

(Mitteilung aus dem Forschungslaboratorium Telefunken.)

Elektronenabtaster zur Strukturabbildung von Oberflächen und dünnen Schichten.

Von M. Knoll und R. Theile.

Mit 16 Abbildungen. (Eingegangen am 3. Mai 1939.)

Von den elektronenoptischen Methoden zur Abbildung der Struktur von Oberflächen und dünnen Schichten sind grundsätzlich die mit *ruhemdem* Elektronenstrahl, d. h. gleichzeitiger Bestrahlung aller Teile des Objektes, zu unterscheiden von denen mit *bewegtem* Elektronenstrahl („Elektronenabtaster“). Bei diesen befindet sich das Objekt auf einer Metallplatte („Signalplatte“), die als Prallelektrode in einer Kathodenstrahlröhre angeordnet ist; der spitze Elektronenstrahl tastet die Oberfläche des Objektes in Form eines Parallelzeilenrasters ab. Zur Wiedergabe des Strukturbildes wird die Signalplatte über einen Verstärker mit der Steuerelektrode einer *Bildschreibröhre* verbunden, deren Elektronenstrahl sich synchron mit dem Objektastaststrahl bewegt. Das „elektrische Bildsignal“ entsteht dabei in dem Stromkreis der am Objekt ausgelösten Sekundärelektronen; das Strukturbild kommt also durch Sekundäremissionsunterschiede in der Objekt Oberfläche zustande. Bei schlecht leitenden bzw. isolierenden Objekten ist diesem Sekundäremissionsbild noch ein Bild der Widerstands- bzw. Kapazitätsverteilung des Objektes überlagert. Das Auflösungsvermögen für kleinste Strukturabstände (geometrisches Auflösungsvermögen) und für kleinste Strukturunterschiede (Kontrastauflösungsvermögen) wird diskutiert. Die Anwendungsmöglichkeiten der Strukturabbildung mit dem Elektronenabtaster werden an einigen Beispielen gezeigt.

Zur Strukturforschung mittels Licht-, Röntgen- oder Elektronenstrahlen stehen Methoden der *physikalischen* wie der *geometrischen* Optik zur Verfügung, von denen die letzteren die Struktur eines Körpers in ihrer räumlichen bzw. flächenhaften Verteilung *unmittelbar* erkennen lassen, während die Struktur bei den ersteren aus den erhaltenen Beugungs- bzw. Interferenzfiguren *mittelbar* erschlossen werden kann. Derartige physikalisch-optische Strukturuntersuchungen erstrecken sich vornehmlich auf Objekte mit gleichmäßigem kristallinem Aufbau, deren Gitterabstände von der Größenordnung der Wellenlänge des analysierenden (unbewegten) Sondenstrahls sind. Die *geometrisch* optische Abbildung dagegen interessiert besonders für Objekte mit verschiedenem kristallinem oder auch amorphem Aufbau, wobei die Verteilung solcher Elemente von verschiedenem Aufbau über eine größere *Fläche* sichtbar gemacht wird.

In letzter Zeit hat die Strukturforschung durch die Anwendung elektronenmikroskopischer Methoden eine bedeutende Förderung erfahren, da

das vom lichtoptischen Wege verschiedene Zustandekommen des elektronenoptischen Bildes neue Strukturen, insbesondere Oberflächenstrukturen, aufdeckt, die der lichtoptischen Abbildung aus grundsätzlichen oder experimentellen Gründen verschlossen bleiben, und da überdies die Möglichkeit besteht, eine höhere Auflösung als mit dem Lichtmikroskop zu erreichen. Bisher haben sich folgende Methoden elektronenoptischer Strukturuntersuchungen ergeben:

I. Überblick über die elektronenoptischen Methoden zur Abbildung von Oberflächen und dünnen Schichten.

1. Anordnungen mit ruhendem Elektronenstrahl.

Alle Teile des Objektes werden *gleichzeitig* auf das Bildfeld übertragen. Der Querschnitt des Strahlenbündels ist in der Objektebene also stets gleich oder größer als das Objektfeld.

a) Durchstrahlungsmethode ¹⁾. Die Gegenstandsebene liegt zwischen Strahlenquelle und Abbildungssystem; das Elektronenstrahlbündel durchdringt den zu untersuchenden Gegenstand und wird gegebenenfalls durch ein Sammelsystem (z. B. eine Kondenserspule) auf diesen konzentriert. Die Methode entspricht der Beleuchtung im durchfallenden Licht beim normalen Mikroskop, wobei die Kontraste durch verschiedene Absorption oder verschiedene Streuung der Elektronen in den verschiedenen Teilen des Objekts entstehen ²⁾.

Beispiel: Abbildung dünner organischer bzw. biologischer Präparate ³⁾.

b) Auslöse- (Emissions-) Methoden. Die Strahlenquelle liegt in der Gegenstandsebene; beobachtet wird die durch Wärme, durch Ionenbombardement, durch lichtelektrischen Effekt, durch Anlegen hoher Felder oder durch Bestrahlung mit Elektronen hervorgerufene charakteristische Verteilung der Elektronenemission eines Körpers.

Auslösung durch Wärme ⁴⁾. *Beispiel:* Abbildung der charakteristischen Emissionsverteilung von Glühkathoden ⁵⁾ oder der Struktur einer als Kathode benutzten, erhitzten Materialprobe, auf der eine hoch emittierende

¹⁾ Vgl. M. Knoll u. E. Ruska, *Ann. d. Phys.* **12**, 607, 1932; *ZS. f. Phys.* **67**, 318, 1932; E. Ruska, ebenda **87**, 580, 1934; B. v. Borries u. E. Ruska, *Wiss. Veröff. Siemens* **17**, 99, 1938. — ²⁾ Vgl. B. v. Borries u. E. Ruska, *ZS. f. techn. Phys.* **19**, 402, 1938. — ³⁾ Vgl. L. Marton, *Bull. de la Classe de Sc. Ac. royale Belgique* **22**, 1336, 1936; F. Krause, *Radiologica* **3**, 122, 1938; B. v. Borries u. E. Ruska, *Wiss. Veröff. Siemens* **17**, 106, 1938. — ⁴⁾ Vgl. M. Knoll, F. G. Houtermanns u. W. Schulze, *ZS. f. Phys.* **78**, 340, 1932; E. Brüche u. H. Johannson, *Naturwissensch.* **20**, 353, 1932. — ⁵⁾ Vgl. E. Brüche, *ZS. f. Phys.* **98**, 77, 1935.

Substanz in sehr dünner Schicht (z. B. durch Verdampfung) niedergeschlagen ist, mit Hilfe der Elektronenemission dieser Schicht ¹⁾.

Auslösung durch Ionen ²⁾. *Beispiel*: Abbildung der durch Ionenaufprall hervorgerufenen örtlichen Verteilung der Elektronenemission einer kalten Kathode ³⁾.

Auslösung durch Licht ⁴⁾. *Beispiel*: Abbildung verschiedener Mineralien und Kristalle, hervorgerufen durch deren verschiedene lichtelektrische Emission ⁵⁾.

Auslösung durch hohe elektrische Feldstärke. *Beispiel*: Abbildung der Emissionsverteilung einer hoher Feldstärke ausgesetzten Al_2O_3 -Schicht ⁶⁾ oder der Orientierung der Netzebenen einer Wolframeinkristallspitze ⁷⁾.

Auslösung durch Elektronen ⁸⁾. Anordnung wie bei der Rückstrahlmethode, also Bestrahlung des Objekts mit einem Elektronenstrahlbündel, dessen Querschnitt mindestens gleich dem Bildfeldquerschnitt ist. Im Gegensatz zur Rückstrahlmethode ist *stets* ein Beschleunigungsfeld zwischen Objekt und Abbildungsfeld anzuordnen. Die ausgelösten Elektronen sind überwiegend Sekundärelektronen von der Geschwindigkeit weniger Volt, so daß chromatische Fehler bei der Abbildung relativ klein gehalten werden können. Der Kontrastumfang der Strukturbilder ist dadurch beschränkt, daß auch die Stellen kleinster Sekundäremission eine Grundhelligkeit im Bilde ergeben.

