrom zu  $6 \cdot 10^{-10}$  A. Der zu den Aufladungsmessungen meist benutzte Hauptstrahlstrom von  $6 \cdot 10^{-8}$  A ist um zwei Größenordnungen stärker. Daraus ergibt sich, daß der verhältnismäßig kleine Sekundärelektronenstrom des Meßstrahls die Aufladung der Prüfplatte nicht wesentlich beeinflußt.

Als weiterer Beweis hierfür kann angesehen werden, daß ein kurzzeitig eingeschalteter Meßstrahl dieselbe Ablenkweite wie ein dauernd eingeschalteter ergab. Diese Beobachtung wurde nicht nur bei Prüfplatten aus Metall, sondern auch bei solchen aus Isolatoren gemacht; bei letzteren ist die vorerwähnte Messung des Sekundärelektronenstromes nicht durchführbar. Es ergibt sich mithin, daß auch bei nichtleitenden Prüfplatten die auf der Platte durch die Meßstrahlelektronen ausgelösten Sekundärelektronen das Oberflächenpotential nicht verändern.

Bild 6 gibt die Ablenkweite  $s$  des Meßstrahls in Abhängigkeit von der Prüfplattenspannung  $U_{pl}$  für drei Meßstrahlspannungen wieder. Die Kurven wurden bei konstanter Meßstrahlspannung durch Anlegen bekannter, gegen das Gehäuse negativer Spannungen an eine metallische Prüfplatte normaler Größe ( $100 \times 100 \text{ mm}^2$ ) erhalten. Bei 4000 V Meßstrahlspannung verursacht eine Aufladung der Prüfplatte auf 100 V eine Ablenkung des Leuchtfleckes um 4 mm. Bei kürzerer Prüfplatte und bei nur teilweise aufgeladener Prüfplatte (Isolator) wird die Ablenkung natürlich kleiner. Durch Benutzung einer kleineren Meßstrahlspannung könnte die Ablenkempfindlichkeit erhöht werden. Dabei würde aber die Helligkeit des Leuchtfleckes geringer. Um diese wieder auf die zur Beobachtung nötige Stärke zu bringen, müßte man den Meßstrahlstrom entsprechend verstärken. Dadurch erhielte man aber leicht eine störende Beeinflussung des Prüfplattenpotentials durch den Meßstrahl.

Aus vorstehenden Gründen und mit Rücksicht auf die gewählten Daten des elektrostatischen Linsensystems wurde als Meßstrahlspannung 4000 V genommen.

Bild 7 gibt eine Ansicht des Leuchtschirms als Beispiel einer Aufladungsmessung wieder. Die eingelegte Prüfplatte aus Aluminium wurde mit Primärelektronen von 4900 V beschossen. Der untere Strich *a* zeigt die Nulllinie des Meßstriches an. Man erhält sie dadurch, daß man bei geerdeter Platte den fächerförmig die Platte überstreichenden Meßstrahl so einstellt, daß er sie gerade berührt. Nach Unterbrechen der Erdverbindung lädt sich die Platte auf den Unterschied zwischen der Anodenspannung und der 2. Gleichgewichtsspannung auf und lenkt den Meßstrich bis zu der durch den Strich *b* gekennzeichneten Höhe ab. Das Bild zeigt noch, wie die Aufladespannung der

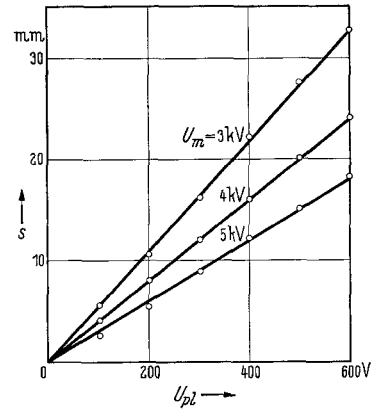


Bild 6. Ablenkweite  $s$  des Meßstriches in Abhängigkeit von der an eine Metallprüfplatte gelegten negativen Spannung  $U_{pl}$ . Meßstrahlspannung  $U_m = \text{konst.} = 3,4 \text{ und } 5 \text{ kV}$ .

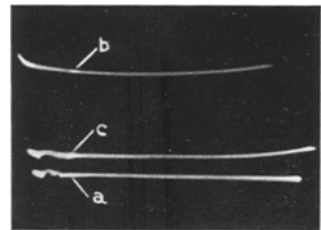


Bild 7. Beispiel für die Aufladungsmessung einer elektronenbeschossenen Aluminiumplatte.  $U_a = 4,9 \text{ kV}$ . *a*: Platte geerdet; Meßstrich auf obere Kante der Platte eingestellt, Nulllinie. *b*: Platte enterdet, hochisoliert, höchste Aufladung. *c*: Platte mit Widerstand von  $1,9 \cdot 10^{10} \Omega$  geerdet, kleinere Aufladung.

Prüfplatte bei Anlegen eines Widerstandes von  $1,9 \cdot 10^{10} \Omega$  zwischen Prüfplatte und Gehäuse zusammenbricht und dadurch den Meßstrahl weniger stark ablenkt (*c*). Die leichte Krümmung besonders des stark abgelenkten Meßstriches ist im wesentlichen dem stärkeren Randfeld zuzuschreiben, das dadurch zustande kommt, daß die Prüfplatte innerhalb des zylindrischen Gehäuses liegt.

Aufgabe der vorliegenden Arbeit war es, die grundsätzliche Brauchbarkeit des beschriebenen Meßverfahrens zur Messung der 2. Gleichgewichtsspannung und zur Bestimmung der Aufladungsverteilung bei Isolatoren festzustellen. Auf genau definierte Meßwerte kam es zunächst weniger an. Es wurde darum vorläufig kein besonderer Wert auf höchstes Vakuum (Ausfrieren der Quecksilberdämpfe der Diffusionspumpe) und höchste Reinheit der Stoffe (Ausheizen und Ausglühen) gelegt. Die Oberflächen der Untersuchungstoffe wurden, soweit erforderlich, durch mechanische Bearbeitung, Schleifen und Polieren, geglättet und weiter mit Äther, Alkohol und destilliertem Wasser gereinigt. Die so behandelten Platten ergaben bei wiederholter Untersuchung mit Elektronenauffreffwinkeln bis zu  $45^\circ$  Streuungen der 2. Gleichgewichtsspannung um nur 10%.

## VI. Meßergebnisse.

### 1. Metalle.

Bild 8 zeigt für eine Aluminiumprüfplatte die Ablenkung  $s$  des Meßstrahles in Abhängigkeit von der Anodenspannung  $U_a$  für verschiedene Auftreffwinkel  $\varphi$  der

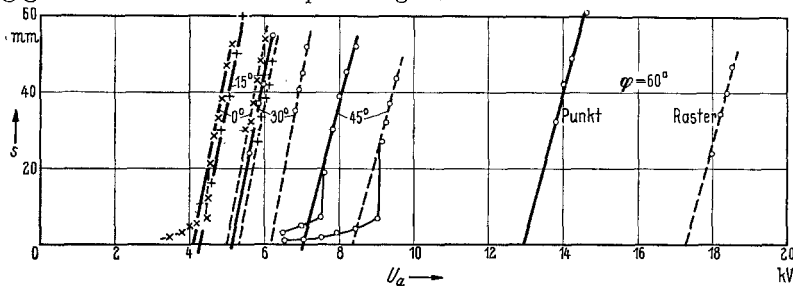


Bild 8. Aufladungsverlauf einer elektronenbeschossenen Aluminiumplatte, dargestellt durch die Ablenkung  $s$  des Meßstriches in Abhängigkeit von der Anodenspannung  $U_a$  bei verschiedenen Elektronenauffreffwinkeln  $\varphi$ . Ausgezogene Kurven: Elektronenpunktbeschießung. Gestrichelte Kurven: Elektronenstrichrasterbeschießung.

