

(Mitteilung aus dem Hochspannungslaboratorium der Technischen Hochschule Berlin.)

Das Elektronenmikroskop.

Von M. Knoll und E. Ruska in Berlin.

Mit 11 Abbildungen. (Eingegangen am 16. Juni 1932.)

Die wichtigsten elektronenoptischen Abbildungssysteme und ihre Eignung für die vergrößerte Abbildung elektronenemittierender Objekte werden diskutiert. Die allgemeinen Bedingungen für fehlerfreie Bilder, Definition und Grenze des Auflösungsvermögens werden angegeben. Ein magnetisches Elektronenmikroskop mit kalter Kathode für schnelle Elektronen und die Ausführung magnetischer Linsen werden beschrieben und mehrere Mikrophotogramme wiedergegeben. Die Untersuchungsmethoden des Elektronenmikroskops und geeignete Abbildungssysteme für ein Ionenmikroskop werden besprochen.

I. Theoretischer Teil.

Als Elektronenmikroskop¹⁾ bezeichnen wir eine elektronenoptische Anordnung, die zur Untersuchung emittierender oder bestrahlter Objekte durch vergrößerte Abbildung dieser Objekte dient, wobei mindestens die erste Stufe der Abbildung durch Elektronenstrahlen erfolgt. Die theoretischen und experimentellen Grundlagen der geometrischen Elektronenoptik sind durch die vom Kathodenstrahloszillographen ausgegangenen Arbeiten von Busch²⁾, der Verfasser³⁾⁴⁾, sowie von Brüche⁵⁾ als weitgehend geklärt anzusehen; wir gehen daher auf diese wie auf die dort beschriebenen Abbildungssysteme im folgenden nur kurz ein.

Die verschiedenen Abbildungssysteme und ihre Eigenschaften.

Wir unterscheiden vier wesentlich verschiedene elektronenoptische Abbildungsmethoden, die in Tabelle 1 mit den zugehörigen Abbildungssystemen zusammengestellt sind. Elektronenoptische Abbildung ist demnach möglich *erstens* nach der Lochkammermethode, *zweitens* durch magne-

¹⁾ Vorläufige Mitteilung darüber anlässlich eines Vortrags von M. Knoll im Koll. d. Inst. f. Techn. Phys. der Techn. Hochschule Berlin am 4. Juni 1931; dort wurden auch die ersten Mikrophotogramme gezeigt. Vgl. M. Knoll u. E. Ruska, Ann. d. Phys. 12, 647, 1932; ferner E. Brüche, vorl. Mitt., Die Naturwissensch. 20, 49, 1932.

²⁾ H. Busch, Ann. d. Phys. 81, 974, 1926; Arch. f. Elektrot. 18, 533, 1927.

³⁾ E. Ruska u. M. Knoll, ZS. f. techn. Phys. 12, 339, 448, 1931.

⁴⁾ M. Knoll u. E. Ruska, Ann. d. Phys. 12, 607, 1932.

⁵⁾ E. Brüche, Die Naturwissensch. 20, 49, 353, 1932.

Tabelle 1. Übersicht der abbildenden elektronenoptischen Systeme.

Art der Abbildung		Form des abbildenden Systems	Lage des Bildes zum Gegenstand	Abbildungsmaßstab
Durch Lochkameramethode (feldfrei)		Lochblende	umgekehrt	beliebig
Durch magnetische Felder		lange Spule	aufrecht	1 : 1
		kurze Spule	gedreht	beliebig
Durch elektrische Felder	elektrostatische Felder	Kugelflächenelektroden	umgekehrt	beliebig
		Lochelektroden		
		Kombination beider		
	Raumladungsfelder	lange Raumladungssäule (Eigenionisation)	aufrecht	1 : 1
		kurze Raumladungssäule (Eigenionisation)	umgekehrt	beliebig
		kurze Raumladungssäule (Fremdionisation)		

tische Felder, *drittens* durch elektrostatische Felder zwischen Elektroden, und *viertens* durch elektrische Raumladungsfelder.

Für ein im Verhältnis zur Strahlänge kurzes Abbildungssystem gelten wie in der Lichtoptik zwischen Gegenstandsweite a , Bildweite b , Brennweite f und Abbildungsmaßstab M die Beziehungen

$$M = \frac{b}{a} \quad (1)$$

und (außer bei der Lochblende)

$$f = \frac{a \cdot b}{a + b} \quad (2)$$

Kommt ein zweites Abbildungssystem mit der Gegenstandsweite a' und der Bildweite b' hinzu, so wird bei Vorhandensein eines reellen Zwischenbildes (Projektionsmikroskop)

$$M = \frac{b}{a} \cdot \frac{b'}{a'} \quad (3)$$

Wir betrachten nun getrennt die Eigenschaften der einzelnen Abbildungssysteme.

1. *Abbildung durch Lochblende*¹⁾. Das Blendenloch muß klein gegenüber dem Objekt sein (Lochkameramethode). Sie zeichnet sich durch ihre Übersichtlichkeit und Einfachheit aus (Fig. 1a), gestattet aber nur mäßige

¹⁾ Vgl. Anm. 4, S. 614.

Vergrößerungen und liefert bei genügender Bildschärfe nur lichtschwache Bilder.

2. *Abbildung durch lange Spule*¹⁾. Sie erfolgt durch das homogene Feld einer Magnetspule von der Länge des abbildenden Strahles (Fig. 1 b) und

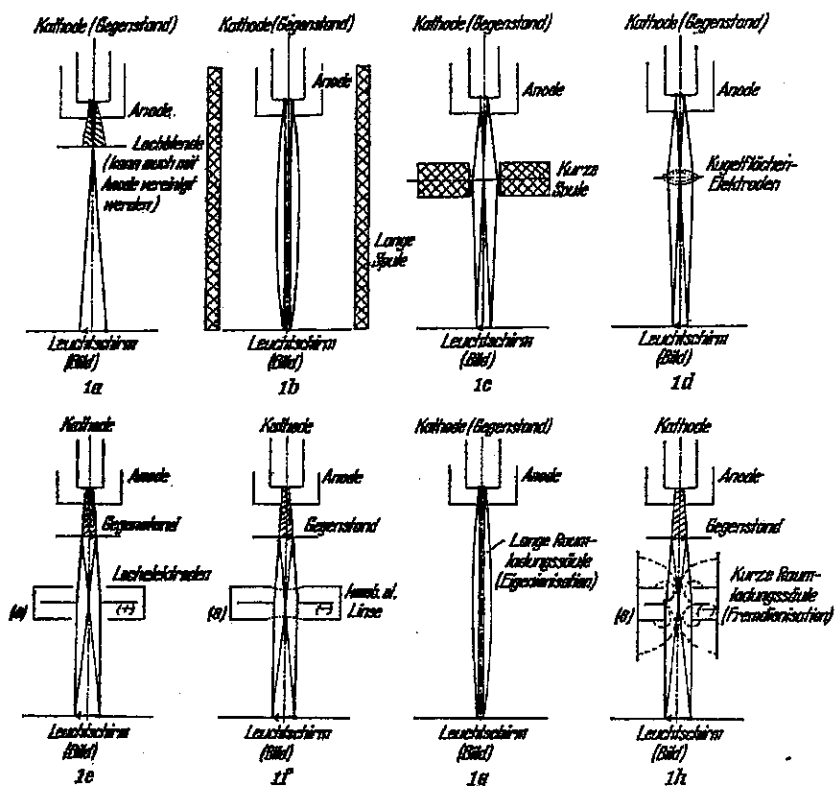


Fig. 1. Elektronenoptische Abbildungssysteme.

- a) Abbildung durch Lochblende,
- b) " " lange Spule,
- c) " " kurze Spule,
- d) " " Kugelflächenelektroden,
- e) " " Lochelektroden,
- f) " " Kombination von Kugelflächen- und Lochelektroden,
- g) " " lange Raumladungssäule (Selbsterionisation),
- h) " " kurze Raumladungssäule (Fremdionisation).

ergibt ein oder mehrere Bilder in natürlicher Größe nach gleichen Teillängen des Strahles.