Beispiel: Strukturabbildung eines relativ zur Elektronenreichweite dicken Objekts ⁹⁾ ¹⁰⁾.

c) *Rückstrahlmethode* ¹¹⁾. Die Strahlenquelle liegt meist (seitlich) zwischen Gegenstandsebene und Abbildungssystem; das primäre Strahlenbündel wird innerhalb der Eindringtiefe der Elektronen in dem zu unter-

¹⁾ Vgl. E. Brüche u. W. Knecht, ZS. f. techn. Phys. **16**, 95, 1935. —

²⁾ Vgl. M. Knoll u. E. Ruska, Ann. d. Phys. **12**, 622, 1932. — ³⁾ Vgl. H. Mahl, ebenda **31**, 425, 1938. — ⁴⁾ Vgl. E. Brüche, ZS. f. Phys. **86**, 448, 1933. — ⁵⁾ Vgl. H. Mahl u. I. Pohl, ZS. f. techn. Phys. **16**, 219, 1935; H. Groß u. G. Seitz, ZS. f. Phys. **105**, 734, 1937. — ⁶⁾ Vgl. H. Mahl, Naturwissensch. **25**, 459, 1937. — ⁷⁾ Vgl. E. W. Müller, ZS. f. Phys. **108**, 668, 1938. — ⁸⁾ Vgl. M. Knoll u. E. Ruska, ZS. f. Phys. **78**, 335, 1932. — ⁹⁾ M. Knoll u. G. Lubszynski, Phys. ZS. **34**, 671, 1933; V. K. Zworykin, Journ. of Frankl. Inst. **215**, 554, 1933; E. Meschter, Rev. Scient. Instr. **9**, 12, 1938. — ¹⁰⁾ Bei einer Abart dieser Methode treffen die auslösenden Elektronen koaxial zum elektronenoptischen System von der Bildseite oder von rückwärts auf die Gegenstandselektrode. Im letzteren Falle ist die Geschwindigkeit der Primärelektronen so zu wählen, daß sie in der Schicht gerade eben absorbiert werden. Dann ist natürlich die Abbildung beliebig dicker Schichten nicht möglich. — ¹¹⁾ E. Ruska, ZS. f. Phys. **83**, 492, 1933.

suchenden Körper umgelenkt und gelangt dann, gegebenenfalls nach Homogenisierung durch ein Beschleunigungsfeld, in das Feld der Abbildungslinsen. Die Anordnung ist derjenigen der Abbildung bei reflektiertem Licht im normalen Mikroskop analog ¹⁾.

Beispiel: Strukturabbildung eines relativ zur Elektronenreichweite dicken Objekts ²⁾.

2. Anordnungen mit bewegtem Elektronenstrahl.

Die Helligkeitswerte einzelner Objektelemente werden durch Abtastung mit einem spitzen Elektronenstrahlbündel *nacheinander* nach einem gegebenenfalls periodisch wiederholten Schema (z. B. mit dem in der Fernsehtechnik üblichen Zeilenraster) übertragen und zum Bilde zusammengesetzt.

a) *Durchstrahlmethode* ³⁾. Die Elektronen des Abtaststrahles werden nach Durchstrahlung des Objekts unmittelbar hinter diesem von einer Auffangelektrode oder von einer synchron bewegten photographischen Schicht aufgenommen. Die in ersterem Falle auf die Elektrode gelangenden Stromimpulse werden über einen Sekundäremissions- oder Röhrenverstärker der Steuerelektrode einer Bildschreibröhre zugeführt, deren Elektronenstrahl synchron mit dem Objektabtaststrahl bewegt wird.

Beispiel: Abbildung von Zinkoxydkristallen durch direkte photographische Registrierung ⁴⁾.

b) *Auslösemethode* ⁵⁾. Das Objekt ist in Form einer Schicht auf einer Metallplatte („Signalplatte“) aufgebracht, die über einen Verstärker mit der Steuerelektrode einer Bildschreibröhre verbunden ist, deren Elektronenstrahl synchron mit dem Objektabtaststrahl bewegt wird.

¹⁾ Eine noch weitgehendere Analogie stellt die Strukturabbildung durch Spiegelung mit kurz vor der Oberfläche eines negativ geladenen Objekts umkehrenden Elektronen dar, vgl. G. Hottenroth, Ann. d. Phys. **30**, 705, 1937. Dort bewirken die Unebenheiten des Objekts eine inhomogene Verteilung des ursprünglich homogenen Elektronenbündels. — ²⁾ Die Kontraste entstehen hier durch das strukturbedingte Rückstrahlvermögen (Rückdiffusion bzw. elastische Reflexion) verschiedener Objektorte. Wie weit die zu erwartenden starken chromatischen Bildfehler sowie die relativ großen möglichen Umwege der rückstrahlenden Elektronen die Bildschärfe beeinträchtigen, ist schwer zu entscheiden, solange keine Versuche hierüber vorliegen. Die bei der Methode 1b bezüglich des Kontrastumfangs im Falle der Auslösung durch Elektronen gemachten Einschränkungen gelten analog auch hier. — ³⁾ Vgl. M. v. Ardenne, ZS. f. Phys. **109**, 553, 1938. — ⁴⁾ Vgl. M. v. Ardenne, ZS. f. techn. Phys. **19**, 407, 1938. — ⁵⁾ M. Knoll, ebenda **11**, 467, 1935.

Die Elektronen des Abtaststrahles (Primärelektronen) lösen im jeweiligen Auftreffort am Objekt Sekundärelektronen aus, deren Anzahl von der Struktur der abgetasteten Schicht abhängt. Diese Abhängigkeit kann durch verschiedenen Sekundäremissionsfaktor oder [indirekt ¹⁾] durch verschiedenen Widerstand oder verschiedene Kapazität des sekundäremittierenden Objekts bedingt sein. Da für die Abbildung nicht wie beim Elektronenmikroskop mit ruhendem Strahl gleiche Geschwindigkeit der Elektronen erforderlich ist, spielt die bei der Auslösemethode mit ruhendem Strahl störende Breite des Geschwindigkeitsspektrums der Sekundärelektronen keine Rolle (Wegfall des chromatischen Fehlers).

Beispiele. Vgl. Abschnitt II.

c) *Rückstrahlmethode* ²⁾. Anordnung wie bei der Auslösemethode, jedoch ist durch eine genügend hohe positive Vorspannung der Sekundäremissionsobjektelektrode gegen die Sekundäremissionsanode dafür gesorgt, daß diese nicht mehr von den langsamen *Sekundärelektronen*, sondern nur noch von den schnellen rückdiffundierten bzw. reflektierten *Primärelektronen* erreicht wird. Registriert wird also die verschiedene Rückdiffusion verschiedener Objektelemente.

Beispiele: Vgl. Anm. ²⁾.

II. Zustandekommen des Bildsignals bei der Abtastung einer Oberfläche mit bewegtem Elektronenstrahl (Auslösemethode).

Fig. 1 zeigt das grundsätzliche Schema einer Versuchsanordnung zur Strukturabbildung mit dem Elektronenabtaster. Die zu untersuchende Objektschicht *O* ist in der hochevakuierten Röhre *R* auf einer metallischen Grundplatte, der Signalplatte *M*, aufgebracht ³⁾. Das elektronenoptische System *S* dient zur Erzeugung eines spitzen Elektronenstrahlbündels. Durch geeignete Ablenkorgane *A* (Spulen bzw. Ablenkplatten) wird der Elektronenstrahl in zwei senkrecht zueinander stehenden Richtungen mit Hilfe von periodischen, sägezahnförmigen Wechselströmen bzw. Spannungen verschiedener Frequenz in der von der Fernsehtechnik her bekannten Weise in Form eines Zeilenrasters abgelenkt ⁴⁾. Die Abtastung mit dem bewegten Elektronenstrahl bewirkt eine „Bildfelderlegung“ und läßt räumlich

¹⁾ Vgl. II, 2 und 3. — ²⁾ M. Knoll, ZS. f. techn. Phys. 11, 467, 1935.