Primärelektronen. Die ausgezogenen Kurven gelten für Beschießung mit stillstehendem Hauptstrahl. Bei den gestrichelten Kurven beschrieb der Hauptstrahl auf der Prüfplatte 20mal je s ein Strichraster von 10 Zeilen; die auf der Platte beschriebene Fläche war dabei immer (auch bei schräger Platte) quadratisch, mit einer Seitenlänge von 50 mm.

Erwartungsgemäß müßten alle Kurven bis zur Erreichung der 2. Gleichgewichtsspannung die Ablenkung Null, danach eine mit  $U_a$  linear zunehmende Ablenkung aufzeigen<sup>1)</sup>. In Wirklichkeit läßt sich die Platte, wie Bild 8 zeigt, bereits vor der 2. Gleichgewichtsspannung etwas negativ auf. Diese Aufladung nimmt mit wachsendem  $U_a$  zunächst langsam zu, springt dann plötzlich auf einen größeren Wert, um erst von da ab linear weiterzuverlaufen. Der linear ansteigende Ast wird in der Folge Aufladegerade genannt. Vergleicht man unter Berücksichtigung der Eichkurve die Neigung der verschiedenen Aufladegeraden mit der theoretisch zu erwartenden,

<sup>1)</sup> Der unterhalb der 1. Gleichgewichtsspannung liegende Teil der Aufladekurve nach Bild 3 fehlt von vornherein, da nur mit verhältnismäßig hohen Hauptstrahlspannungen ( $>4000$  V) gearbeitet werden konnte. Im übrigen hätte auch die Empfindlichkeit der Versuchsanordnung zur genauen Messung in diesem Gebiet nicht ausgereicht.



so stellt man fest, daß zwar die Aufladegeraden für  $\varphi = 45^\circ$  und  $60^\circ$  die erwartete Neigung besitzen, daß dagegen die Geraden für  $\varphi = 0, 15$  und  $30^\circ$  etwas zu steil verlaufen. Alle diese Abweichungen sind auf sekundäre Einflüsse zurückzuführen. Zum Teil lassen sie sich dadurch erklären, daß das Vakuum nicht völlig einwandfrei war. Offenbar wirken sich die sekundären Einflüsse im Gebiet hoher Anodenspannungen verhältnismäßig wenig aus. Darum ist anzunehmen, daß der Schnittpunkt der (verlängerten) Aufladegerade mit der  $U_a$ -Achse mit ausreichender Genauigkeit die 2. Gleichgewichtsspannung darstellt. Diese Annahme wird noch dadurch gestützt, daß sich Lage und Neigung der Aufladegeraden als unabhängig von der Stärke des Hauptstrahlstromes erwiesen. Im folgenden wird darum die 2. Gleichgewichtsspannung stets als Schnittpunkt der Aufladegeraden mit der  $U_a$ -Achse bestimmt. Für  $\varphi = 0^\circ$  (d. h. für senkrechten Einfall der Primärelektronen) ergibt sich aus Bild 8 die 2. Gleichgewichtsspannung zu etwas über 4000 V, höher also als sonst im Schrifttum angegeben. Der Grund hierfür ist darin zu suchen, daß die Oberfläche der Prüfplatte nicht vollkommen rein ist. Man weiß ja, daß die Ausbeute und damit die 2. Gleichgewichtsspannung durch einen Oxydbelag oder durch eine Gas- oder Wasserhaut im allgemeinen stark erhöht wird. Neuere Untersuchungen<sup>1)</sup> haben sogar gezeigt, daß die Ausbeute der meisten im Vakuum aufgedampften Metalle, so auch die von Aluminium überhaupt nicht über 1 hinausgelangt.

Bild 9 bringt die aus Bild 8 entnommene 2. Gleichgewichtsspannung in Abhängigkeit vom Auftreffwinkel  $\varphi$ . Mit wachsendem  $\varphi$  steigt die 2. Gleichgewichtsspannung zunächst langsam, dann schneller an. Die Art des Anstieges steht in Einklang mit der aus dem Schrifttum<sup>2)</sup> bekannten Abhängigkeit der Ausbeute von der Geschwindigkeit und dem Auftreffwinkel der Primärelektronen.

Aus Bild 8 ersieht man, daß die 2. Gleichgewichtsspannung bei Rasterbeschießung der waagerechten Prüfplatte höher liegt als bei punktförmiger Beschießung. Das rührt daher, daß infolge des verhältnismäßig kleinen Abstandes zwischen Prüfplatte und Ablenkplatten der Kathodenstrahl um beträchtliche Winkel abgelenkt wird, so daß die Mehrzahl der Primärelektronen in Wirklichkeit schräg auf die Platte auftrifft und darum eine größere Ausbeute ergibt. Mit zunehmender Schirmdrehung wird der Einfluß der Primärelektronen, die mit größerem Winkel als  $\varphi$  auftreffen, noch stärker, so daß sich die 2. Gleichgewichtsspannung für Rasterbeschießung weiter von der entsprechenden für Punktbeschießung entfernt. Abgesehen von dieser Erscheinung, deren Ursache apparativ bedingt ist, unterscheiden sich grundsätzlich Elektronenbeschießung in Punkt- oder Rasterform nicht.

Andere untersuchte Prüfplatten aus Kupfer, vakuumgeschmolzenem Eisen und Nickel<sup>3)</sup> ergeben bei Elektronenbeschießung ähnliche Kurven, wie sie hier für Aluminium gezeigt werden. Bei senkrechtem Auftreffen der Primärelektronen beträgt ihre 2. Gleichgewichtsspannung rd. 5500 V, um mit größerem  $\varphi$  ebenfalls zuzunehmen. Eine ausgesprochen unsaubere Oberfläche stellt eine mit verdünntem Wasserglas

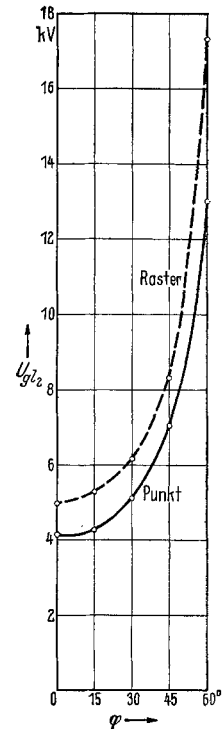


Bild 9. Abhängigkeit der zweiten Gleichgewichtsspannung  $U_{g1/2}$  vom Elektronenauftrittswinkel  $\varphi$  für eine Aluminiumplatte.

<sup>1)</sup> H. Bruining u. J. H. de Boer, Physica 5 (1938) S. 17.

<sup>2)</sup> H. O. Müller, Z. Phys. 104 (1937) S. 475.