¹⁾ E. Wiechert, Ann. d. Phys. 69, 739, 1899; E. Riecke, ebenda 13, 191, 1881.

3. *Abbildung durch kurze Spule*¹⁾. Sie erfolgt durch das inhomogene Feld einer im Vergleich zur Strahlänge kurzen Magnetspule (Fig. 1c). Die Brennweite f einer solchen Spule ist dem Integral des Quadrats der magnetischen Feldstärke über die Symmetrieachse der Spule umgekehrt proportional. Für die Durchflutung J einer Spule, die als linearer Kreisleiter mit dem Durchmesser d aufgefaßt wird, ergibt sich bei einer Beschleunigungsspannung U_b der Strahlelektronen

$$J = \frac{1}{\sqrt{3}\pi^2} \frac{2c}{e/m_0} \sqrt{\frac{2e/m_0}{c^2} U_b + \left(\frac{e/m_0}{c^2} U_b\right)^2} \sqrt{\frac{d}{f}} \quad (4a)$$

$$= 9514 \sqrt{0,898 \frac{U_b}{100} + \left(0,197 \frac{U_b}{100}\right)^2} \sqrt{\frac{d}{f}} \quad (J \text{ in AW; } U_b \text{ in kV; } d, f \text{ in cm}). \quad (4b)$$

Die Qualität und Lichtstärke der mit der kurzen Spule erzeugten Bilder ist mindestens bis zu 400facher Vergrößerung mit derjenigen von durch gute Glaslinsen erzeugten Bildern vergleichbar. Die den sphärischen Fehlern von Glaslinsen entsprechenden Spulenfehler liegen bei den bisher erzielten Vergrößerungen unterhalb der Beobachtungsgrenze; die Geschwindigkeit der Elektronen ist bei genügend hoher und konstanter Beschleunigungsspannung so homogen, daß auch die chromatischen Spulenfehler bei mäßigen Vergrößerungen die Bildqualität nicht herabsetzen²⁾.

4. *Abbildung durch Kugelflächenelektroden*³⁾. Sie erfolgt durch im Vergleich zur Strahlänge kurze homogene elektrische Felder zwischen

¹⁾ Vgl. Ann. 2, 3 und 4 (S. 318); ferner E. Hammacher, Arch. f. Elektrot. 26, 215, 1932.

²⁾ Diese Beziehung wurde von uns in einer früheren Arbeit (vgl. Ann. 3, S. 318, a. a. O., S. 333) abgeleitet. Dabei war die Massenveränderlichkeit der Elektronen in der üblichen Weise nach Lenard (Handb. d. Experimentalphysik 14, 403, 1927) berücksichtigt. Später kommen Ollendorff und Wendt in einer Arbeit: Relativistische Korrektur der Abbildungsgesetze einer magnetischen Sammellinse für Kathodenstrahlen (ZS. f. Phys. 76, 655, 1932) zur identisch gleichen Beziehung. In einer Fußnote bezeichnen sie unsere Formel als *grundsätzlich gleich* mit der ihren, jedoch sei deren Herleitung *nicht korrekt*. Demgegenüber möchten wir feststellen, daß die angegebene Einführung der Massenkorrektur mindestens bei kleinerer Apertur, für die auch die Busch'schen Ausgangsgleichungen nur Geltung haben, ebenso korrekt ist, wie diese Ausgangsgleichungen.

³⁾ Der chromatische Fehler der Spule kann umgekehrt auch zur Bestimmung der Intensitätsverteilung über die Geschwindigkeiten eines inhomogenen Elektronenstrahlbündels benutzt werden.

⁴⁾ Nach E. Ruska, vgl. Ann. d. Phys. 12, 650, 1932. Diese Methode benutzt zur Erzielung definierter optisch wirkender elektrischer Felder erstmale Elektroden, die über den Strahlquerschnitt (in Form metallischer Netze) fortgesetzt sind.

elektronendurchlässigen Elektroden, die in Form konzentrischer Kugelflächen die entsprechenden Glaslinsen der Lichtoptik ersetzen (Fig. 1d). Bezeichnet man den Krümmungsradius einer derartigen Kugelfläche mit r , die Linsenspannung mit U_0 und die Eintrittsspannung der Elektronen in die Linse mit U_b , so gilt für $f \gg r$:

$$f \approx r \frac{U_b}{U_0} \text{ (Bikonvex- bzw. Bikonkavlinse)} \quad (5)$$

und

$$f \approx 2r \frac{U_b}{U_0} \text{ (Plankonvex- bzw. Plankonkavlinse)}. \quad (6)$$

Mit sehr feinmaschigen Netzelektroden lassen sich durch derartige elektrische Linsen brauchbare Bilder erzeugen. Die durch Verzerrung des sonst homogenen Feldes in der unmittelbaren Umgebung der Netzdrähte und durch die endliche Dicke der Doppelfächenschicht entstehenden Abbildungsfehler sowie die teilweise Absorption der auftreffenden Strahlung durch die Netzflächen sind die Ursache, daß Qualität und Intensität der Bilder bei dieser Methode beträchtlich geringer sind als bei der Abbildung durch kurze Spulen¹⁾.

5. *Abbildung durch Lochschiebelenktroden*²⁾. Sie erfolgt durch das im Verhältnis zur Strahlänge kurze, inhomogene elektrostatische Feld in der Umgebung einer oder zwischen mehreren Lochscheibenelektroden (Fig. 1e) und beruht auf der kugelförmigen Form, welche die Äquipotentialflächen auf der der Gegenelektrode abgewandten Seite einer Blendenöffnung annehmen³⁾ (Fig. 2). Ihre Brennweite läßt sich ebenfalls nach Gleichung (6) angeben, wenn aus der genauen Rechnung des Feldverlaufs ein mittlerer Krümmungsradius r der Äquipotentialflächen definiert wird.

Da bei dieser Form der elektrischen Linse zur Ausbildung kugelförmiger Äquipotentialflächen keine Netze benötigt werden, sind die hierdurch verursachten Bildfehler und die Absorption nicht vorhanden, so

¹⁾ Konstruktive Verbesserungen an der Linsenordnung und Verwendung sehr feiner Netze haben inzwischen zu einer beträchtlichen Steigerung der Bildqualität geführt.

²⁾ Diese Methode ist gleichzeitig und unabhängig von E. Brüche (mündliche Mitteilung), C. J. Davissou u. C. J. Calbick, Phys. Rev. 33, 565, 1931 (kurser Sitzungsbericht) und, insbesondere in der nach außen feldfreien Dreielektrodenform nach Fig. 1e und 2, von M. Knoll (Ann. d. Phys. 12, 625, 1932 und ATM, Arch. f. Techn. Messen, J 334—5, 1932) angegeben worden.

³⁾ Über die Berechnungsmethoden derartiger Felder vgl. F. Ollendorff, Potentialfelder der Elektrotechnik, Berlin, Julius Springer, 1932, S. 297. Die exakte Durchrechnung des Feldverlaufs Fig. 2 verdanken wir Herrn Dipl.-Ing. Wendt.

daß damit gute Abbildungen erzielt werden können¹⁾. Allerdings sind auch diese der optischen Qualität nach geringer als die durch eine kurze Sammelspule entworfenen. Der Grund dafür liegt in den Fehlern, die durch die

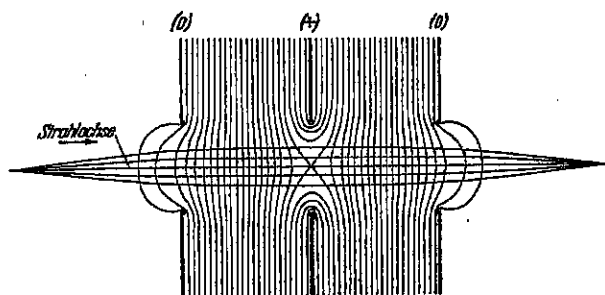


Fig. 2. Feldverteilung und angenäherter Verlauf der von einem Punkt ausgehenden Einzelstrahlen an einer elektrischen Linse nach dem Lochelektrodenprinzip (bei kleiner Brennweite). Mittelelektrode positiv gegenüber den Außenelektroden.

endliche Schichtdicke derartiger Linsen und durch die Abweichung von der aus optischen Gründen zu fordernden Feldform entstehen²⁾.