— ³⁾ Bei guter Leitfähigkeit ist das Objekt selbst Signalplatte; in diesem Falle kann die Schicht beliebig dick sein. — ⁴⁾ Über weitere Einzelheiten dieser Art der Bildübertragung vergleiche F. Schröter, Fernsehen, Berlin 1937.

nebeneinander liegende Strukturelemente zeitlich *nacheinander* zur Übertragung kommen. Die kleinere Ablenkfrequenz, die der Zahl der in einer Sekunde vollständig durchlaufenen Raster entspricht, heißt „Bildfrequenz“, die höhere, der sekundlichen Zeilenzahl entsprechende, „Zeilenfrequenz“. Das Verhältnis der beiden Ablenkfrequenzen gibt also die Zeilenzahl des Bildes und damit ein Maß für das geometrische Auflösungsvermögen der Strukturabbildung an.

Der Elektronenstrahl löst am jeweiligen Auftreffort *Sekundärelektronen* aus, die den Signalstromkreis über die Sekundäremissionsanode E , die Saugbatterie mit der Spannung U_p und den Signalwiderstand R_a schließen.

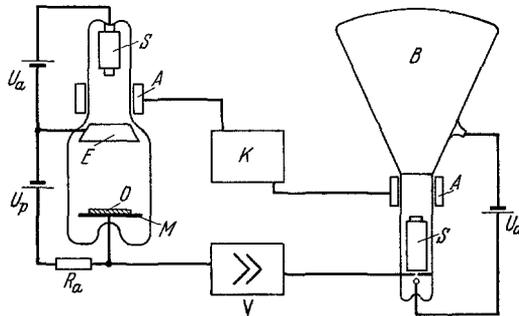


Fig. 1. Grundsätzlicher Aufbau des Elektronenabtasters zur Strukturabbildung.

S Abtaststrahler, A Ablenkspulen, E Sekundäremissionsanode, O Objektschicht, M Signalplatte, V Breitbandverstärker, K Kippgerät, B Bildschreibröhre.

Dabei stellt sich jeweils der den elektrischen Eigenschaften des getroffenen Elementes zugehörige Sekundärelektronenstrom ein, welcher der Struktur des Elementes entspricht. Der modulierte Bildsignalstrom stellt also den Inhalt des Strukturbildes dar.

Die an dem Außenwiderstand R_a ausgelösten Spannungssignale werden dem Eingang des Breitbandverstärkers V zugeführt. Man verwendet zweckmäßig einen widerstands-kapazitätsgekoppelten Verstärker, dessen untere Grenzfrequenz unterhalb der Zahl der pro Sekunde übertragenen Bilder liegt und dessen Verstärkungsabfall bei hohen Frequenzen mittels geeigneter Schaltglieder kompensiert ist. Ein solcher Verstärker eignet sich besonders deshalb gut zur Strukturbildübertragung, weil die Gleichspannungskomponente des Bildsignals unterdrückt wird, wodurch das Kontrastauflösungsvermögen dieser Abbildungsmethode wesentlich gesteigert werden kann (vgl. Abschnitt III, 2).

Zur *Wiedergabe* des Strukturbildes benutzt man eine der in der Fernseh-technik gebräuchlichen Bildschreibröhren¹⁾, deren Strahlstromstärke von der verstärkten Bildsignalspannung gesteuert und deren Elektronenstrahl synchron und konphas mit dem Abtaststrahl über das Bildfeld auf dem Leuchtschirm geführt wird. Die Zeitmodulation der Bildsignalspannung wird dabei in nebeneinander liegende Helligkeitswerte umgesetzt, die in ihrer Gesamtheit das Strukturbild des Objektes darstellen.

Das *Frequenzband* der Bildsignalspannung erstreckt sich von der Zahl n der pro Sekunde abgetasteten Bilder bis zur Grenzfrequenz

$$f_{\max} = n \cdot \frac{z^2}{2} \cdot \frac{a}{b} \text{ (}^2\text{)}.$$

Hierbei bedeuten: z die Zeilenzahl des Rasters und a/b das Seitenverhältnis des Bildes. Im Interesse eines geringen Verstärkeraufwandes und eines guten Verhältnisses von Nutz- zu Störspannung (hervorgerufen durch Schroteffekt, Widerstandsrauschen oder induzierte Fremdspannungen) ist eine möglichst kleine Breite des Frequenzbandes anzustreben. Die Zeilenzahl z soll daher nicht größer gewählt werden, als es zur Erkennbarkeit der jeweils untersuchten Struktur gerade nötig ist. Aus demselben Grunde ist bei subjektiver Betrachtung die Bildwechselzahl n so niedrig zu halten, daß dem Auge eben noch der Eindruck eines zusammenhängenden Bildes erscheint. Bei der *photographischen* Registrierung des Leuchtschirmbildes dagegen kann man mit der Bildfrequenz beliebig unter diese Grenze gehen und somit ein relativ hohes geometrisches Auflösungsvermögen bei schmalen Frequenzband erreichen.

Im folgenden soll der Mechanismus der Bildsignalerzeugung im Sekundärelektronenkreis bei Abtastung von Objektsubstanzen verschiedener elektrischer Eigenschaften näher betrachtet werden. Es zeigt sich, daß der Elektronenabtaster sowohl eine durch verschiedene Sekundäremission wie durch verschiedenen Widerstand oder durch verschiedene Kapazität gegebene Strukturverteilung wiederzugeben vermag.

1. Bildsignalerzeugung bei Abtastung metallisch leitender Objekte³⁾.

Es ist der Kreis der *Primärelektronen* e_1 (Fig. 2, Strom i_1 , äußere Pfeile) zu unterscheiden von dem Kreis der am Objekt ausgelösten *Sekundär-*

¹⁾ Über Ausführungsformen solcher Röhren vgl. M. Knoll, ZS. f. techn. Phys. **17**, 604, 1936 und F. Schröter, Fernsehen, Berlin 1937, S. 113. —

²⁾ Vgl. F. Schröter, Fernsehen, Berlin 1937, S. 40. — ³⁾ M. Knoll, ZS. f. techn. Phys. **16**, 467, 1935; H. Iams u. A. Rose, Proc. Inst. Radio Eng. **25**, 1048, 1937; C. F. Bennett, RCA-Rev. **2**, 414, 1938.

elektronen e_2 (Strom i_2 , innere Pfeile). Der Signalwiderstand R_a wird von dem Differenzstrom $i_p = i_2 - i_1$ durchflossen. Infolge des großen, dem Primärelektronenstrahl zugeordneten inneren Widerstandes ändert sich der Primärstrom i_1 selbst bei großen, durch Spannungsabfall an R_a oder durch

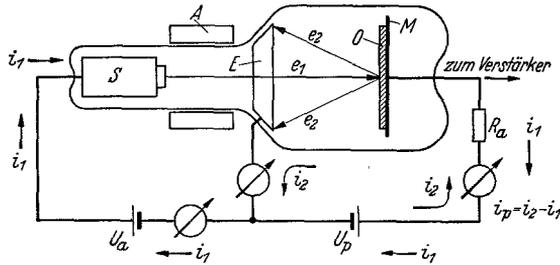


Fig. 2. Stromkreise der Abtaströhre. S Abtaststrahler, A Ablenkspulen, E Sekundäremissionsanode, O Objektschicht, M Signalplatte, e_1 Primärelektronen, e_2 Sekundärelektronen, i_1 Primärelektronenstrom, i_2 Sekundärelektronenstrom.

die Batterie U_p hervorgerufenen Potentialschwankungen auf der Objektfläche praktisch nicht, so daß i_1 lediglich als konstanter Zusatzstrom in der Betrachtung zu berücksichtigen ist.