<sup>3)</sup> Zur Verfügung gestellt von der „Heraeus-Vacuumschmelze“.

bestrichene Aluminium- oder Kupferplatte dar. Für beide liegt die 2. Gleichgewichtsspannung für  $\varphi=0^\circ$  bei 9000 V, um für  $\varphi=45^\circ$  bis 17000 V zu wachsen<sup>1)</sup>.

## 2. Isolatoren.

Aus Isolatoren werden ebenfalls bei Elektronenaufprall Sekundärelektronen ausgelöst; je nach Art des Isolators, Oberflächenbeschaffenheit, Geschwindigkeit und Auftreffrichtung der Primärelektronen kann  $\varphi$  größer oder kleiner als 1 sein. Zur Messung der 2. Gleichgewichtsspannung an Isolatoren wurden diese in Scheibenform in die Bernsteinhalterung der Meßeinrichtung eingelegt und mit Elektronen verschiedener Geschwindigkeit unter verschiedenen Auftreffwinkeln beschossen.

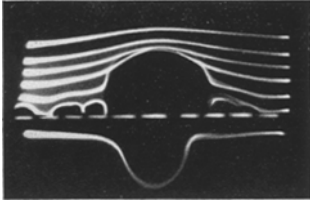


Bild 10. Potentialbild eines in Meßstrahlrichtung 30 mm langen Elektronenstriches auf Glas.  $U_a = 5$  kV. Die eingezeichnete gestrichelte Linie gibt die Lage der Glasoberfläche an.

Um nach Möglichkeit eine gleichmäßige Aufladung eines größeren Bereiches der Isolatoroberfläche und dadurch eine gleich groß bleibende Ablenkung des an der Prüfplatte fächerförmig vorbeistreichenden Meßstrahls zu erzielen, wurde zuerst so gearbeitet, daß durch die Primärelektronen ein Strichraster auf der Prüfplatte beschrieben wurde. Wider Erwarten ergab sich keine gleichmäßige Ablenkung des Meßstrahls. Vielmehr entstand auf dem Leuchtschirm eine Figur ähnlich derjenigen in

Bild 15c in Form eines Doppelbogens. Bei Änderung der Anodenspannung änderte sich die Gestalt der Leuchtfigur, auch blieb die Figur zeitlich nicht konstant,

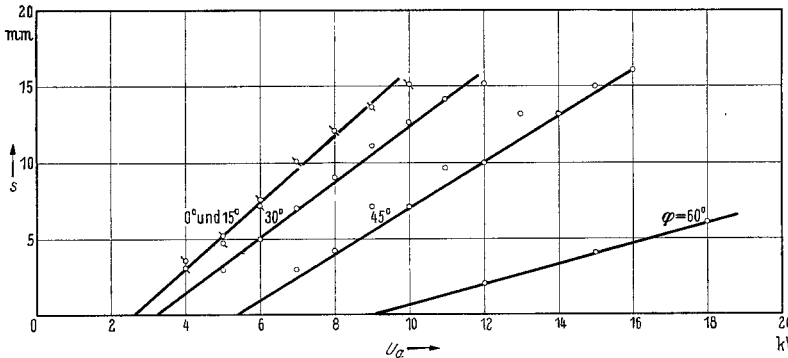


Bild 11. Aufladungsverlauf einer elektronenbeschossenen Glasplatte, dargestellt durch die Ablenkung  $s$  des Meßstriches in Abhängigkeit von der Anodenspannung  $U_a$  bei verschiedenen Elektronenauftreffwinkeln  $\varphi$ .

so daß definierte Auslagsmessungen nicht möglich waren. Es wurde darum die Rasterbeschießung fallengelassen. Stattdessen wurde Punktbeschießung oder günstiger noch Strichbeschießung der Prüfplatte angewandt; und zwar die Strichbeschießung derart, daß der Kathodenstrahl auf der Prüfplatte einen Strich

<sup>1)</sup> Bei der vorher erwähnten Fortführung der Versuche wird der Primärelektronenstrom um drei Größenordnungen bis zu 0,5 mA gesteigert. Die vorstehenden Ergebnisse bei Metallplatten wurden grundsätzlich bestätigt, auch die Aufladeverzögerung und bei schrägstehender Prüfplatte die stärkere Neigung der Aufladegeraden. Im Gegensatz zu meinen Versuchen ergibt sich eine Abhängigkeit der Aufladungshöhe von der Dauer und der Stromstärke der Beschießung, die wahrscheinlich von mir wegen des kleinen Strahlstromes nicht festgestellt werden konnte. Die neuen Versuche zeigen, daß nach genügend langer Beschießungsdauer die Aufladung einen konstanten Wert erreicht. Die vom Elektronenstrahl beschossenen Stellen sind dann weitgehend von Verunreinigungen und Gasresten befreit. Jedoch bleibt die Aufladung auch jetzt noch abhängig von der Stärke des Strahlstromes, und zwar nimmt sie mit wachsendem Strom zu. So ergibt sich für Aluminium bei  $i_1 = 0,35$  mA die 2. Gleichgewichtsspannung zu 1,5 kV. Eine Erklärung der Stromabhängigkeit der Aufladung fehlt noch.

Faßt man die höchste Stelle des Buckels der Leuchtschirmfiguren ins Auge, und verringert allmählich den Abstand Meßstrahlebene—Prüfplatte, so stellt man fest, daß der Abstand dieser höchsten Stelle von der Prüfplatte zunächst langsam kleiner wird, dann ein Minimum erreicht und schließlich wieder wächst. Dieses Minimum des Buckelabstandes von der Prüfplatte eignet sich gut zur Ausschlagmessung, da es leicht einzustellen ist und sich gut reproduziert. Es wurde darum immer für die Messungen benutzt. Da Strichbeschießung naturgemäß größere Ausschläge gibt als Punktbeschießung, wurde im allgemeinen mit ersterer gearbeitet. Die Strichlänge betrug etwa 30 mm, die Ablenkungsfrequenz 50 Hz.

Bei den Messungen wurde stets kontrolliert, ob es sich bei der Aufladung wirklich um eine Folge von Sekundärelektronenemission in Gegend der 2. Gleichgewichtsspannung handelte. Dies geschah durch die Feststellung, daß Schrägstellen der Prüfplatte wegen der damit verbundenen Erhöhung der 2. Gleichgewichtsspannung eine Verringerung des Ausschlags zur Folge hat.

a) **Glas.** Die Prüfplatten wurden geschliffen, poliert und gereinigt in die Meßeinrichtung eingesetzt. Qualitativ ergab sich bezüglich der Aufladung bei allen untersuchten Glassorten ein den Metallen ähnliches Verhalten. Bild 11 zeigt die Aufladekurve von „Jenaer Glas 2954 III“<sup>1)</sup>. Nach Überschreiten der 2. Gleichgewichtsspannung setzt die Aufladegerade ein. Bei Schirmdrehung wird die Aufladung kleiner. Bild 12 gibt für dasselbe Glas die Abhängigkeit der 2. Gleichgewichtsspannung vom Schirmdrehwinkel wieder.