6. *Abbildung durch Kombination aus Kugelflächen- und Lochelektroden.* Derartige kombinierte elektrische Linsen sind grundsätzlich deshalb möglich, weil auch die Wirkung von Lochelektroden auf der kugelförmigen Ausbildung der Äquipotentialflächen beruht. Eine solche Kombination besteht z. B. aus einer bikonkaven Netzelektrode mit innenliegender Lochelektrode (Fig. 1f). Diese Art elektrischer Linsen hat gegenüber solchen nach Fig. 1d den Vorteil geringerer Absorption, gegenüber solchen nach Fig. 1e den Vorteil strenger kugelförmiger Äquipotentialflächen bei gleichzeitiger axialer Beschränkung des abbildenden elektrischen Feldes.

7. *Abbildung mittels einer durch Ionisation des Strahles selbst gebildeten „langen“ Raumladungssäule.* Sie erfolgt durch das zum abbildenden Strahl radiale elektrische Feld, das längs des ganzen Strahles durch die aus positiven Ionen und Elektronen gebildete axialsymmetrische Raumladung erzeugt wird (Fig. 1g). Im Brennfleck eines raumladungskonzentrierten Kathoden-

¹⁾ E. Brüche, Die Naturwissensch. 20, 49 und 353, 1932.

²⁾ Inwieweit diese Fehler (etwa durch entsprechende Ausbildung der Kantenform der Blendenöffnung oder durch Gegeneinanderschalten zweier oder mehrerer Blendenöffnungen) verkleinert werden können, müssen weitere Untersuchungen ergeben.

strahl¹⁾ erkennt man bei genauer Beobachtung auf dem Leuchtschirm das Strukturbild der Kathode. Daraus ist zu schließen, daß das aus positiver und negativer Raumladung gebildete elektrische Feld eine Ablenkung jedes einfallenden Strahles proportional seinem Einfallswinkel hervorruft, daß dieses also die Eigenschaften einer im Maßstab 1:1 abbildenden Linse besitzt²⁾).

8. *Abbildung mittels der durch Fremdionisation gebildeten „kurzen“ Raumladungssäule⁴⁾*. Sie erfolgt durch das radiale Raumladungsfeld, das durch Ionisation mittels der langsameren Elektronen einer Hilfsentladung auf einer kurzen Strecke des abbildenden Hauptstrahles erzeugt wird (Fig. 1h) und ist ein Analogiefall zur Abbildung durch eine kurze Spule. Wie diese liefert sie (von der Bildrotation der Spule abgesehen) seitenverkehrte Bilder in dem durch Gegenstandsweite und Bildweite gegebenen Abbildungsmaßstab.

Der hier gegebenen Zusammenstellung abbildender Systeme für Elektronen sowie dem Strahlengang der zugehörigen Bilder ist der Fall der einfachen reellen Abbildung durch ein einziges abbildendes System, also durch eine *Sammelwirkung*, zugrunde gelegt. Gemeinsam ist allen Systemen, mit Ausnahme der Lochblende (Lochkameramethode), die weite Variationsfähigkeit der Brennweite und damit die Möglichkeit, verschiedene Strahlquerschnitte (Strahlenquelle und andere Querschnitte) abzubilden. Selbstverständlich können aus diesen Elementen kompliziertere optische Anordnungen, wie beispielsweise ein Projektionsmikroskop (mit zweistufiger Vergrößerung durch zwei Sammellinsen mit Zwischenbild), zusammengesetzt werden. Scheiden wir für solche Zusammensetzungen Lochblende, lange Spule und lange Raumladungssäule aus, so bleiben die wirklichen Linsen übrig. Von diesen ergibt das kurze Magnetfeld nur eine *Sammellinse*, während die verschiedenen Formen elektrostatischer Sammelfelder sämtlich durch Umpolen in *Zerstreuungslinsen* verwandelt werden können und daher wesentlich erweiterte Möglichkeiten für die Zusammensetzung elektronenoptischer Anordnungen bieten. Außerdem ist es nur mit elektrostatischen

¹⁾ Über raumladungskonzentrierte Elektronenstrahlen („Fadenstrahlen“) vgl. A. Wehnelt, Ann. d. Phys. 14, 463, 1904; W. Westphal, ebenda 27, 586, 1906; B. Johnson, Journ. Opt. Soc. Amer. 6, 701, 1922; E. Brüche, ZS. f. Phys. 614, 186, 1930.

²⁾ Eine eingehende rechnerische Bestätigung über diese Auffassung des Feldverlaufs hat F. Ollendorff gegeben (mündliche Mitteilung).

³⁾ Selbstverständlich wird dabei der Abbildungsmaßstab wie bei der Abbildung mit langen Magnetspulen durch die Wirkung des Beschleunigungsfeldes etwas modifiziert.

⁴⁾ B. v. Borries u. E. Ruska, ZS. f. Phys. 76, 649, 1932.

Linsen möglich, Gegenstands- und Bildraum durch das abbildende System in optisch verschieden dichte Medien (verschiedene Elektronengeschwindigkeiten) zu trennen¹⁾. Das kurze elektrische Raumladungsfeld kann nur als *Sammellinse* verwendet werden, da seine Polarität von der natürlichen Verteilung der Raumladung im Elektronenstrahl abhängt, die infolge der verschiedenen Beweglichkeit der positiven Ionen und Elektronen dem Vorzeichen nach festliegt.

Eine andere (nicht optische) Einteilung der Abbildungssysteme muß nach ihrer Anwendbarkeit und Eignung innerhalb des ganzen Druckspannungsgebiets, in dem ungestört geometrisch-optischer Strahlverlauf bestehen kann, getroffen werden. Denn da entweder (wie bei der Untersuchung von kalten Kathoden) nur bestimmte Spannungsbereiche in Frage kommen, oder da man (etwa bei der Untersuchung durchstrahlter oder bestrahlter Objekte) die Abhängigkeit bestimmter Erscheinungen von der Geschwindigkeit der Strahlen untersuchen will, ist die Geschwindigkeit der abbildenden Elektronenstrahlen nicht frei wählbar. Sowohl *Lochblende* wie *Magnetspule* können innerhalb des ganzen Druck-Spannungsbereichs zur Abbildung verwendet werden, wo geradliniger Verlauf der Einzelstrahlen vorherrscht. Die Anwendbarkeit von *Raumladungen* zur elektronenoptischen Abbildung ist auf einen relativ schmalen Druck-Spannungsbereich begrenzt. Von den *elektrostatischen* Linsen können die nach außen durch feinmaschige Netze abgeschlossenen Kugelflächenelektroden wegen der geringeren Gefahr einer Gasentladung bei gleichem Druck mit höheren Spannungen betrieben und daher für höhere Strahlspannungen verwendet werden als reine *Lochelektroden*.

Allgemeine Bedingungen für fehlerfreie Abbildung.

Neben der Fehlerfreiheit der Abbildungssysteme muß noch eine Reihe allgemeiner Bedingungen erfüllt sein, wenn das Elektronenbild dem abgebildeten Objekt geometrisch ähnlich sein soll. Zunächst muß bei Kathodenabbildung das beschleunigende elektrische Feld in der Umgebung der Kathode möglichst homogen sein. Außerdem muß der Verlauf der Einzelstrahlen außerhalb der abbildenden Systeme geradlinig sein und darf nicht durch Abstoßungskräfte zwischen den einzelnen Strahlelektronen, durch

¹⁾ Dies ist z. B. wichtig für die Emissionsuntersuchung von Niederspannungskathoden oder bei der Bestrahlung beobachteter Objekte mit langsamen Elektronen, weil die das Leuchtschirmbild erzeugende Energie dadurch größer als die Ausgangsenergie gemacht werden kann. Auch der umgekehrte Fall mag für gewisse Zwecke Bedeutung erlangen.

Richtungsänderung einzelner Elektronen an vorhandenen Gasmolekülen (Streuung) oder durch den Einfluß elektrischer und magnetischer Felder gestört werden.