Die Arbeitsweise des Elektronenabtasters ergibt sich aus der Abhängigkeit des Signalstromes i_p von der Vorspannung U_p der Objektplatte, welche durch die Sekundäremissionskennlinie dargestellt wird. In Fig. 3

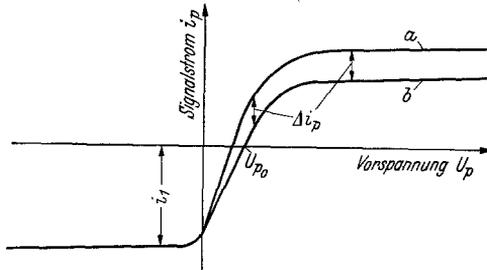


Fig. 3. Sekundäremissionskennlinien (Stromkreise Fig. 2) für zwei verschiedene Materialien.

sind zwei derartige Sekundäremissionskennlinien gezeichnet. Ist die Anode E negativ gegen die Objektelektrode vorgespannt, so können keine Sekundärelektronen gegen sie anlaufen; es fließt also nur der Primärstrom i_1 . Bei zunehmend positiver Vorspannung dagegen können mehr und mehr von den ausgelösten Sekundärelektronen abgesaugt werden, bis die Raumladung ganz verschwindet und der Sättigungswert erreicht wird. Der Verlauf der Sekundäremissionskennlinie hängt im einzelnen von der Art des

elektronenbestrahlten Materials ¹⁾, von der Einfallsrichtung ²⁾, der Stromstärke und Geschwindigkeit ³⁾ der Abtastelektronen sowie von der geometrischen Anordnung der Elektroden in der Röhre ab.

Tastet der Elektronenstrahl zwei benachbarte Objektstellen nacheinander ab, von denen der einen die Sekundäremissionskennlinie *a*, der anderen die Kennlinie *b* zugeordnet ist (Fig. 3), so ergibt sich beim Übergang ein Signalstromstoß Δi_p , der der Differenz der Ordinaten der beiden Kurven

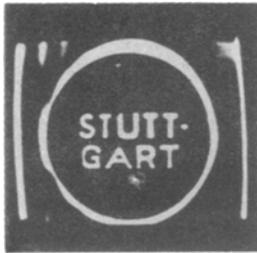


Fig. 4.

Fig. 4. Sekundäremissionsbild einer Nickelplatte mit Kohleschrift ($U_a = 3100$ Volt, $U_p = -10$ Volt). Die Sekundäremission des Nickels ist größer als die der Kohleschicht; da der verwendete Verstärker eine ungerade Anzahl von Stufen besaß, erscheint die Kohleschicht hell auf dunklem Untergrund.

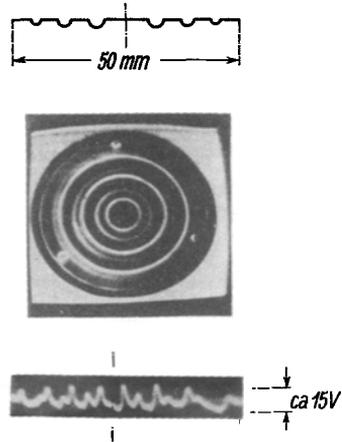


Fig. 5.

Fig. 5. Sekundäremissionsbild einer mit kreisförmigen Vertiefungen versehenen Nickelplatte. Die Sekundäremission ist an dem Rande der Vertiefungen am größten, wo die Primärelektronen schief zur Oberfläche einfallen. Oben Profil der Nickelplatte, unten Oszillogramm bei Ablenkung des Elektronenstrahls in einer Koordinate.

entspricht. Die Signalspannung $\Delta i_p \cdot R_a$ ist dabei *positiv*, wenn der Übergang von dem Ort kleinerer zu dem größerer Sekundäremission erfolgt. Bei einem Verstärker mit gerader Stufenzahl erscheint also die Stelle *größerer* Sekundäremission *heller*; Fig. 4 zeigt als Beispiel die Wiedergabe einer durch Aufbringen von Kohleschichten, Fig. 5 die Wiedergabe einer durch verschiedene Einfallsrichtung der Primärelektronen in ihren Sekundäremissionseigenschaften veränderten Nickeloberfläche ⁴⁾.

¹⁾ Vgl. z. B. R. Kollath, Phys. ZS. **38**, 202, 1937. — ²⁾ Vgl. z. B. H. Müller, ZS. f. Phys. **17**, 604, 1936. — ³⁾ Vgl. z. B. R. Theile, Telefunkenröhre H. 13, S. 98, 1938. — ⁴⁾ Aus M. Knoll, ZS. f. techn. Phys. **16**, 467, 1935.

Infolge der Abhängigkeit des Sekundäremissionsfaktors¹⁾ von der Primärelektronengeschwindigkeit (Fig. 6) ändert sich auch die Bildsignalstärke bei verschiedener Anodenspannung. Es kann sogar eine Bildsignalumkehr bei veränderlicher Anodenspannung vorkommen, wenn sich die Sekundäremissionskurven verschiedener Strukturelemente schneiden (Fig. 6).

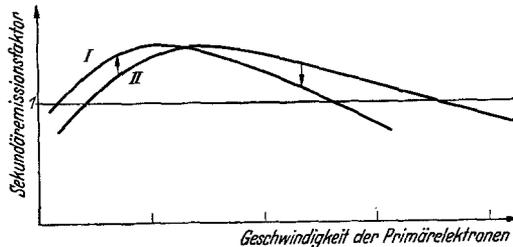


Fig. 6. Abhängigkeit des Sekundäremissionsfaktors (bzw. des Signalstroms i_p) von der Geschwindigkeit der Primärelektronen für verschiedene Materialien (I und II). Vorzeichenwechsel des Bildsignals Δi_p mit steigender Geschwindigkeit der Primärelektronen.

2. Bildsignalerzeugung bei Abtastung dünner Widerstands-Objektschichten.

Auch die Herstellung eines Strukturbildes von Objekten, die elektrisch als Widerstände aufzufassen sind, ist grundsätzlich möglich, wenn die Schichtdicke von der Größenordnung des abtastenden Strahldurchmessers ist, der Widerstand der Schicht eine gewisse, nachstehend definierte Größe besitzt und der Sekundäremissionsfaktor der Objektoberfläche für die Abtastelektronen größer als 1 ist²⁾ ³⁾.

¹⁾ In Fig. 6 ist als Ordinate nicht der Signalstrom, sondern der „Sekundäremissionsfaktor“ aufgetragen, der die Anzahl der pro Primärelektron ausgelösten Sekundärelektronen angibt, also durch das Stromverhältnis

$$\gamma = \frac{i_2}{i_1} = 1 + \frac{i_p}{i_1}$$

definiert ist. Da bei der Abtastung i_1 konstant ist, stellt das Verhältnis γ auch ein direktes Maß des Signalstromes dar.