Die Empfindlichkeit der Meßanordnung wird durch die Steigung der Aufladegerade angezeigt. Für den vorliegenden Fall beträgt sie 2 mm/1000 V; sie ist also 20mal kleiner als die bei einer Metallplatte. Das ist verständlich, da hier das auf den Meßstrahl wirkende Ablenkkfeld wesentlich kürzer ist; denn praktisch wirkt nur das elektrische Feld am vorderen Ende des vom Hauptstrahl geschriebenen Elektronenstriches ablenkend auf den Meßstrahl ein. Ein Beweis dafür ist, daß durch Verlängerung des Striches die Ablenkung nur wenig zunimmt. Die Empfindlichkeit der Meßanordnung kann man gegebenenfalls durch Verlängern des Meßstrahlhebelarmes vergrößern.

Die Höhe der Aufladung ist, wie man nach der Theorie erwartet, unabhängig von der Stromstärke des Hauptstrahls.

Ein Anlaufgebiet der Aufladung unterhalb der 2. Gleichgewichtsspannung erscheint bei Glas ebenfalls. Macht man Aufladungsmessungen mit abnehmender Anodenspannung, so liegen die erhaltenen Werte höher als die, die man bei zunehmender Anodenspannung mißt. Mit größerem Primärelektronen-Auftreffwinkel wird die Aufladegerade weniger steil. Es ist dieselbe Erscheinung, die weniger ausgeprägt bei den Aufladegeraden der Metalle beobachtet wird. Die Ursache der zuletzt beschriebenen Erscheinungen konnte noch nicht festgestellt werden. Der Umbau einiger Teile der Versuchsanordnung wird vielleicht eine Klärung bringen<sup>2)</sup>.

Im wesentlichen jedenfalls weist der Isolierstoff Glas dasselbe Verhalten gegenüber Elektronenbeschießung auf wie Metall. Überschreitet die Anodenspannung die

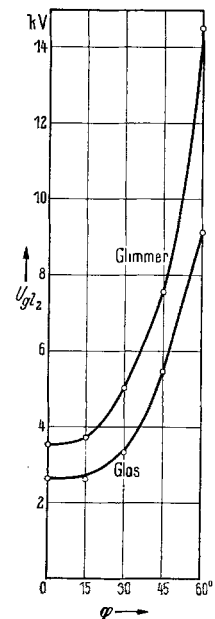


Bild 12. Abhängigkeit der zweiten Gleichgewichtsspannung  $U_{gl2}$  vom Elektronenauffreffwinkel  $\varphi$  für eine Glas- und Glimmerplatte.

<sup>1)</sup> Zur Verfügung gestellt vom „Jenaer Glaswerk Schott u. Gen.“.

<sup>2)</sup> Die mitgeteilten Untersuchungen wurden 1937/38 ausgeführt. In einer kürzlich erschienenen Arbeit zeigt C. Hagen [Phys. Z. 40 (1939) S. 621], daß diese „Schlüpfung“ der Aufladegeraden durch die Fortsetzung des zwischen Gehäuse und Prüfplatte bestehenden elektrischen Feldes in die Prüfplatte hervorgerufen wird. Die Anzahl der Sekundärelektronen wird dadurch größer.

Spannung, bei der  $\eta=1$  wird, so lädt sich das Glas auf, und zwar proportional der Zunahme von  $U_a$ . Bei senkrechtem Primärelektronenaufprall mit der kleinsten verwendbaren Anodenspannung von 4000 V wird das Glas schon aufgeladen. Die 2. Gleichgewichtsspannung muß also kleiner als 4000 V sein; sie ergibt sich durch Verlängerung der Aufladungsgeraden zu 2700 V (Bild 11).

Eine plötzliche Zunahme und anschließend eine langsame Abnahme der Aufladung bei Drehung des Isolators aus der waagerechten Lage, die sich sinngemäß nach den Untersuchungen von Wehnelt<sup>1)</sup> und seinen Schülern hätte zeigen können, wurde nicht bemerkt. Wahrscheinlich deshalb, weil die hier benutzten Spannungen zu hoch waren; denn diese Erscheinung wandert nach Wehnelt mit zunehmender Spannung nach größeren Verdrehungswinkeln und verschwindet anscheinend zuletzt vollständig.

**b) Glimmer.** Die zu untersuchende Glimmerplatte<sup>2)</sup> wird in genügender Größe von  $60 \times 60 \text{ mm}^2$  auf einer Glasscheibe befestigt, die in die Bernsteinhalterung eingelegt wird. In Bild 12 sind auch für Glimmer die aus den Messungen erhaltenen 2. Gleichgewichtsspannungen bei den verschiedenen Primärelektronen-Auftreffwinkeln aufgetragen. Der Kurvenverlauf ähnelt dem des Glases, mit Ausnahme der Schirm-drehwinkel über  $45^\circ$ , wo die 2. Gleichgewichtsspannung des Glimmers bedeutend höher liegt. Das kann vielleicht folgendermaßen erklärt werden: Da der Glimmer aus sehr dünnen, fest aufeinandergeschichteten Blättchen besteht, ist anzunehmen, daß die Primärelektronen bei sehr schrägem Einfall nur im ersten Blättchen Sekundärelektronen erzeugen, die leicht das Blättchen verlassen können. Bei steilerem Einfall können die in dem zweiten und in den folgenden Blättchen erzeugten Sekundärelektronen wegen ihrer an und für sich geringen Energie, wenn sie überhaupt die Oberfläche des ersten Blättchens erreichen, selten noch dazu die Austrittsarbeit leisten und erscheinen deshalb nicht als freie Sekundärelektronen.

Einige Glimmerstücke wurden in waagerechter Lage nicht im geringsten aufgeladen. Das bekräftigt erneut die Behauptung, daß die Isolatoren sich Elektronenbeschießung gegenüber genau so verhalten wie Metalle. Manche Versuchsreihe zeigte anomale Aufladekurven, die nach Herausnahme der Glimmerplatte ihre Erklärung fanden. Es zeigten sich nämlich vielfarbige Kreise und andere Formen auf den Platten, was bedeutet, daß die einzelnen Blättchen des Glimmers sich voneinander gelöst hatten. Besonders häufig geschah dies bei langer und starker Bestrahlung. Manchmal wurde eine Primärelektronen-Stromabhängigkeit der Aufladung bemerkt, d. h. die Ablenkung des Meßstriches nahm mit größerem Primärelektronenstrom zu, oder anders ausgedrückt, die Sekundärelektronenemission des Glimmers wurde kleiner. Diese höhere Aufladung ist offenbar der Reinigung oder der Ermüdung der von den Primärelektronen beschossenen Stellen des Isolators zuzuschreiben; denn bei anschließender Verringerung des Primärelektronenstroms bleibt die vorherige Höhe der Aufladung bestehen.

Erwähnenswert ist noch, daß eine auf die Glimmerplatte aufgebrachte Ladung sich noch stundenlang nachher durch kurzzeitiges Einschalten des Meßstriches nachweisen ließ (Haupt- und Meßstrahl wurden natürlich sofort nach der Aufladung ausgeschaltet)<sup>3)</sup>.

**c) Fluoreszenzschirmaufladungen.** Mittels der Versuchsanordnung wurden weiter Leuchtschirme der verschiedensten Fluoreszenzmaterialien auf Aufladung untersucht. Die für die Versuche benutzten Leuchtschirme wurden in der üblichen Weise hergestellt. Auf die mit verdünntem Wasserglas gut benetzte Aluminium- oder Glasplatte wurde reichlich Fluoreszenzmaterial aufgestäubt. Die Höhe der

<sup>1)</sup> A. Wehnelt, Z. Phys. 48 (1928) S. 165.