1. *Form des Beschleunigungsfeldes bei Kathodenabbildung.* Busch¹⁾ hat darauf hingewiesen, daß für die Abbildung einer Kathode mit der magnetischen Spule das Beschleunigungsfeld der Elektronen in Betracht gezogen werden muß und theoretisch gezeigt, daß ein homogenes elektrisches Feld zwischen Gegenstand und Spule zwar den Abbildungsmaßstab verändert, aber die Abbildung selbst nicht stört. Um die Kathodenemission gleichzeitig in ihrer ganzen Ausdehnung scharf auf dem Bild zu erhalten, muß je nach der Form des Leuchtschirms die Vorderseite der Kathode die Form einer senkrecht zur Strahlachse liegenden ebenen bzw. schwach kugelförmig gewölbten Fläche besitzen. Außerdem aber dürfen, wie man leicht einsieht, die Äquipotentialflächen zwischen Kathode und Anode innerhalb des Strahlbereichs nicht beliebig, wenn auch axialsymmetrisch, verlaufen, sondern müssen die Form von Ebenen oder Kugelflächen haben, wenn keine zusätzlichen Abbildungsfehler durch das Beschleunigungsfeld entstehen sollen. Für die Untersuchung im Elektronenmikroskop liegt es also nahe, der Kathodenoberfläche in Richtung der Gegenstandsebene eine etwas größere Ausdehnung zu geben. Auf diese Weise kann dann erstens (durch mechanische Bearbeitung der Kathodenoberfläche) die gewünschte kontinuierliche Form der Äquipotentialflächen auch über das Gegenstandsfeld hinaus, zweitens (durch die damit verknüpfte Herabsetzung der Feldstärke) eine Minderung des Einflusses der von der Form des Objektträgers abhängigen Äquipotentialflächen auf die Elektronenbahnen erreicht werden.

Fig. 3 zeigt das Beschleunigungsfeld²⁾ der auf Grund dieser Überlegungen benutzten Elektrodenform, die sich bei Emissionsuntersuchungen an kalten Kathoden³⁾ wie an Glühkathoden⁴⁾ gleich gut bewährt hat. Die parallelen Äquipotentialflächen gehen in einiger Entfernung von der Kathode in axialsymmetrische Kugelflächen über. Da dieser Teil des Beschleunigungsfeldes seiner Wirkung auf den Gesamtstrahl nach ledig-

¹⁾ H. Busch, Arch. f. Elektrot. 18, 588, 1927.

²⁾ Herrn Dipl.-Ing. H. Knoblauch sind wir für die Ausmessung des elektrostatischen Feldbildes im elektrolytischen Topf zu Dank verpflichtet.

³⁾ Über eine im Hochspannungslaboratorium der Techn. Hochschule Berlin laufende Untersuchung der Emission derartiger Kathoden im Elektronenmikroskop wird demnächst berichtet werden.

⁴⁾ Vgl. die nachfolgende Arbeit.

lich einer Zerstreulinse gleichkommt, die noch vor den eigentlichen Abbildungssystemen liegt, bedeutet dies für die Abbildung keine Störung.

2. *Elektrostatische Abstoßungskraft.* Auf alle außerhalb der Symmetrieachse des Kathodenstrahlbündels sich bewegenden Elektronen wirkt nach der Theorie eine radial nach außen gerichtete Kraft. Diese ruft je nach der Länge und Stromdichte des Strahlbündels eine zunehmende Abweichung der Einzelstrahlen von der geradlinigen Bahn nach außen hervor¹⁾. Die durch sie verursachte Strahlverbreiterung tritt jedoch auch bei relativ niedriger Elektronengeschwindigkeit nicht störend in Erscheinung, da

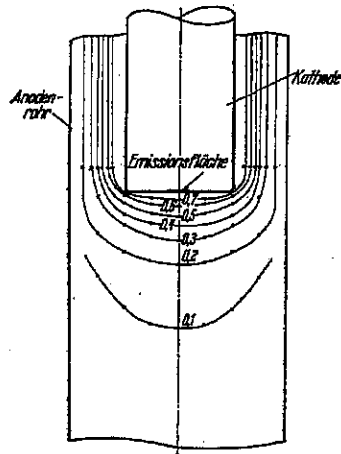


Fig. 3. Beschleunigungsfeld für Emissionsuntersuchungen.

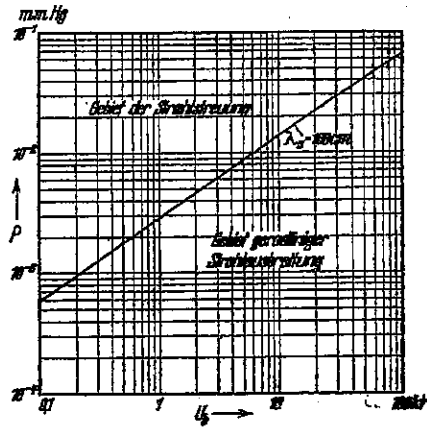


Fig. 4. Verwendungsbereich des Elektronenmikroskops. Druck/Spannungsgrenze für eine mittlere freie Weglänge von 100 cm in Luft. In dem Gebiet unterhalb der Grenzkurve herrscht überwiegend geradlinige (optische) Ausbreitung der Einzelstrahlen.

schon bei außerordentlich kleinen Stromdichten ($j \approx 10^{-5}$ A/cm²) eine genügende Bildhelligkeit auf dem Leuchtschirm zu erhalten ist.

3. *Streuung.* Der Zusammenstoß einzelner Elektronen mit Gasmolekülen verschlechtert die Bildqualität, sobald ein größerer Bruchteil der Elektronen des Strahlbündels dadurch eine Richtungsänderung erleidet. Maßgebend für die Richtungsänderung ist der Wirkungsquerschnitt der Gasmoleküle bzw. die ihm entsprechende mittlere freie Elektronenweglänge. Diese ist dem Gasdruck umgekehrt proportional und nimmt

¹⁾ Experimentell ist dieser Effekt übrigens unseres Wissens bisher noch nicht nachgewiesen worden.

oberhalb 100 Volt mit wachsender Spannung zu¹⁾. In Fig. 4 sind die zu einer mittleren freien Elektronenweglänge von 100 cm gehörigen Druck- und Spannungswerte nach ihrem Absolutwert aufgetragen; der Bereich unterhalb der Grenzkurven entspricht also ungefähr dem mit Rücksicht auf die Streuung zur Verfügung stehenden Verwendungsgebiet des Elektronenmikroskops. Wie man sieht, ist auch noch bei relativ hohen Drucken ein Arbeiten möglich, wenn genügend hohe Spannungen angewendet werden. Selbstverständlich hat die gezeichnete Kurve nicht den Charakter einer scharfen Grenze, sondern sie charakterisiert nur das Gebiet, von dem ab die Streuung eine stetige Abnahme der Bildqualität bewirkt. Über die experimentell festgestellte Art dieser Bildverschlechterung und ihre Deutung wird in der nachfolgenden Arbeit eingegangen.

4. Störende Fremdfelder. Es ist selbstverständlich, daß fremde, nicht zu den Abbildungssystemen gehörige Felder die Bildqualität verschlechtern können, wenn sie groß genug sind, um die Bahnen der Elektronen zu beeinflussen. Von den magnetischen Feldern dieser Art müssen der Einfluß des Heizstromfeldes der Kathode, der Streufelder elektrischer Apparate in der Umgebung und der des Erdfeldes, von elektrischen Feldern hauptsächlich die Aufladungen isolierter Flächen innerhalb oder außerhalb der Abbildungssysteme berücksichtigt werden.

Definition und Grenze des Auflösungsvermögens.