²⁾ Die bekannten Bildabtaströhren mit Widerstandssteuerung (vgl. M. Knoll u. F. Schröter, Phys. ZS. **38**, 330, 1937; v. Ardenne, ZS. f. Hochfrequenztechnik **50**, 145, 1937; R. Theile, Telefunkenröhre **13**, 90, 1938) entsprechen ihrer Wirkungsweise nach dem hier behandelten Elektronenabtaster, jedoch rührt die Signalspannung dort nicht von einer Struktur der Widerstandsschicht (die möglichst gleichmäßig sein soll), sondern von der örtlichen Widerstandsänderung einer Halbleiterschicht durch Beleuchtung mit dem zu übertragenden Bildinhalt her. — ³⁾ Bei der direkten Widerstandssteuerung des Bildsignalstromes spielt die Stromrichtung in der Widerstandsschicht eine wesentliche Rolle. Der Signalstrom i_p muß stets aus der Schicht heraus fließen, i_2 muß also größer als i_1 sein (also Sekundäremissionsfaktor > 1). Näheres hierzu vgl. R. Theile, Telefunkenröhre 1938, Heft 13, S. 105 ff.

Der Abtastelektronenstrahl blendet aus der Widerstandsschicht ein seinem Querschnitt entsprechendes Element aus. Der diesem Element zugeordnete „Bildpunkt Widerstand“ schaltet sich zusätzlich in den Signalstromkreis ein (Fig. 2) und ändert die Stromspannungscharakteristik $i_p = f(U_p)$. Die aus Fig. 3 bekannte Sekundäremissions-, „Kurzschluß“-Kennlinie wird durch die „Arbeitskennlinie“ ersetzt, deren Zustandekommen in Fig. 7 für zwei verschiedene spezifische Widerstände der Objektschicht veranschaulicht ist (Addition der Widerstandsgeraden zur Sekundäremissionskennlinie). Das bei der Abtastung von Stellen verschiedenen

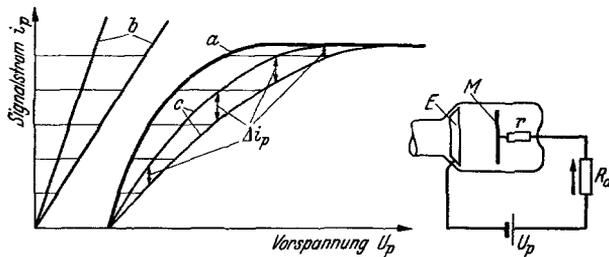


Fig. 7. Sekundäremissionskennlinien bei Abtastung einer Widerstandsschicht. Die Arbeitskennlinien ergeben sich aus der Addition der Sekundäremissionskennlinie und der Widerstandskennlinien. r Bildpunkt Widerstand, a Sekundäremissionskennlinie, b Widerstandskennlinien, c Arbeitskennlinien.

Halbleiterwiderstandes ausgelöste Δi_p entspricht der Ordinatendifferenz der beiden zugehörigen Kennlinien. Man erkennt, daß die Höhe dieses Bildsignals von der Größe der Vorspannung U_p abhängt. — Die Steuerung des Signalstromes durch verschiedene Bildpunkt Widerstände ist am größten, wenn der Bildpunkt Widerstand an den inneren Widerstand der Sekundäremissionsentladungsstrecke richtig angepaßt ist ¹⁾.

Für den Mechanismus der Bildsignalerzeugung ist weiterhin die jedem Element zugeordnete *Bildpunkt kapazität* zwischen dem Elektronenstrahlquerschnitt auf der Objektoberfläche und der Signalplatte von Bedeutung, die mit dem Bildpunkt Widerstand eine Zeitkonstante bildet und somit eine bestimmte *Einstelldauer* des Bildsignalstromes bei der momentan erfolgenden Abtastung eines jeweiligen Elementes bewirkt. Eine einwandfreie *direkte* Widerstandssteuerung des Signalstromes ist nur dann möglich, wenn diese Zeitkonstante kleiner als die Verweilzeit des Abtastelektronenstrahles auf einem „Element“, d. h. als die „Bildpunktdauer“ bleibt. Somit ist bei gegebener Objektbeschaffenheit der Abtastgeschwindigkeit

¹⁾ Über Einzelheiten vgl. R. Theile, Telefunkenröhre 1938, Heft 13, S. 90. (Theorie der widerstandsgesteuerten Bildabtaströhren).

und damit der Zeilen- bzw. Bildwechselzahl eine obere Grenze gesetzt. Ist die Bildpunktzeitkonstante sehr groß, d. h. etwa von der Größenordnung der Bildfrequenz, so entsteht zwar auch ein Widerstandsbildsignal bei Abtastung von Objektstellen mit verschiedenem Widerstand, jedoch ist der Mechanismus der Bilderzeugung von dem oben beschriebenen grundsätzlich verschieden (vgl. Abschnitt 3, letzter Absatz).

Da der Verlauf der Arbeitskennlinien von der Gestalt der Kurzschlußkennlinie und damit vom Sekundäremissionsfaktor abhängt, wird auch dessen örtliche Verteilung bei der Abtastung mit registriert. Eine schlechtleitende Objektfläche liefert also im Elektronenabtaster ein Widerstands- und Sekundäremissionsbild, die sich beide überlagern. Das Strukturbild ist also in diesem Fall nicht eindeutig einer Materialeigenschaft zugeordnet.

3. Bildsignalerzeugung bei Abtastung dünner isolierender Objektschichten¹⁾.

Eine Strukturabbildung dünner nichtleitender Objekte ist grundsätzlich dann möglich, wenn die Schichtdicke von der Größenordnung des abtastenden Strahldurchmessers ist und die Oberfläche dauernd durch Elektronen aufgeladen oder entladen wird.

Trifft der Elektronenstrahl auf eine solche Isolatoroberfläche, so stellt sich je nach der Elektronengeschwindigkeit ein bestimmtes Aufladepotential ein (Fig. 8). In dem Geschwindigkeitsbereich, wo der Sekundäremissionsfaktor für die Abtastelektronen größer als 1 ist, nimmt die Oberfläche ein Gleichgewichtspotential an, das dem Abszissenwert des Schnittpunktes ($i_p = 0$) der Sekundäremissionskennlinie nach Fig. 3 entspricht, das also nahezu gleich dem Potential der Sekundäremissions-

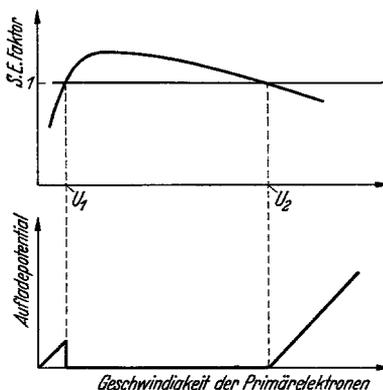


Fig. 8. Aufladepotential eines elektronenbestrahlten Körpers abhängig von der Geschwindigkeit der Primärelektronen (schematisch). Für einen Sekundäremissionsfaktor > 1 ist das Aufladepotential ungefähr gleich dem Potential der Sekundäremissionsanode.

anode E ist. Bei diesem Potential ist die Summe der in der Zeiteinheit auftreffenden Primärelektronen gleich der Summe der die Oberfläche verlassenden Sekundärelektronen. Ist jedoch der Sekundäremissionsfaktor kleiner als 1, treffen also mehr Primärelektronen in der Zeiteinheit auf die

¹⁾ M. Knoll, ZS. f. techn. Phys. **17**, 404, 1936; M. Knoll u. R. Theile, TFT **27**, 538, Sonderheft 1938; M. Knoll, ZS. f. techn. Phys. **19**, 307, 1938.

Oberfläche als Sekundärelektronen ausgelöst werden, so lädt sich die Fläche negativ auf, im Grenzfall bis zum Kathodenpotential der Primärelektronenquelle (in dem Gebiet von $U_a = 0$ bis zur Spannung $U_a = U_1$) bzw. bis zu dem um den Spannungswert U_2 verminderten Kathodenpotential (im Gebiet $U_a > U_2$).