<sup>2)</sup> Zur Verfügung gestellt von „Jaroslaws Glimmer-Fabrik“.

<sup>3)</sup> H. Hintenberger, Z. Phys. 114 (1939) S. 98.

2. Gleichgewichtsspannung einer mit verdünntem Wasserglas bestrichenen Aluminiumplatte beträgt für  $\varphi=0^\circ$  9 kV (s. VI, 1). Bei senkrechtem Einfall der Primärelektronen kann also, wenn das Fluoreszenzmaterial sich nicht selbst auflädt, das aufgestrichene Wasserglas erst von 9000 V an eine Aufladung verursachen. Eine mit verdünntem Wasserglas bestrichene Glasplatte besitzt ebenfalls höhere 2. Gleichgewichtsspannung als in sauberem Zustande. Sowohl die auf Glas- als auch die auf Aluminiumplatten hergestellten Leuchtschirme wurden, mit nur zwei Ausnahmen, bei Elektronenbeschießung bis 20000 V in Strich- oder Rasterform nicht aufgeladen. Wohl zeigten sich auf der Grenze zwischen Fluoreszenzmaterial und Aluminium bzw. Glas kleine Buckel (Bild 22), die sich langsam mit zunehmender Anodenspannung vergrößerten. Da sie jedoch bei Schirmdrehung nur wenig flacher, dafür aber breiter wurden, sind sie nicht als durch Sekundärelektronenemission verursacht anzusehen. Es kann sich nur um eine durch die Elektronenbeschießung gebildete Potentialschicht handeln, deren Größe unabhängig vom Primärelektronen-Auftreffwinkel ist. Durch Rasterbeschießung wurden oberhalb 18000 V die auf Glas hergestellten Kalziumwolframat- und Zinksulfidschirme aufgeladen. Bei Schirmdrehung nimmt die Aufladung stetig ab. Da die gleichen Schirme bei Strichbeschießung keine Aufladung aufweisen, ist die Aufladung bei Rasterbeschießung wahrscheinlich auf die Aufladung des Glases zurückzuführen, zu dem Elektronen durch die bestehenden Zwischenräume des Fluoreszenzmaterials gelangen können. Der plötzliche Einsatz der Aufladung bei 18000 V läßt sich folgendermaßen erklären. Bis 18000 V überwiegt die Sekundärelektronenemission des Fluoreszenzmaterials ( $\eta > 1$ ). Über 18000 V reicht auch die große Ausbeute des Fluoreszenzmaterials nicht aus, um die geringe Ausbeute des Wasserglases auszugleichen. Das Auftreten einer anderen Erscheinung, die der vorhergenannten ähnlich ist, gibt der vorstehenden Erklärung einen gewissen Rückhalt. Beschießt man nämlich durch ein Elektronenstrichraster teils eine isolierte Aluminiumplatte und teils einen darauf befindlichen Leuchtschirm, so erfolgt nur bei einem bestimmten Verhältnis der beiden vom Raster bestrichenen Flächen eine Aufladung, deren Höhe ebenfalls von diesem Verhältnis abhängig ist.

Die Ergebnisse dieser Versuche weichen ab von denen, die Hagen und Bey<sup>1)</sup> mit auf andere Art und Weise hergestellten Leuchtschirmen erhalten haben. Die Art der Leuchtschirmherstellung ist also von wesentlichem Einfluß auf deren Verhalten. Daß sich nach unserer Beobachtung normale, durch Aufstäuben von Fluoreszenzmaterial auf Wasserglas hergestellte Leuchtschirme bei Anodenspannungen unter 20000 V nicht aufladen, ist für den praktischen Oszillographenbetrieb und das Fernsehen von großer Bedeutung.

## VII. Einfluß des Ableitwiderstandes einer metallischen Prüfplatte auf ihre Aufladung.

Ist die Anodenspannung  $U_a$  größer als die 2. Gleichgewichtsspannung  $U_{gl2}$ , so lädt sich eine metallische Prüfplatte bei vollkommener Isolation ( $R=\infty$ , Bild 2) solange negativ auf, bis sie von Primärelektronen der Geschwindigkeit  $U_{gl2}$  getroffen wird. Sie erhält die Aufladespannung  $U=U_a-U_{gl2}$ . Im Schaubild ergibt sich die bekannte Aufladegerade (Bild 13).

Ist die Prüfplatte nicht vollkommen isoliert, vielmehr über einen endlichen Widerstand  $R$  mit der Anode verbunden (Bild 2), so wird die Aufladespannung eine andere werden. In diesem Falle sei sie mit  $u$  bezeichnet.

Es läßt sich leicht übersehen, in welcher Weise jetzt  $u$  von  $U_a$  abhängen wird. Für Anodenspannungen, die zwischen der 1. und 2. Gleichgewichtsspannung liegen, wird sich die Prüfplatte (ähnlich wie im Falle vollkommener Isolation) ein wenig positiv aufladen. Wächst die Anodenspannung über  $U_{gl2}$  hinaus, so wird  $\eta$  kleiner

<sup>1)</sup> C. Hagen u. H. Bey, s. S. 146. — H. Bey, Phys. Z. 39 (1938) S. 605.

als 1, die Prüfplatte lädt sich negativ auf. Es entsteht ein Entladestrom  $i_3$  von der Prüfplatte zur Anode (Bild 2). Der zum Käfig abfließende Sekundärelektronenstrom  $i_2$  bleibt darum kleiner als  $i_1$ , d. h. es stellt sich ein Wert  $\eta$  ein, der zwischen 0 und 1 liegt; die Geschwindigkeit der auf die Prüfplatte auftreffenden Primärelektronen  $U_{el}$  wird größer als  $U_{gl2}$ , d. h. die Aufladespannung  $u$  bei nicht vollkommener Isolation wird kleiner als die Aufladespannung  $U$  bei vollkommener Isolation. Während ferner im Falle  $R = \infty$  die Aufladespannung  $U$  linear mit  $U_a$  ansteigt, strebt für endliche Werte von  $R$  mit wachsender Anodenspannung die Aufladung  $u$  einem endlichen Grenzwert zu. Da nämlich  $i_3$  höchstens gleich  $i_1$ ,  $u$  höchstens gleich  $i_1 \cdot R$  sein kann,

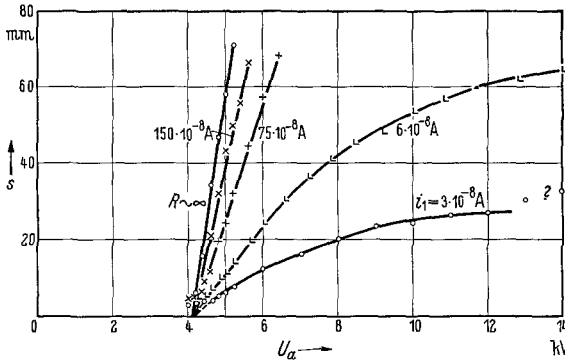


Bild 13. Aufladungsverlauf einer mit  $1,9 \cdot 10^{10} \Omega$  geerdeten Aluminiumplatte, dargestellt durch die Ablenkung  $s$  des Meßstriches in Abhängigkeit von der Anodenspannung  $U_a$  bei verschiedenen Primärelektronenströmen  $i_1$ .