Beim normalen Mikroskop ist bekanntlich das Auflösungsvermögen definiert durch

$$d_n = \frac{\lambda}{A} \text{ (cm)}, \quad (7)$$

wenn λ die Wellenlänge des abbildenden Lichtes und A die Apertur des vom Objektiv noch aufgenommenen Strahlkegels bezeichnet. Für $\lambda = 0,550 \mu$ und die beim normalen Mikroskop erreichbare Apertur $A = 1,8$ ergibt sich hieraus als durchschnittlicher Absolutwert

$$d_n \approx 0,4 \mu.$$

Wir können nun in entsprechender Weise das Auflösungsvermögen des Elektronenmikroskops abschätzen, indem wir von der geometrischen Lichtoptik mittels des Begriffs der de Broglie-Welle zur geometrischen Elektronenoptik übergehen. In diesem Falle müßte der Absolutwert dieses (theoretischen) Auflösungsvermögens ebenfalls auf Grund der Abbéschen Bedingung (7) definiert werden, wonach der Winkel, den ein gebeugter

¹⁾ Über die Gesetzmäßigkeit dieser Zunahme vgl. F. Lenard, Quantitatives über Kathodenstrahlen. Tabelle 15, S. 181. Berlin 1925.

Strahl mit der Strahlachse einschließt, nicht größer sein darf als der Winkel u , welcher der (mit Rücksicht auf fehlerfreie Abbildung zulässigen) Apertur $A = \sin u$ der Elektronenlinse entspricht.

Die de Broglie-Wellenlänge der abbildenden Elektronen ist

$$\lambda = \sqrt{\frac{150}{U_b}} \cdot 10^{-8} \text{ cm,}$$

wenn U_b die Beschleunigungsspannung der Elektronen in Volt bezeichnet. Dies ergibt für

$$U_b = 1500 \text{ Volt: } \lambda = 3 \cdot 10^{-8} \mu,$$

$$U_b = 75000 \text{ Volt: } \lambda = 4,5 \cdot 10^{-8} \mu.$$

Auf Grund der bisherigen Versuchsergebnisse läßt sich die Apertur, bei der noch richtig ausgezeichnete Bilder mit der Magnetspule erhalten werden, zu 0,02 angeben; aller Wahrscheinlichkeit nach wird noch eine weitere Vergrößerung der Apertur möglich sein. Mit diesen Werten erhalten wir

$$d_s \approx \frac{3 \cdot 10^{-8}}{0,02} = 1,5 \cdot 10^{-5} \mu = 15 \text{ \AA} \text{ für 1500 Volt-Elektronen}$$

und

$$d_s \approx \frac{4,5 \cdot 10^{-8}}{0,02} = 0,22 \cdot 10^{-5} \mu = 2,2 \text{ \AA} \text{ für 75000 Volt-Elektronen.}$$

Die theoretische, durch die Wellennatur des Elektrons gegebene Grenze des Auflösungsvermögens des Elektronenmikroskops ist also mindestens zwei bis drei Größenordnungen größer als die des normalen Mikroskops und liegt schon bei atomaren Dimensionen. Ob dieses hohe Auflösungsvermögen auch zur Sichtbarmachung von Strukturen dieser oder ähnlicher Größenordnungen ausgenutzt werden kann, ist nach dem jetzigen Stand der Untersuchungen nicht zu entscheiden und bleibt einer Weiterführung der Methodik vorbehalten, die neben dem genauen Studium der Abbildungsfehler auch eine Steigerung der Intensität der Elektronenquelle umfassen muß. Untersuchungen nach dieser Richtung sind im Gange.

II. Experimenteller Teil.

Magnetisches Elektronenmikroskop.

Als Abbildungssystem wurde die kurze Magnetspule gewählt wegen der weitgehenden Freiheit von Abbildungsfehlern, der leichten Einstellbarkeit außerhalb des Vakuums, des weiten Verwendungsbereichs bei den verschiedensten Drucken und Spannungen und der Möglichkeit, rasch von

großen zu kleinen Vergrößerungen überzugehen¹⁾. Fig. 5 zeigt eine zweckmäßige Bauart des Mikroskops für schnelle Elektronen (10 bis 100 kV). Es besteht aus einem Metallrohr mit oben angesetzter Ionenröhre²⁾, die als Strahlenquelle für die Untersuchung bestrahlter Objekte oder als selbstemittierendes Untersuchungsobjekt verwendet wird.

Zur Erzeugung der Elektronenbilder auf dem am Boden des Metallrohres befindlichen Leuchtschirm dienen eisengekapselte Spulen, die „Objektivspule“ (mit einem möglichst kleinen Innendurchmesser), und die größere „Projektionsspule“, welche das durch die Objektivspule in Höhe des Okularmikrometers erzeugte Zwischenbild weiter vergrößert. Eine Vergrößerung in zwei Stufen ergibt bei einer bestimmten geforderten

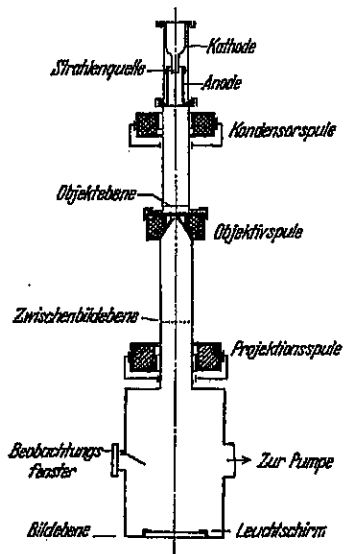


Fig. 5. Magnetisches Elektronenmikroskop mit kalter Kathode.

die Lichtstärke der Fluoreszenzbilder. Der Glasschirm ist möglichst dünn ($< 0,1$ mm) zu wählen, damit er bei intensiver Bestrahlung unter der Er-

Gesamtvergrößerung bei gleicher kleinster Spulenbrennweite eine bedeutend kürzere Länge des Mikroskops; für geringe Vergrößerungen kommt man mit der Objektivspule allein aus. Die oberhalb der Objektivspule sichtbare „Kondensatorspule“ dient in Analogie zur Anordnung beim normalen Mikroskop zur Strahlsammlung der „Beleuchtungsquelle“ auf das Objekt.

Als Leuchtschirm zur Sichtbarmachung der Elektronenbilder dient (wegen der großen Strukturfeinheit) bei schnelleren Elektronen (> 25 kV) eine Glasplatte, die durch Kathodenerstäubung mit einer Metallschicht von etwa 100μ versehen ist³⁾. Diese mit der Anode verbundene Schicht verhindert die Aufladung des Schirms und erhöht durch Reflexion an dem Metallspiegel

¹⁾ E. Brüche hat aus unserer Arbeit (Anm. 4, S. 318) geschlossen (Anm. 5, S. 355), wir hätten uns allgemein gegen die Möglichkeit guter Vergrößerungen durch elektrische Linsen ausgesprochen. Wir möchten an dieser Stelle darauf hinweisen, daß wir diesen Schluß nur für eine spezielle Form elektrischer Linsen (Netzelektroden) gezogen haben.

²⁾ M. Knoll, H. Knoblauch u. B. v. Borries, Elektrot. ZS. 51, 966, 1930.

³⁾ Vgl. M. Knoll u. E. Ruska, a. a. O., S. 618.

wärmung nicht zerspringt (Deckglasmaterial). Solche Glasschirme ergeben sehr saubere und kontrastreiche Bilder, da der noch im Strahl vorhandene Anteil langsamer Elektronen (chromatische Aberration!) und die Sekundärelektronen an der Erregung der Fluoreszenz verhindert werden.

Die Mikrophotographie der Elektronenbilder wird durch geringfügige Schwankungen der Beschleunigungsspannung (Änderung der Bildgröße und -scharfe) leicht gestört; bei Verwendung gleichgerichteter Wechselspannung ist also auf eine genügende Größe der Ausgleichkapazität zu achten. Eine weitere Störungsursache sind kleine mechanische Erschütterungen der Apparatur; es genügt bei 100facher Vergrößerung eine Amplitude der mechanischen Störschwingungen in der Gegenstandsebene von 10^{-2} bis 10^{-3} mm, um die Aufnahme bzw. das Leuchtschirmbild unscharf werden zu lassen. Durch möglichst kurze und kräftige Ausbildung der Mikroskopröhre bei entsprechender Starrheit der Kathode und der abbildenden Systeme können die Schwingungen innerhalb der Apparatur herabgesetzt werden; die Anregungsamplitude wird durch die Einschaltung elastischer Zwischenglieder in die Pumpleitung (zur Unterdrückung der Siedestöße des Quecksilbers) und (bei unruhigen Fundamenten, vgl. die nachfolgende Arbeit) in die Haltevorrichtung der Mikroskopröhre verkleinert. Schließlich ist für eine starre Verbindung des Aufnahmeapparates mit dem Mikroskop zu sorgen.