Eine nichtleitende dünne Objektschicht kann man sich als ein Feld von Elementarkondensatoren vorstellen, deren Kapazitäten entsprechend der örtlichen Verteilung der Dielektrizitätskonstante oder der Objektschichtdicke verschieden sind. Tastet man das Kondensatorfeld mit einem Elektronenstrahl ab, für dessen Geschwindigkeit der Sekundäremissionsfaktor größer

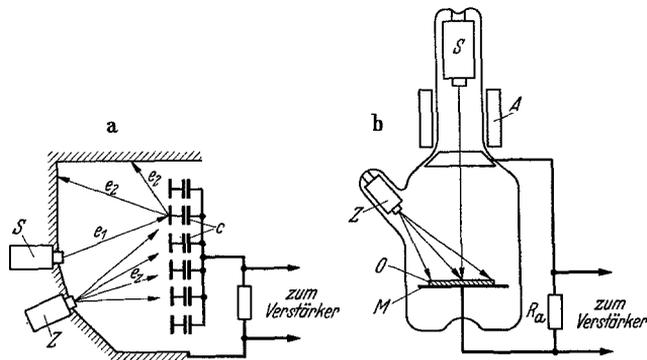


Fig. 9. Abtaströhre zur Strukturabbildung eines isolierenden Objektes. a) Schema, b) Ausführung. *S* Abtastelektronenstrahler, *A* Ablenkspule, *Z* Zusatzelektronenstrahler, *O* Objektschicht, *M* Signalplatte, e_1 Primärelektronen, e_2 Sekundärelektronen, e_z Zusatzelektronen, *c* Bildelementkapazitäten.

als 1 ist, so werden alle Kondensatoren auf das Gleichgewichtspotential U_{po} der Sekundäremission aufgeladen (Fig. 3). Wenn voraussetzungsgemäß die Objektschicht isolieren soll, bleibt U_{po} in der Zeit zwischen zwei Abtastungen konstant, so daß bei der Abtastung auch bei verschiedenen Elementarkapazitäten keine Umladungsvorgänge und damit keine Signalstromstöße am Widerstand R_a auftreten. Eine Signalerzeugung kann jedoch dann einsetzen, wenn die Elementarkondensatoren nach jeder Abtastung wieder aufgeladen werden. Zur Aufladung kann ein diffuses Elektronenstrahlbündel dienen (Fig. 9), dessen Elektronen eine Geschwindigkeit haben, die einem Sekundäremissionsfaktor kleiner als 1 entspricht. Bei hinreichender Stromstärke dieser „Zusatzelektronen“ laden sich dann alle Kondensatorelemente bis zu einer Grenzspannung U auf, so daß sie entsprechend ihrer verschiedenen Kapazität c verschiedene Ladung $Q = c \cdot U$ besitzen. Bei der Abtastung mit dem Elektronenstrahl wird dann jedes

Element bis auf das Gleichgewichtspotential U_{po} entladen. Der Entladestromstoß liefert am Widerstand R_a das Bildsignal, dessen Modulation die Kapazitätsverteilung des Objektes darstellt.

Auch ohne Zusatzbestrahlung erhält man bereits ein (meist schwächeres) Ladungsstrukturbild, wenn die bei der Abtastung stets vorhandenen Streuelektronen die Isolatoroberfläche negativ aufladen und so zu einem gewissen Grade die Zusatzelektronenquelle ersetzen¹⁾.

Wenn die bislang als reiner Isolator angenommene Objektschicht eine geringe Leitfähigkeit besitzt, so ändert sich der Mechanismus der Bildsignalerzeugung dadurch, daß der Bildpunkt*widerstand* je nach seiner Größe innerhalb der Zeit zwischen zwei Abtastungen eine Entladung des betreffenden Kapazitätselements bewirkt und damit die Potentialverteilung auf der Oberfläche ändert. Dem Kapazitätsbild der Objektschicht überlagert sich dann also ein Widerstandsbild²⁾. Außerdem wird ein solches Strukturbild auch die Verteilung der *Sekundäremissionsfähigkeit* der Oberfläche zeigen, da für den Abtastvorgang (Entladung der Teilkapazitäten) der innere Widerstand der Sekundäremissionsentladungsstrecke eine wesentliche Rolle spielt, der seinerseits von dem Sekundäremissionsfaktor bzw. von der Gestalt der Sekundäremissionskennlinie abhängt.

III. Auflösungsvermögen und Anwendungen der Elektronenabtaster.

Beim Elektronenabtaster sind zwei Arten von Auflösungen zu unterscheiden: Das Auflösungsvermögen für kleinste *Strukturabstände* („geometrisches Auflösungsvermögen“) und dasjenige für kleinste *Strukturunterschiede* („Kontrastauflösungsvermögen“).

1. Geometrisches Auflösungsvermögen.

Bei der folgenden Betrachtung soll nicht von dem grundsätzlich erreichbaren geometrischen Auflösungsvermögen, sondern von demjenigen

¹⁾ Über zwei weitere mögliche Betriebszustände bei der Elektronenabtastung dünner Isolierschichten bei einem Sekundäremissionsfaktor der Abtastelektronen kleiner als 1 bzw. bei nicht vollständiger Aufladung der Elementarkondensatoren vgl. M. Knoll, ZS. f. techn. Phys. **19**, 307, 1938 bzw. M. Knoll u. R. Theile, l. c. S. 540. — ²⁾ Dieser Mechanismus der Widerstandssteuerung des Bildsignalstromes ist von dem in Abschnitt 2 behandelten verschieden, da die Bildpunkt*widerstände* größenordnungsmäßig höher als dort angenommen sind. An Stelle der *direkten* Bildsignalstromsteuerung tritt eine *indirekte* Steuerung der Ladungsverteilung (Widerstandssteuerung mit Ladungsspeicherung, vgl. dazu H. Miller u. J. W. Strange, Proc. Phys. Soc. **50**, 374, 1938).

ausgegangen werden, das mit Hilfe der in der Fernsehtechnik zur Verfügung stehenden Kathodenstrahlbildfelderleger und Verstärker die *tausende* Sichtbarmachung eines Strukturbildes ermöglicht¹⁾. Verwendet man z. B. einen Breitbandverstärker mit der oberen Grenzfrequenz von 6 MHz, so ergibt sich bei der mit Rücksicht auf die Flimmergrenze eben noch erträglichen Bildfrequenz von 12,5 Hz²⁾ eine höchstzulässige Zeilenzahl von etwa 1000; das bedeutet bei einer Objektfläche 1 cm · 1 cm ein Auflösungsvermögen von 10⁻² mm, das der Ausdehnung eines „Bildpunktes“ in der Abtaströhre entspricht.

Die Eingangsspannung des Verstärkers soll wegen der mit der Wurzel aus der Frequenzbandbreite anwachsenden Rauschspannung³⁾ die Größe von einigen Millivolt nicht unterschreiten.

Bei Widerstandsschichten und Nichtleitern kann das geometrische Auflösungsvermögen durch die Streuung der elektrischen Feldlinien zwischen dem Auftreffort des Elektronenstrahles auf der Objektfläche und der Signalplatte herabgesetzt werden. Es tritt dann eine Verbreiterung des wirksamen Bildpunktquerschnitts auf, so daß das Strukturbild an den Übergangsstellen verschiedener Struktureigenschaften einen Mangel an Schärfe zeigt. Um den Einfluß dieser Unschärfe genügend klein (entsprechend der jeweils benutzten Zeilenzahl) zu halten, muß das für den Feldlinienverlauf maßgebende Verhältnis von Elektronenstrahldurchmesser zu Schichtdicke und das Verhältnis Strukturelement- zu Elektronenstrahldurchmesser⁴⁾ groß gewählt werden (mindestens etwa 3:1). Hieraus folgt zugleich die notwendige Einhaltung eines Mindestabstandes der einzelnen Zeilenmitten voneinander (etwa von der doppelten Zeilenbreite).