gewichtsspannung ändert. Dieser erste Anstieg läßt sich leicht rechnerisch bestimmen. Für  $\eta$  werde dazu als Annäherung für die Nachbarschaft von  $U_{gl2}$  angesetzt:

$$\eta = 1 - k(U_{el} - U_{gl2}),$$

worin  $k$  der Ableitung der  $\eta$ -Kurve im Punkte  $U_{gl2}$  entspricht. Nach Bild 2 ist:

$$u = i_3 \cdot R = (i_1 - i_2) \cdot R = i_1(1 - \eta) \cdot R$$

oder, mit obiger Annäherung für  $\eta$ :

$$\begin{aligned} u &= i_1 \cdot k(U_{el} - U_{gl2}) \cdot R \\ &= i_1 \cdot k(U_a - u - U_{gl2}) \cdot R, \end{aligned}$$

d. h.

$$u = \frac{U_a - U_{gl2}}{1 + \frac{1}{i_1 \cdot k \cdot R}}.$$

Im Falle vollkommener Isolation ist die Aufladespannung:

$$U = U_a - U_{gl2}.$$

Somit ergibt sich:

$$u = \frac{U}{1 + \frac{1}{i_1 \cdot k \cdot R}}.$$

Diese Beziehung gibt, wie man sofort sieht, in den Grenzfällen  $R=0$  und  $R=\infty$  das Verhalten der Aufladespannung richtig wieder. Darüber hinaus zeigt sie, daß die Aufladespannung zunächst um so steiler ansteigt, je größer das Produkt aus  $i_1$  und  $R$  ist. Bei Messung von  $u$ ,  $U$ ,  $i_1$  und  $R$  kann sie dazu dienen, den Anstieg von  $\eta$  in der Gegend von  $U_{gl2}$  zu bestimmen.

ist die Geschwindigkeit  $U_{el}$  der auf die Prüfplatte auftreffenden Primärelektronen höchstens um den Betrag  $i_1 \cdot R$  kleiner als  $U_a$ ; für sehr groß werdende Anodenspannung  $U_a$  bedeutet dies, daß  $\eta$  dem Wert 0, d. h.  $i_3$  dem Wert  $i_1$  und somit  $u$  dem Wert  $i_1 \cdot R$  zustrebt, der mit Sekundärelektronenemission nichts zu tun hat.

Wie steil die Aufladespannung zunächst ansteigt, wenn  $U_a$  über  $U_{gl2}$  hinauswächst, das hängt nicht nur von der Größe des Ableitwiderstandes  $R$  und des Primärstromes  $i_1$  ab, sondern auch davon, wie schnell sich  $\eta$  in der Gegend der 2. Gleich-

Bild 13 zeigt für eine Aluminiumprüfplatte das experimentell gefundene Verhalten von  $u$  im Falle  $R=1,9 \cdot 10^{10} \Omega$  (Gold-Quarz-Widerstand) für verschiedene Werte von  $i_1$ . Außerdem ist der Fall vollkommener Isolation ( $R=\infty$ ) mit eingetragen. Die Kurven zeigen das erwartete Verhalten der Aufladespannung. Der Anstieg in der Gegend von  $U_{gl2}$  ist um so steiler, je größer der Primärelektronenstrom ist. Bei den beiden kleineren Strömen erkennt man ferner deutlich, daß mit wachsendem  $U_a$  die Aufladung einem Grenzwert zustrebt. Mit Hilfe obiger Gleichung ergibt sich aus den Kurven die Neigung der Ausbeutekurve in der Gegend der 2. Gleichgewichtsspannung zu  $k=0,027/100 \text{ V}$  in guter Übereinstimmung mit den aus der Literatur bekannten Werten von 0,025 und 0,030 je 100 V. Eine gleichartige Messung ergab für Nickel den Wert  $k=0,033/100 \text{ V}$ , ebenfalls in guter Übereinstimmung mit den aus dem Schrifttum bekannten Werten (0,030 und 0,040/100 V).

In Bild 14 ist noch logarithmisch die Annäherung von  $u$  an den Grenzwert  $i_1 \cdot R$  aufgetragen, und zwar für die beiden kleineren Primärelektronenströme. Man erkennt aus der Geradlinigkeit der Kurven, daß sich die Aufladespannung  $u$  ihrem Grenzwert  $i_1 \cdot R$  exponentiell nähert:

$$\frac{i_1 \cdot R - u}{i_1 \cdot R} = c^{U_a - U_{gl2}}$$

Für  $c$  ergibt sich als Wert ungefähr 0,8.

### VIII. Einige charakteristische Aufladungsverteilungen.

Der vom Meßstrahl auf dem Leuchtschirm beschriebene Linienzug zeigt an, wie sich die Ladung auf der Prüfplatte in den verschiedenen vom Strahl bestrichenen Regionen verteilt. Der Meßstrahl bildet das elektrische Feld der Prüfplatte sozusagen projektiv auf dem Leuchtschirm ab.

Bild 7 bringt als einfachsten Fall die Ablenkung des Meßstrahls durch ein ungefähr homogenes elektrisches Feld, das durch Aufladung einer elektronenbeschossenen Aluminiumplatte erzeugt wird. Man sieht, daß der Meßstrich parallel zur Plattenoberfläche abgelenkt wird.

Die Untersuchung von Isolatoren auf die Höhe ihrer 2. Gleichgewichtsspannung machte, wie vorher erwähnt, zuerst Schwierigkeiten. Kein Teil des Aufladungsbildes war geeignet, durch seine Höhenlagenänderung die Zu- oder Abnahme der Aufladung meßbar zu machen; denn außer der Höhe änderte sich gleichzeitig die Form des Aufladungsbildes. Diese Schwierigkeit wurde durch die Hauptstrahlpunkt- bzw. hauptsächlich durch die Hauptstrahlstrichbeschießung, die in Richtung der Meßstrahlachse erfolgte, überwunden. Die Potentialverteilung dieser Aufladungsart für Isolatoren sieht man in Bild 10. Sie wurde durch absatzweises Höherschieben des Meßstriches aufgenommen. Deutlich

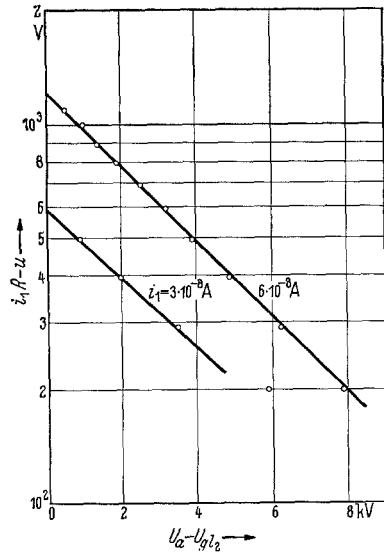


Bild 14. Die beiden gekrümmten Aufladungskurven von Bild 13 sind als Exponentialkurve

$$\frac{i_1 \cdot R - u}{i_1 \cdot R} = c^{U_a - U_{gl2}}$$

aufgetragen. Der Grenzwert  $i_1 \cdot R$  der Aufladung ist durch den Spannungsabfall des Primärelektronenstromes  $i_1$  am Ableitwiderstand  $R$  gegeben.