Ausführung magnetischer Linsen.

Wie beim normalen Mikroskop muß auch beim Elektronenmikroskop die Objektivlinse eine besondere Form erhalten, wenn starke Vergrößerungen erreicht werden sollen.

Die Brennweite einer kurzen Spule mit annähernd quadratischem Wicklungsquerschnitt ergibt sich aus (4) zu

$$f \approx 62500 \frac{U_b \cdot d}{I^2} \text{ (cm)},$$

worin U_b die Beschleunigungsspannung (Kilovolt), d den mittleren Spulendurchmesser (Zentimeter) und I den gesamten Strom durch den Wicklungsquerschnitt (Durchflutung in A) bedeutet.

In Fig. 6 ist die Feldstärke in der Spulenchse über der Strahlachse als Abszisse aufgetragen. Verkleinert man zwecks starker Vergrößerung die Brennweite, vergrößert man also den Strom, so gelangt man bald zu

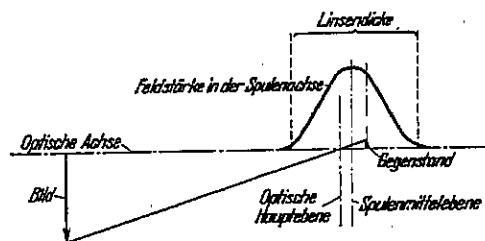


Fig. 6.

Abbildung durch kurze Spule bei zu großer „Linsendicke“.

einem Punkt, wo die Gegenstandsweite, die bei starker Vergrößerung immer nur wenig größer ist als die Brennweite, ganz in das wirksame Spulenfeld hereinfällt. Damit kommt ein Teil des Spulenfeldes jenseits des Gegenstandes zu liegen und trägt daher nichts mehr zur optischen Wirkung bei, so daß die optische Hauptebene aus der Mittelebene der Spule heraus immer weiter vom Objekt weggerückt wird. Es ist also selbst bei sehr starken Strömen unmöglich, die Brennweite unter einen gewissen Betrag zu bringen, wenn die „Linsendicke“ nicht genügend verkleinert werden kann.

Umgeben man die Spule mit einem Eisenmantel¹⁾, der nur im Innenrohr durch einen kurzen Schlitz unterbrochen ist, so liegt praktisch die ganze magnetische Spannung an diesem Schlitz. Die wirksame Feldlänge ist jetzt nur noch statt dem mittleren Spulendurchmesser etwa dem Innendurchmesser der Spulenkapselung proportional. Für die axiale Schlitzbreite ergibt sich ein Optimum (geringste Feldlänge bei gegebenem Strom und gleichzeitig geringster Strom für gegebene Brennweite) bei einem bestimmten Bruchteil dieses Innendurchmessers.

Eine weitere Verkürzung des Spulenfeldes kann (jetzt bei beliebigen Wicklungsquerschnitten) nur noch durch Verkleinern der Spulenbohrung erfolgen. Um diese möglichst weit treiben zu können (höchstens bis zum Durchmesser des abbildenden Elektronenbündels) kann man die vakuumdicht gekapselte Spule als Ganzes ins Vakuum bringen oder (unter Verzicht auf die Einstellbarkeit) die Eisenkapselung von außen durch die Wand der Vakuumröhre hindurch in Form von Polschuhen fortsetzen²⁾. Eine derartige (noch nicht experimentell erprobte) Ausführung der Objektivspule zeigt Fig. 7 im Schnitt.

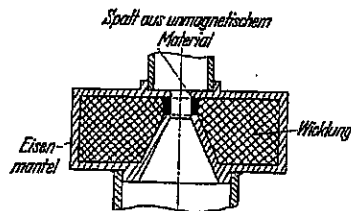


Fig. 7. Objektivspule (Schnitt).

Für die Ausbildung der beiden anderen Spulen eines vollständigen Elektronenmikroskops, also der Kondensospule und der Projektionspule, gelten sinngemäß ebenfalls die obigen Ausführungen. Diese Spulen müssen indessen mit einer wesentlich größeren Bohrung ausgeführt

¹⁾ Vgl. E. Ruska u. M. Knoll, a. a. O., S. 448.

²⁾ Dies gibt durch Bohrungen in den Polschuhen die Möglichkeit, den Strömungsquerschnitt zwischen Entladungsröhre und Mikroskopröhre größer zu machen als den freien Linsenquerschnitt, was in gewissen Fällen von Wichtigkeit sein kann.

werden, die Projektionsspule beispielsweise mit einem Durchmesser, der mindestens so groß wie das gewünschte Zwischenbild ist. Bei diesen Spulen ist meist eine Aufhängung nötig, die eine genau koaxiale Ausrichtung zu dem (etwa durch das Erdfeld gekrümmten) Strahlbündel ermöglicht. Bewährt hat sich dafür eine kardanische Aufhängung der Spule, die im ganzen noch quer zum Strahl verschoben werden kann (bei Projektionsspule und Kondenserspule Fig. 5 angedeutet).

Mikrophotogramme.

Fig. 8a zeigt ein über eine runde Blende gespanntes Molybdändrahtnetz, das durch ein mittels der Kondensorlinse konzentriertes Strahlbündel einer Metallentladungsröhre von hinten „beleuchtet“ wurde. Zum Vergleich wurde in einem gewöhnlichen Projektionsmikroskop (Zeiss) dieselbe Netzblende in gleicher Vergrößerung aufgenommen (Fig. 8b). Man sieht, daß



Fig. 8a.

Fig. 8b.

Fig. 8. Vergleich zwischen elektronen- und lichtoptischer Abbildung. Molybdändrahtnetz, Drahtabstand 0,3 mm, 12 fach in einer Stufe auf vergoldetem Glasleuchtschirm vergrößert; Beschleunigungsspannung 70 kV. a) durch Elektronenmikroskop. b) durch normales Mikroskop.

die Bildqualität der elektronenoptischen Aufnahme eher besser ist, insbesondere wegen der größeren Kontraste. Fig. 9 zeigt ein in gleicher Weise aufgenommenes Netzbild in 150facher Vergrößerung. Die hier noch merkbare Unschärfe (das in der Abbildung noch sichtbare feinmaschigere Netz ist das nur einstufig vergrößerte Bild eines Netzes in der Zwischenbildebene des großen Netzes) rührt von Erschütterungen der Apparatur durch die Pumpe her. Für das Auge war das Schirmbild zwar unruhig, aber scharf; auf dem Leuchtschirm konnten noch gute Netzbilder bis zu 400facher

werden, die Projektionsspule beispielsweise mit einem Durchmesser, der mindestens so groß wie das gewünschte Zwischenbild ist. Bei diesen Spulen ist meist eine Aufhängung nötig, die eine genau koaxiale Ausrichtung zu dem (etwa durch das Erdfeld gekrümmten) Strahlbündel ermöglicht. Bewährt hat sich dafür eine kardanische Aufhängung der Spule, die im ganzen noch quer zum Strahl verschoben werden kann (bei Projektionsspule und Kondensorsspule Fig. 5 angedeutet).

Mikrophotogramme.

Fig. 8a zeigt ein über eine runde Blende gespanntes Molybdändrahtnetz, das durch ein mittels der Kondensorlinse konzentriertes Strahlbündel einer Metallentladungsröhre von hinten „beleuchtet“ wurde. Zum Vergleich wurde in einem gewöhnlichen Projektionsmikroskop (Zeiss) dieselbe Netzblende in gleicher Vergrößerung aufgenommen (Fig. 8b). Man sieht, daß

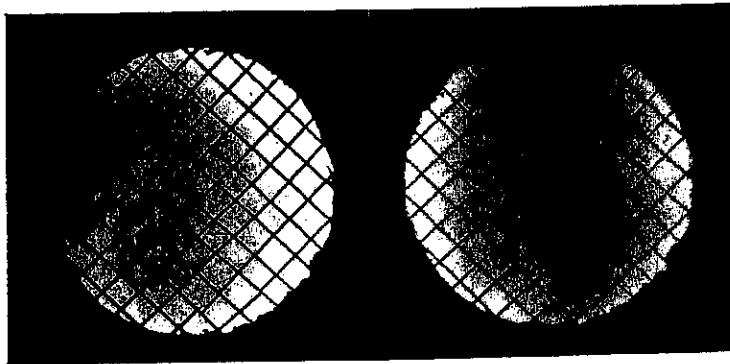


Fig. 8a.