¹⁾ Bei photographischer Registrierung kann die Bildfrequenz und damit das Frequenzband des Bildsignals sehr viel kleiner gewählt und dadurch (bei genügend feinem Abtaststrahl) das geometrische Auflösungsvermögen noch erheblich gesteigert werden. — ²⁾ Das bei der Bildfolge von 12,5 auftretende Bildflimmern wird im Interesse großer Schärfe in Kauf genommen; gegebenenfalls ist auch mit Hilfe des Zeilensprungverfahrens bei gleicher Frequenzbandbreite die Herstellung einer Bildfrequenz von 25 Hz möglich. — ³⁾ Vgl. H. Rothe u. E. Plato, Telefunkenröhre Heft 7, S. 94, 1936. — ⁴⁾ Die Fläche f_{el} eines Strukturelementes hängt dabei von der jeweils angewendeten Bildpunkt- bzw. Zeilenzahl ab, und zwar ist:

$$f_{el} = \frac{F \cdot b}{z^2 \cdot a},$$

wenn F die abgetastete Objektfläche und a/b das Seitenverhältnis der abgetasteten Objektfläche bedeutet.

2. Kontrastauflösungsvermögen.

Unter Kontrastauflösungsvermögen verstehen wir das Vermögen eines optischen Gerätes, kleine Intensitätsunterschiede in der Struktur sichtbar zu machen. Beim *Lichtmikroskop* ist diese Art von Auflösungsvermögen in Abhängigkeit von der Empfindlichkeit des menschlichen Auges durch die verschiedene Lichtabsorption oder -reflexion der zu vergleichenden Strukturelemente gegeben. Das Kontrastauflösungsvermögen kann dort insbesondere durch Aufnahme mit einer photographischen Schicht geeigneter Schwärzungskennlinie wesentlich erhöht werden¹⁾. Es wird dabei durch Unterdrückung des „Gleichlichtanteils“ der beleuchteten Struktur eine Kontrastverstärkung erreicht. Ähnlich wäre auch beim *Elektronenmikroskop* eine Kontrastverbesserung durch Wahl eines Leuchtschirmes mit geeigneter, nichtlinearer Helligkeits-Stromkennlinie möglich.

Beim Elektronenabtaster ergibt sich eine entsprechend hohe Kontrastverstärkung durch Unterdrückung des „Gleichspannungsanteils“²⁾ des Bildsignals auf rein elektrischem Wege bei Benutzung eines normalen RC-Verstärkers zur Verstärkung der Bildsignale, da bei einem solchen „Wechselspannungsverstärker“ nur *Unterschiede* der elektrischen Eigenschaften des Objektes übertragen werden.

Die Grenze des Kontrastauflösungsvermögens ist dadurch gegeben, daß die zu den einzelnen Strukturunterschieden gehörigen Signalspannungsamplituden wesentlich über der Amplitude der Rauschspannung liegen müssen. Handelt es sich weniger um Erzielung eines guten linearen Auflösungsvermögens als um gute Kontrastwiedergabe weniger, großer Strukturelemente, so ist eine Herabsetzung der Bildpunktzahl zweckmäßig, weil dann infolge des kleineren Frequenzbandes das Verhältnis von Nutz- zu Störspannung wesentlich größer wird³⁾.

Die Herabsetzung der Bildpunkt- bzw. Zeilenzahl braucht *dann* keinen Verzicht auf geometrisches Auflösungsvermögen zu bedeuten, wenn von dem gesamten Objektfeld stets nur ein *Teilausschnitt* sichtbar gemacht wird. Ist z. B. die Objektgröße 1 cm² und die gewünschte Auflösung 10⁻² mm, so kann entweder das ganze Objekt mit 1000 Zeilen oder 1 mm² davon

¹⁾ Natürlich bewirken auch Anfärbeverfahren und Ätzmethoden eine „Kontrastverstärkung“ jedoch nur mittelbar, insofern sie ungeeignete Objekte in geeignete verwandeln. — ²⁾ Bei der Abtastung einer *nichtleitenden* Oberfläche ist die Unterdrückung des Gleichstromanteils bereits im Signalstromkreis von selbst gegeben. — ³⁾ Z. B. ist bei 100 Zeilen und 12,5 Bildwechseln das Frequenzband 0,06 MHz, was einer zehnmal kleineren Rauschspannung als bei 1000 Zeilen und derselben Bildwechselzahl entspricht.

mit 100 Zeilen übertragen werden. Im letzteren Falle genügt wegen der hundertmal kleineren Abtastgeschwindigkeit ein Verstärker mit etwa 100mal kleinerer Bandbreite, der etwa 10mal kleinere Strukturunterschiede kontrastmäßig aufzulösen erlaubt.

3. Anwendung.

Ein Beispiel für die Ausführung der Abtaströhre gibt Fig. 10. Ihre elektronenoptischen Teile (Strahlerzeuersystem und Ablenkorgane) entsprechen den in der Fernsichttechnik üblichen Anordnungen¹⁾; die bis jetzt verwendeten Spannungen betragen 500 bis 10000 Volt. Die Anodenspannung für den Zusatzstrahl, der nur bei der Abtastung nichtleitender Objekte erforderlich ist, richtet sich nach der gewünschten Betriebsart, der je nach dem zugehörigen Sekundäremissionsfaktor auf einer periodischen Auf- oder Entladung der Isolatoroberfläche beruht (vgl. Abschnitt II, 3). Die Primärströme liegen in der Größenordnung 10^{-7} bis 10^{-5} Amp.

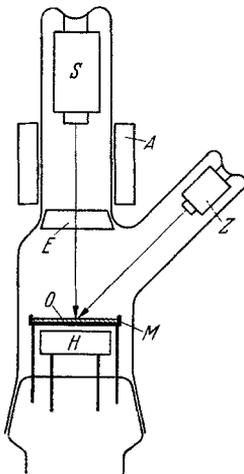


Fig. 10. Ausführung einer Elektronenstrahlabtasterröhre zur Untersuchung der Oberfläche von zusammenhängenden oder pulverförmigen Materialproben bei verschiedener Temperatur. *H* Heiz- oder Kühlvorrichtung, übrige Bezeichnungen wie Fig. 1.

Die Signalplatte wird zwecks leichter Auswechselbarkeit am besten auf einem Schliiff angebracht; bei Untersuchung von Schmelzen (Heizkörper *H*) und Pulvern ist die Röhrenachse vertikal anzuordnen.

Fig. 11 zeigt ein mit dem Elektronenabtaster erhaltenes Strukturbild eines silizierten Eisenbleches²⁾, das von der verschiedenen *Sekundäremission* verschiedener Kristallarten und deren verschiedener Orientierung herrührt. In analoger Weise läßt sich die Änderung des Kristallgefüges bei hohen Temperaturen sowie der Austritt von Fremdmetallen (z. B. von Thorium oder Barium) aus Korngrenzen sichtbar machen.

Nach dem in Abschnitt II Gesagten kann man ein *Widerstands*strukturbild im allgemeinen nicht ohne Überlagerung des Sekundäremissionsbildes erhalten. Die Trennung beider Bilder gelingt jedoch mit Hilfe einer lichtempfindlichen Widerstandsschicht, deren Widerstandsverteilung durch Aufprojektion eines charakteristischen Lichtbildes verändert wird. In

¹⁾ Vgl. F. Schröter, Fernsehen, Berlin 1937, S. 113 ff. — ²⁾ Weitere Abbildungen dieser Art vgl. M. Knoll, ZS. f. techn. Phys. 11, 467, 1935.