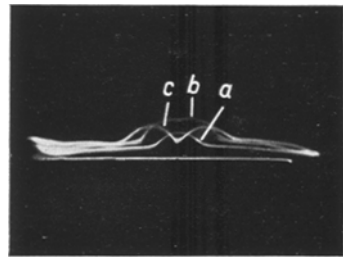


Bild 15. Übergang von Elektronenpunktbeschießung (a) zu Elektronenstrichbeschießung senkrecht zur Meßstrahlachse, und zwar 10 (b) und 20 (c) mm lang auf Glas.  $U_a = 5 \text{ kV}$ .

erkennt man das enge Zusammenrücken der Potentiallinien über der Mitte des Halbkreises, wodurch die genaue Einstellung des Elektronenzeigers auf den kleinsten Kreishalbmesser sehr erleichtert wird.

Wird ein Isolator vom Primärelektronenstrahl in Form eines Striches der senkrecht zur Meßstrahlachse verläuft, beschossen, so erhält man Bild 15b und c. Bild 15b entspricht einer Strichlänge von 10 mm, Bild 15c einer Strichlänge von 20 mm. Zum Vergleich ist mit Bild 15a noch die Leuchtfigur, die man bei Punktbeschießung erhält, angegeben. Die Ursache für die spitze Einbuchtung von Bild 15c ist noch unklar.

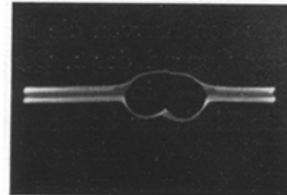
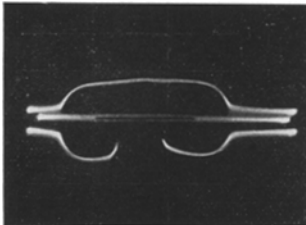
Bild 16. Kupferdraht  $U_a = 6$  kV.Bild 17. Glasstab  $U_a = 7$  kV.

Bild 16 u. 17. Aufladung eines mit einem 10 mm Elektronenstrich beschossenen Kupferdrahtes und Glasstabes, die senkrecht zur Meßstrahlachse stehen.

Das Aufladungsbild eines elektronenbeschossenen isolierten Kupferdrahtes, der senkrecht zur Haupt- und Meßstrahlachse steht, brachte keine Klärung, denn wie Bild 16 zeigt, ist die Ablenkung über die ganze Länge des Drahtes, mit Ausnahme der Enden und des unter der Mitte befindlichen, ebenfalls aufgeladenen Befestigungsdrahtes gleich groß. Ein Glasstäbchen, das in der gleichen Stellung steht und auf einem

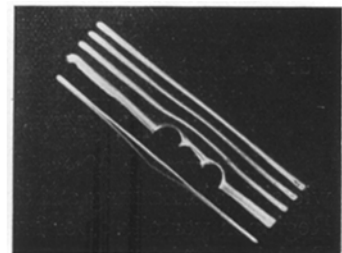
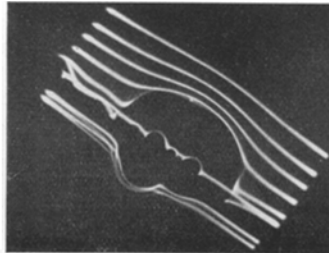
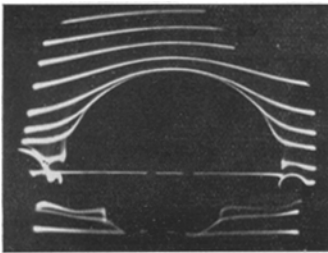
Bild 18  $\varphi = 0^\circ$ .Bild 19.  $\varphi = 30^\circ$ .Bild 20  $\varphi = 45^\circ$ .

Bild 18 bis 20. Verminderung der Aufladung einer Glasplatte bei Schirmverdrrehung. Die Elektronenbeschießung der Glasplatte erfolgt in Ellipsenform, deren kleine Achse durch die Restladungen in der Nulllinie sichtbar wird.

Quarzröhrchen befestigt ist, läßt wieder die größere Aufladung an den Enden der 10 mm-Elektronenstrichbeschießung auf dem oberen Teil gut erkennen (Bild 17). Dagegen ist die Ablenkung auf der Unterseite unerwarteterweise gleich hoch, was gleichmäßige Aufladung der unteren Seite des Glasstäbchens bedeutet.

Die Bilder 18, 19 und 20 zeigen die Abnahme der Aufladung bei schräger werdendem Auftreffen der Primärelektronen (größeres  $\eta$ ) auf eine Glasplatte, und zwar für Auftreffwinkel von 0 (senkrechter Aufprall), 30 und 45°. Der Hauptstrahl beschreibt mit 50 Hz auf der Glasplatte eine Lissajoussche Figur (Ellipse), deren große Achse in Richtung des Meßstrahls liegt. Damit der Meßstrahl die Nulllinie des Aufladungsbildes aufzeichnen kann, muß der Hauptstrahl von der Glasplatte weggenommen werden. Die zurückbleibenden Restaufladungen der hauptsächlich beschossenen Stellen lenken den auf die Plattenoberfläche eingestellten Meßstrich ab, so daß die Größe der kleinen Achse der Ellipse durch die beiden niedrigen Ablenkungshalbkreise im mittleren Teil der Nulllinie gegeben ist. Durch die Aufladung der Glasplatte bildet



sich ein Potentialbild in der abgebildeten Form aus. Die Verminderung der Aufladungshöhe bei Schirmverdre- hung ist deutlich zu sehen.

Die verschieden große Sekundärelektronenemission zweier gleichzeitig beschos- sener Stoffe zeigen die Bilder 21 und 22. Auf einer Aluminiumplatte von  $100 \times 100 \text{ mm}^2$

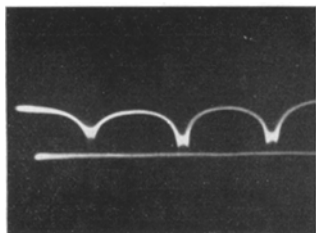


Bild 21. Elektronenpunktbeschießung einer isolierten Aluminiumplatte, auf der sich in Richtung der Meßstrahlachse drei Streifen Fluoreszenzmaterial befinden.  $U_a = 4,5 \text{ kV}$ .