Fig. 8b.

Fig. 8. Vergleich zwischen elektronen- und lichtoptischer Abbildung. Molybdändrahtnetz, Drahtabstand 0,3 mm, 12fach in einer Stufe auf vergoldetem Glasleuchtschirm vergrößert; Beschleunigungsspannung 70 kV. a) durch Elektronenmikroskop. b) durch normales Mikroskop.

die Bildqualität der elektronenoptischen Aufnahme eher besser ist, insbesondere wegen der größeren Kontraste. Fig. 9 zeigt ein in gleicher Weise aufgenommenes Netzbild in 150facher Vergrößerung. Die hier noch merkbare Unschärfe (das in der Abbildung noch sichtbare feinmaschigere Netz ist das nur einstufig vergrößerte Bild eines Netzes in der Zwischenbildebene des großen Netzes) rührt von Erschütterungen der Apparatur durch die Pumpe her. Für das Auge war das Schirmbild zwar unruhig, aber scharf; auf dem Leuchtschirm konnten noch gute Netzbilder bis zu 400facher

Vergrößerung und bis zu 80 cm Durchmesser beobachtet werden. Fig. 10 zeigt das Bild des Emissionsgebiets auf der Oberfläche der Aluminiumkathode einer Ionenröhre. Zur Feststellung des Abbildungsmaßstabs und

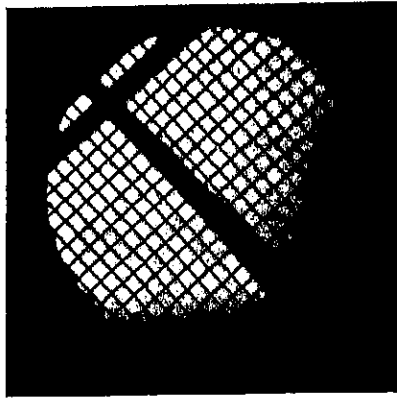


Fig. 9. Molybdändrahtnetz, Drahtabstand 0,8 mm, Vergrößerung 10 fach und 150 fach in einer bzw. zwei Stufen; Beschleunigungsspannung 65 kV (vergoldeter Glasleuchtschirm).



Fig. 10. Bild der Emissionsfläche einer parallel geritzten kalten Kathode, Gitterabstand 0,8 mm; Vergrößerung 15 fach; Beschleunigungsspannung 65 kV (vergoldeter Glasleuchtschirm).

zur Kontrolle der geometrischen Ähnlichkeit der Abbildung war auf der polierten Oberfläche der Kathode ein Gitter ($d = 0,8$ mm) mit der Teilmaschine eingeritzt (Objektmikrometer).

III. Untersuchungsmethoden und Anwendungen.

Im folgenden sind einige Untersuchungsmethoden und Anwendungen des Elektronenmikroskops zusammengestellt.

1. *Durchstrahlungsmethode.* Die Gegenstandsebene liegt zwischen Strahlenquelle und Abbildungssystem; das Strahlbündel 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.

Anwendungen: Beobachtung feiner Gitterstrukturen, kleinster Öffnungen, Dichteunterschiede und Korngrenzen dünner Schichten.

2. *Bestrahlungs- (Reflexions-) Methode.* Die Strahlenquelle liegt seitlich zwischen Gegenstandsebene und Abbildungssystem; das Strahlbündel wird von der Oberfläche des zu untersuchenden Körpers zurückgeworfen. Die Methode entspricht der Beleuchtung im reflektierten Licht beim normalen Mikroskop. Die reflektierten Elektronen geben ein Bild der Oberfläche, wenn ihre Geschwindigkeit genügend homogen ist und die Oberfläche infolge ihrer Struktur Reflexionsunterschiede aufweist.

Anwendungen: Oberflächenuntersuchungen an verschiedenen Stoffen.

3. *Selbstemissionsmethode.* Die Strahlenquelle liegt in der Gegenstandsebene; beobachtet wird die für den untersuchten Körper charakteristische Verteilung der Elektronenemission, wobei die letztere durch Erhitzen, durch Ionenbombardement oder durch lichtelektrischen Effekt hervorgerufen wird.

Anwendungen: Beobachtung der charakteristischen Emissionsverteilung von Glühkathoden, kalten Kathoden und lichtelektrischen Kathoden in Abhängigkeit vom Kathodenmaterial, seiner Vorgeschichte und Temperatur.

4. *Fremdemissionsmethode¹⁾.* Die Strahlenquelle liegt in der Gegenstandsebene; beobachtet wird die Struktur einer zu untersuchenden Oberfläche, auf der eine hochemittierende Substanz in sehr dünner Schicht, z. B. durch Verdampfung niedergeschlagen ist, mit Hilfe der Elektronenemission dieser Schicht.

Anwendungen: Oberflächenuntersuchungen an verschiedenen Stoffen.

5. *Raumladungsuntersuchungen.* Die Gegenstandsebene liegt zwischen Strahlenquelle und Abbildungssystem; beobachtet werden Bilder der entsprechenden Strahlquerschnitte.

¹⁾ Angegeben von F. Houtermans.

Anwendungen: Untersuchung der Ausdehnung und Veränderung positiver und negativer Raumladungswolken; Analyse elektrostatischer Felder innerhalb der Gasentladung durch Beobachtung der Veränderung des Abbildungsmaßstabs oder der Abbildungsfehler.

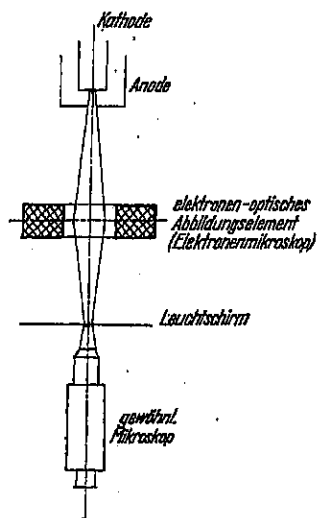


Fig. 11.
Elektronen-lichtoptische Abbildung.

6. Elektronenoptisch-lichtoptische Methode.
(Kombination eines elektronenoptischen mit einem lichtoptischen Abbildungssystem, Fig. 11.)

Elektronenoptische Vergrößerung bis zu einer Zwischenstufe, Weitervergrößerung im normalen Mikroskop. Voraussetzung ist genügende Kornfeinheit des verwendeten Leuchtschirms¹⁾. Bei starken Vergrößerungen besteht die Möglichkeit der Kompensation der Linsenfehler des elektronenoptischen Abbildungssystems durch das lichtoptische.

Anwendungen: Alle unter 1. bis 5. genannten Anwendungen, bei welchen nur ein einziges elektronenoptisches System verwendet wird bzw. verwendet werden kann. Die Vorteile liegen in kleinen Abmessungen und leichter Handhabung, besonders dann, wenn eine größere Zahl von Objekten über längere Zeiträume untersucht werden soll (Lebensdaueruntersuchungen an Glühkathoden, kalten Kathoden oder lichtelektrischen Kathoden.)

IV. Ionenmikroskop.

Wegen der grundsätzlichen Analogie zwischen den Bahnen von Massepunkten und Lichtstrahlen²⁾ müssen die Gesetzmäßigkeiten der geometrischen Elektronenoptik auch für schwerere und positiv geladene Teilchen Geltung haben. Untersuchungen mittels geometrisch-optischer Methoden lassen sich daher auch auf Ionen (einfach und mehrfach geladene, positive und negative) ausdehnen; doch ist die Stärke der Abbildungsfelder, die in

¹⁾ Bei genügend schnellen Elektronen werden zweckmäßig metallisierte Glasleuchtschirme benutzt.