Fig. 12 erkennt man deutlich das auf diese Weise erhaltene reine Widerstandsbild¹⁾. Man bemerkt ferner eine einseitige Abschattierung des Bildhintergrundes; diese ist auf die Änderung der Sekundäremission infolge des ver-

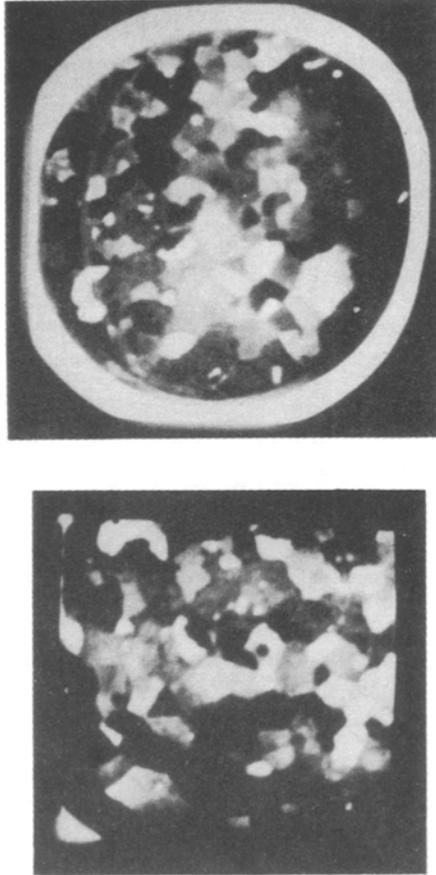


Fig. 11. Kristallstruktur von siliziertem Eisenblech. $U_a = 2000$ Volt, $U_p = -30$ Volt, $i_1 = 5 \mu\text{A}$. Das Sekundäremissionsbild entsteht infolge verschiedener Art und Orientierung der einzelnen Kristalle.

schiedenen Einfallswinkels der Primärelektronen zurückzuführen, da die Objektplatte um einen Winkel von 30° geneigt zur Röhrenachse angebracht

¹⁾ Nach Untersuchungen des einen von uns (R. Theile, *Telefunkenröhre* Heft 13, 1938) steht fest, daß es sich dabei nicht etwa um eine durch die Belichtung hervorgerufene Erhöhung der *Sekundäremission* der verwendeten Kupferoxydschicht handelt.

war. Den entsprechenden Verlauf der Bildsignalspannung zeigt Fig. 13. Das Strukturbild einer unbelichteten Kupferoxyduloberfläche (spez. Widerstand $\sim 10^6 \text{ Ohm} \cdot \text{cm}$) ist in Fig. 14 wiedergegeben.

Ein Beispiel für die Strukturabbildung von *Isolatoren* wurde schon früher durch Abbildung einer Al_2O_3 -Schicht gegeben, wobei gezeigt werden

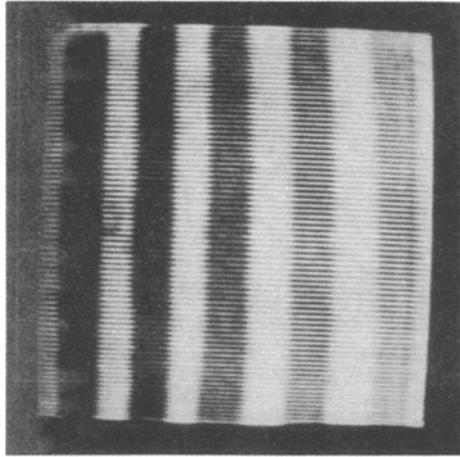


Fig. 12. Bilderzeugung durch örtlich verschiedene Widerstände einer dünnen Objektschicht. Einführung einer künstlichen Widerstandsstruktur durch lichteptische Abbildung eines Streifenrasters auf einer lichtempfindlichen Cu_2O -Schicht (ungefähr 0,1 mm stark).

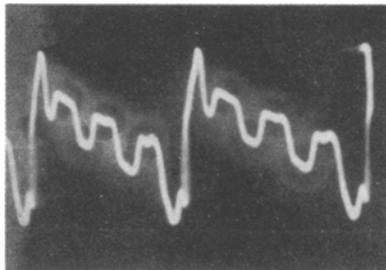


Fig. 13. Verlauf der Bildsignalspannung bei Abtastung einer zur Strahlachse schief stehenden, mit drei Lichtstreifen belichteten dünnen Cu_2O -Schicht. Infolge der Änderung des Einfallwinkels der Elektronen (Winkelabhängigkeit der Sekundäremission) zeigt der Grundanteil des Bildsignals keinen horizontalen, sondern einen abfallenden Verlauf.

konnte, daß der verschiedenen Eindringtiefe der Primärelektronen verschiedene Strukturbilder entsprechen ¹⁾ (Fig. 15). Fig. 16 zeigt als weiteres

¹⁾ M. Knoll, ZS. f. techn. Phys. **17**, 615, Abb. 27, 1936.

Beispiel zur Strukturabbildung von Isolatoren das Bild einer dünnen, bei der visuellen Durchsicht schlieren- und kornfreien Glasschicht. Inwieweit

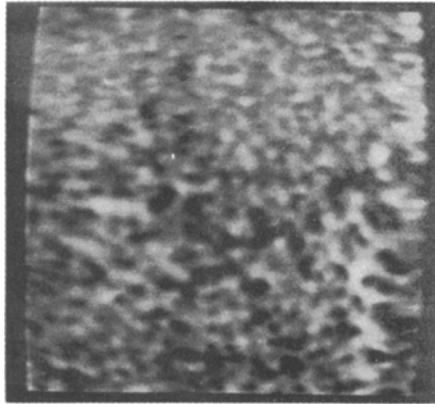
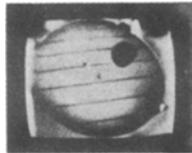
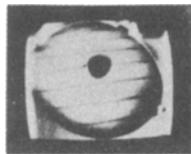


Fig. 14. Strukturbild einer dünnen ($\sim 0,1$ mm) Cu_2O -Schicht auf massiver Kupferunterlage (Überlagerung eines Widerstands-Sekundäremissionsbildes). $U_a = 1500$ Volt, $U_p = -100$ Volt, $i_1 = 2 \mu\text{A}$.



Abtast-Elektronenstrahl: 1500 Volt

3500 Volt



2300 Volt

5000 Volt

Fig. 15. Strukturbilder einer Isolator-Oberfläche (Al_2O_3 auf Al) bei zunehmender Geschwindigkeit der Abtastelektronen. Schwarzer Fleck: Unabgelenkte Zusatzelektronen von der Geschwindigkeit 1500 V bei 10^{-7} A Stromstärke.

die beobachtete Struktur in beiden Fällen Kapazitätsunterschieden oder (z B. durch Ausscheiden von Metall hervorgerufenen) Sekundäremissionsänderungen der Probeschicht zuzuschreiben ist, konnte noch nicht

entschieden werden. Daß gerade Metallausscheidungen an Isolatoren im Elektronenabtaster kontrastreich wiedergegeben werden, zeigte ein weiterer zur Klärung der Diffusion des metallischen Bariums und Bariumoxyds

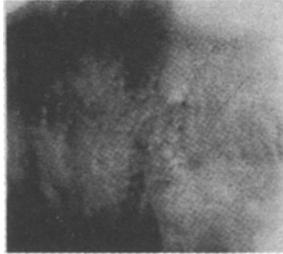


Fig. 16. Strukturbild einer Glasoberfläche (Überlagerung eines Kapazitäts- und Sekundäremissionsbildes) $U_a = 4000$ Volt, $i_1 = 4 \mu\text{A}$. Die Aufnahme wurde mit einer Braunschen Röhre ohne Leuchtschirm gemacht; als Gegenelektrode diente ein auf die Außenseite des Kolbenbodens aufgeklebtes Kreuz aus Metallfolie.

bei der Oxydglühkathode vorgenommener Versuch, bei dem der Austritt von metallischem Barium nach kurzer Glühbehandlung der Oxydschicht deutlich im Bild sichtbar gemacht werden konnte.