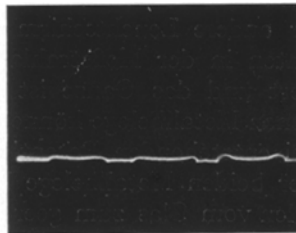


Bild 22. Dieselbe Aluminiumplatte, jetzt geerdet, wird durch einen Elektronenstrich beschossen, der quer über die Fluoreszenzstreifen geht.  $U_a = 12 \text{ kV}$ .

sind drei Streifen von je 15 mm Breite aus fluoreszierendem Zinksilikat (links), Zink- sulfid (Mitte) und Kalziumwolframat (rechts) mittels verdünnten Wasserglases auf- gebracht. Schießt man mit Elektronen von 4500 V, für die bei Aluminium  $\eta < 1$  ist, in Punktform auf die isolierte Metallplatte, so müßte sie sich aufladen und den Meßstrich parallel zur Oberfläche ablenken. Der Versuch belehrt uns eines anderen (Bild 21). Das Metall lädt sich offensichtlich nur teilweise auf, weil die Sekundär- elektronenemission der Leuchtphosphore, ausgelöst durch auftreffende Streuelektronen,

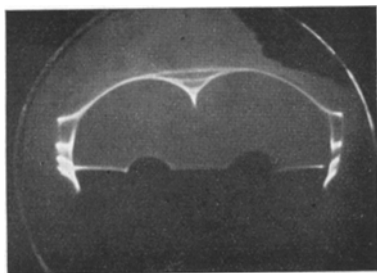


Bild 23. Aufladungsverteilung einer Glasplatte, die mit Ausnahme eines Rechtecks in der Mitte metallisiert ist. Der Metallbelag ist geerdet. Die vollständig mit Fluoreszenzmaterial be- deckte Platte wird durch ein Elektronenstrich- raster beschossen. Die Restaufladungen in der Nulllinie zeigen die Breite des Rechtecks an.  $U_a = 9,6 \text{ kV}$ .

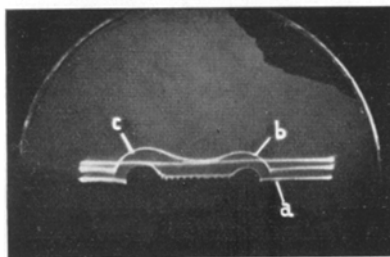


Bild 24. Aufladungsverteilung einer rechts und links metallisierten Glasplatte, die vollstän- dig mit Fluoreszenzmaterial bedeckt ist, bei Elektronenstrichrasterbeschießung.  $U_a = 9,8 \text{ kV}$ .  
a: Beide Metallbelege geerdet.  
b: Rechter Metallbelag allein geerdet.  
c: Linker Metallbelag allein geerdet.

anscheinend groß genug ist, um das Potential der Leuchtphosphore beinahe auf Anodenpotential zu halten. Mit geerdeter Aluminiumplatte, Strichbeschießung quer über alle Phosphore und 12000 V Anodenspannung macht Bild 22 die am Rande der Fluoreszenzschicht entstehenden und früher erwähnten Buckel (VI, 2 c) sichtbar, von denen die des Kalziumwolframates am größten sind.

Schließlich wurden noch dieselben Leuchtschirme auf ihre Potentialverteilung bei Aufladung durch Elektronenbeschießung untersucht, die durch Sichtbarmachen des verzerrten Strichrasters auf dem gedrehten Leuchtschirm<sup>1)</sup>, den Anlaß zum Bau der beschriebenen Versuchsanordnung gaben. Durch Beschießung mit 9600 V Elek- tronenstrichraster bildet der mit Ausnahme eines inneren Rechtecks metallisierte und

<sup>1)</sup> K. Scherer u. R. Rübsaat, a. a. O.

geerdete Glasschirm, der ganz mit Zinksulfid bedeckt ist, ein Potentialbild nach Bild 23 aus. Der untere Strich und die zwei Buckel zeigen die Oberfläche des Leuchtschirms und die Breite des ausgesparten Rechtecks an. Die in der früheren Arbeit aufgestellte Vermutung, daß in der Mitte die Aufladung am geringsten sei, wird durch diese Aufnahme bewiesen.

Der andere Leuchtschirm besteht aus drei gleich breiten Abschnitten, deren Längskanten in der Meßstrahlachse liegen. Die äußeren Teile der Glasplatte sind metallisiert und das Ganze ist mit Zinksulfid bedeckt. Die zwei, elektrisch nicht verbundenen Metallbelege können in dreifacher Variation geerdet oder isoliert werden. Die dabei entstehenden Potentialbilder sind auf Bild 24 vereinigt zu sehen. Durch Erden der beiden Metallbelege bilden sich die bekannten Buckel (*a*) an den Übergangsstellen vom Glas zum geerdeten Metall. Im mittleren Teil des zugehörigen Meßstriches erkennt man jede Zeile des weitgeschriebenen Strichrasters durch ihren Aufladungskreis. Erdet man nur einen Beleg, so entsteht auf dieser Seite eine wesentlich höhere Aufladung (*b*) als vorher, dagegen dringt das auf der gegenüberliegenden Seite hervorgerufene elektrische Feld nicht mehr bis zum angehobenen Meßstrich durch. Nach Umschalten der Erdung an den anderen Metallbeleg erhält man in spiegelbildlicher Lage das gleiche Aufladungsbild (*c*) wie vorher; dies verdeutlicht die Aufnahme, in der sich die beiden erhöhten Meßstriche in der Bildmitte schneiden.

### Zusammenfassung.

Nach einem kurzen Bericht über Meßmethoden und Messungen der Sekundärelektronenemission bzw. der Aufladung fester Körper bei Elektronenbeschießung wird ein neues von Rogowski vorgeschlagenes Meßverfahren zur Messung der Aufladung nach Höhe und Form beschrieben und auf seine Brauchbarkeit geprüft. Es benutzt zur Messung einen Elektronenzeiger, der die Aufladung abtastet und der gemäß ihrer Größe und Form abgelenkt wird. Mit diesem Verfahren findet man bei einer bestimmten Anodenspannung sowohl bei Beschießung von Leitern als auch von Isolatoren eine Aufladung des beschossenen Körpers, deren Höhe mit schrägerem Elektronenaufprall zurückgeht. Die Abhängigkeit zwischen Drehwinkel des Schirmes und der 2. Gleichgewichtsspannung, d. h. der Anodenspannung, bei der die Aufladung einsetzt und die Ausbeute gleich 1 wird, entspricht den aus dem Schrifttum bekannten Kurven. Es werden Aufladekurven einer Aluminium-, Glas- und Glimmerplatte gezeigt. Die Messungen werden an gewöhnlichen Platten des zu untersuchenden Stoffes, die gut gereinigt werden, ausgeführt. Sie geben also ein Bild dessen, was man unter diesen Umständen erwarten kann. Weiter wird festgestellt, daß Glas und Glimmer dasselbe Verhalten der Aufladung bei Elektronenbeschießung zeigen wie Leiter; also Einsetzen der Aufladung bei der 2. Gleichgewichtsspannung, danach ein der Zunahme der Anodenspannung proportionales Ansteigen der Aufladungshöhe und auch Aufladungsverminderung bei schrägerer Schirmstellung. Durch künstliche Verkleinerung des Isolationswiderstandes einer Metallplatte verringert sich, wie der Versuch zeigt, die Höhe der Aufladung. Es wird eine Beziehung der verminderten Aufladung zur Größe des Ableitwiderstandes und des Primärelektronenstromes aufgestellt. Verschiedene Fluoreszenzmaterialien, mit verdünntem Wasserglas auf Aluminium- und Glasplatten befestigt, zeigen bis 20000 V, mit Ausnahme der Kalziumwolframat- und Zinksulfidschirme auf Glas keine Aufladungen. Schließlich machen Potentialverteilungsbilder die durch Punkt-, Strich- und Rasterladungen auf Glas hervorgerufene Form des elektrischen Feldes sichtbar.

Diese Arbeit wurde angeregt von Prof. Dr.-Ing. E. h. Dr.-Ing. W. Rogowski, dem ich auch hier für seine fördernden Ratschläge herzlich danke.