²⁾ Vgl. Hamiltons Theorie der Optik inhomogener Medien und seine aus dieser entwickelte Theorie der Mechanik in E. T. Whittaker, Analytische Dynamik (Deutsche Ausgabe: Berlin, Julius Springer, 1924), Kap. 11, S. 306ff.

beiden Fällen aufgewandt werden müssen, verschieden. Bezeichnen wir die Masse des Elektrons mit m_{El} , die eines Ions mit m_{Ion} , die Zahl der überschüssigen Ladungen des Ions mit n und die von Elektron oder Ion durchlaufene Beschleunigungsspannung wieder mit U_b (Kilovolt), dann ergibt sich für die Durchflutung J (Ampere) einer kurzen Spule mit dem mittleren Durchmesser d (Zentimeter) und der Brennweite f (Zentimeter) allgemein (Kathodenstrahlen und Kanalstrahlen) die Beziehung¹⁾

$$I \approx \frac{250}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{m_{\text{Ion}}}{m_{\text{El}}}} \sqrt{\frac{U_b d}{f}} = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{m_{\text{Ion}}}{m_{\text{El}}}} I_{\text{El}},$$

wenn unter I_{El} die für Elektronenstrahlen derselben Beschleunigungsspannung aufzubringende Sammeldurchflutung verstanden wird. Für doppelt geladene Heliumionen (α -Strahlen) ergibt sich beispielsweise

$$I \approx \sqrt{\frac{4 \cdot 1850}{2}} I_{\text{El}} = 60,8 I_{\text{El}}.$$

Für einfach geladene Argonionen erhält man

$$I \approx \sqrt{40 \cdot 1850} I_{\text{El}} = 272 I_{\text{El}}.$$

Die notwendigen Spulenströme sind also um rund zwei Größenordnungen höher als in der Elektronenoptik. Trotz dieser Erschwerung lassen sich Spulen zur Ionenabbildung verwenden, zumal bei niedrigeren Spannungen und nicht zu kleinen Brennweiten.

Günstiger liegen die Verhältnisse bei elektrostatischen Systemen, da hier die Spannungen für bestimmte Brennweiten bei Teilchen gleicher kinetischer Energie (gleicher Beschleunigungsspannung) von der Masse der Teilchen und von der Zahl der Elementarladungen unabhängig sind. Für Kugelflächenelektroden beispielsweise gelten bei Ionenabbildung dieselben Beziehungen zwischen Systemspannung und Brennweite, wie sie schon für elektronenoptische Elemente aufgestellt wurden²⁾, so daß in diesem Falle eine gewisse Überlegenheit der elektrostatischen Linsen gegenüber Spulen bei der Verwendung im Ionenmikroskop besteht. Da die Ergiebigkeit der bisher bekannten Substanzen, die in heißem Zustand Ionen emittieren, sehr gering ist, wird die Beobachtung von Ionenstrahlquerschnitten wohl am ehesten an Kanalstrahlröhren mit kalter Kathode möglich sein.

Zusammenfassung.

1. Elektronenoptische Abbildungen können durch eine Lochblende, durch eine Magnetspule, durch Kugelflächen- (Netzflächen-) Elektroden,

¹⁾ Vgl. Anm. 3, S. 318, a. a. O. S. 393.

²⁾ Vgl. Anm. 4, S. 318, a. a. O. S. 356.

durch Lochelektroden (kugelförmige Ausbildung der elektrischen Niveaulinien auf der der Gegenelektrode abgewandten Seite einer Blendenöffnung), durch eine Raumladungssäule (elektrisches Feld der vom abbildenden Strahlbündel durch Stoß erzeugten Raumladung) oder durch Kombinationen dieser Anordnungen erhalten werden. Ihre Fehler und ihre Eignung für das Elektronenmikroskop entsprechend dem angestrebten Untersuchungszweck werden diskutiert.

2. Außer der Fehlerfreiheit der Abbildungssysteme müssen für eine geometrisch ähnliche Abbildung folgende Voraussetzungen erfüllt sein: Die Kathode muß in Richtung der Gegenstandsebene eine gewisse Mindestausdehnung besitzen; die elektromagnetischen Feldkräfte zwischen den Elektronen des Strahlbündels und die Streuung der Elektronen an noch vorhandenen Gasmolekülen müssen vernachlässigbar klein sein; störende Fremdfelder müssen ferngehalten werden.

3. Das Auflösungsvermögen des Elektronenmikroskops kann in Analogie zum Auflösungsvermögen des normalen Mikroskops auf Grund der Abbéschen Bedingung geschätzt werden, wonach das erste Beugungsmaximum der Wellenlänge der abbildenden Strahlung nicht außerhalb der Apertur des abbildenden Systems fallen darf. Setzt man in diese Beziehung für das Auflösungsvermögen ($\delta = \lambda/A$) als Wellenlänge die de Broglie-Wellenlänge der Elektronen und die größte Apertur ein, bei der bisher mit magnetischen Linsen experimentell einwandfreie Abbildungen erhalten wurden, so ergibt sich ein theoretisches Auflösungsvermögen, das um zwei bis drei Größenordnungen höher ist als das des normalen Mikroskops. Wie weit dieses theoretische Auflösungsvermögen auch praktisch ausgenutzt werden kann, ist nach dem heutigen Stande der Untersuchung noch nicht zu entscheiden.

4. Die Ausführung eines magnetischen Elektronenmikroskops, der zugehörigen Elektronenlinsen (Kondenserspule, Objektivspule, Okularspule) und die Behebung der von periodischen Spannungsschwankungen und mechanischen Erschütterungen herrührenden Bildstörungen wird angegeben.

5. Mikrophotogramme desselben Gegenstandes zeigen, daß bei schwacher Vergrößerung (12fach) die Bildqualität der elektronenoptischen Abbildung der der lichtoptischen vollständig gleichwertig ist. Fehlerfrei ausgezeichnete Netzbilder konnten auf dem Leuchtschirm in bis zu 400facher Vergrößerung beobachtet werden; wegen der Erschütterungsempfindlichkeit der Apparatur sind die entsprechenden Mikrophotogramme bei Vergrößerungen über 100 zunehmend unschärfer. An Stelle eines bestrahlten Objektes gelingt auch die geometrisch ähnliche Abbildung der Strahlenquelle (Ionenröhre, kalte Kathode) ohne Störung durch das Beschleunigungsfeld.

6. Die beim Elektronenmikroskop anzuwendenden Untersuchungsmethoden sind je nach dem angestrebten Zweck verschieden. Neben der dem normalen Mikroskop entsprechenden Durchstrahlungsmethode sind grundsätzlich noch eine Reihe weiterer Methoden benutzbar, deren Strahlengang und Anwendung beschrieben wird. Für gewisse Untersuchungen ist es zweckmäßig, die elektronenoptische Vergrößerung nur bis zu einer Zwischenstufe anzuwenden und dann das Elektronenbild durch ein gewöhnliches Mikroskop weiter zu vergrößern (elektronen-lichtoptische Methode). Der verwendete Leuchtschirm muß in diesem Falle eine genügend feine Struktur besitzen.

7. Die Gesetzmäßigkeiten der geometrischen Elektronenoptik gelten analog für eine geometrische Ionenoptik; daher ist auch die Ausführung eines Ionenmikroskops möglich. Verwendet man dabei magnetische Linsen, so muß deren Durchflutung wegen der größeren Masse der Ionen bei gleicher Beschleunigungsspannung und Brennweite um die Wurzel aus dem Massenverhältnis und der Zahl der überschüssigen Kernladungen, also um $\sqrt{\frac{m_{\text{Ion}}}{m_{\text{El}} \cdot z}}$, d. h. um rund zwei Größenordnungen höher sein als bei Elektronenabbildung. Bei elektrostatischen Abbildungssystemen dagegen ist bei gleicher Beschleunigungsspannung und Brennweite die für Elektronen und Ionen zur Abbildung erforderliche Linsenspannung dieselbe, da sie von Masse und Ladungszahl der abbildenden Strahlen unabhängig ist.

Herrn Prof. Matthias danken wir für die freundliche Unterstützung unserer Arbeiten; der Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft und der Studiengesellschaft für Höchstspannungsanlagen für die Bereitstellung der Mittel, die die Durchführung des experimentellen Teiles ermöglichten.