

[Aus dem Hochspannungsinstitut Neubabelsberg der Technischen Hochschule Berlin¹).]

Über Fortschritte im Bau und in der Leistung des magnetischen Elektronenmikroskops.

Von E. Ruska in Berlin-Wilmersdorf.

Mit 14 Abbildungen. (Eingegangen am 12. Dezember 1933.)

Einleitung. — A. Bau des magnetischen Elektronenmikroskops. 1. Bauart. 2. Einzelteile: Entladungsrrohr mit Kühlkörper — Objektwechselkammer — Tubus — Pumpe — Aufnahmekammern — Spulen. 3. Notwendigkeiten und Möglichkeiten der Verbesserung: Entladungsrrohr — Objektkammer — Pumpenanschluß — Innenaufnahme. — B. Leistung des magnetischen Elektronenmikroskops. 1. Auflösung, Apertur und Intensität. 2. Verteilung der Vergrößerung. 3. Bildeinstellung. 4. Objektstärke und Strahlspannung. 5. Ergebnisse und Aussichten.

Einleitung.

Das Elektronenmikroskop (EM) kann nach zwei verschiedenen Richtungen unsere bisherige Kenntnis grundsätzlich erweitern. Die erste Möglichkeit betrifft die Sichtbarmachung der örtlichen und zeitlichen Emission von Kathoden aller Art, wie auch von anderen Elektronen emittierenden Körpern. Dieser Weg ist schon im ersten Stadium der systematischen elektronenoptischen Untersuchungen beschritten worden. Das zweite für unsere Erkenntnis wohl noch wesentlichere Gebiet ist die Sichtbarmachung bisher unzugänglich kleiner Teilchen und Einzelheiten, die infolge der äußerst geringen, den Elektronen nach de Broglie zuzuordnenden Wellenlängen grundsätzlich möglich ist. Dieser Mikroskopie zugänglich sind beliebige (auch alle organischen) Objekte, sofern sie ohne Schaden zu nehmen (Strukturänderung), als genügend dünne Folien hergestellt und in das Vakuum gebracht werden können. Die Erreichung und Überholung des Auflösungsvermögens des gewöhnlichen Mikroskops ist erst in jüngster Zeit erfolgt²). Die für diesen Zweck gebaute Apparatur und die Arbeitsmethoden sollen nachstehend beschrieben, einige der erhaltenen Mikrophotogramme gezeigt und Überlegungen über die Möglichkeit weiterer Leistungssteigerung angestellt werden.

¹) Vorstand Prof. A. Matthias. — ²) E. Ruska, Forsch. u. Fortschr. 10, 8, 1934.

A. Bau des magnetischen EM.

1. Bauart.

Das im folgenden beschriebene EM sollte einerseits stärkste Vergrößerungen bei guter Bildschärfe ermöglichen, d. h. ein deutlich über die bisherige Grenze beim Lichtmikroskop hinausgehendes Auflösungsvermögen besitzen. Andererseits sollte Entwicklungsarbeit geleistet werden in der Richtung, das EM als Übermikroskop für die Untersuchung beliebiger durchstrahlter Objekte zu verwenden. Das Bedürfnis nach einer Erweiterung des Anwendungsbereichs über die bisher meist betriebene Untersuchung von Kathoden oder sonstigen selbstemittierenden Objekten¹⁾ hinaus tritt mit erreichter Überholung des lichtoptischen Auflösungsvermögens von selbst in den Vordergrund.

Mit dieser Aufgabenstellung war die grundsätzliche Bauart des EM weitgehend gegeben. Wegen der Gasmenngen, die durch das Einschleusen und Nachgasen von Objekten und photographischen Platten in die Apparatur gelangen, wird diese immer an die Pumpe angeschlossen sein müssen. Für die Wahl der magnetischen Spule als Optik waren deren gute optische Eigenschaften, insbesondere auch ihre bequeme Abblendbarkeit entscheidend. Der große Vorsprung der elektrischen Linse bezüglich kleiner Brennweite²⁾ (allerdings nur bei minimalen Eintrittsgeschwindigkeiten der Elektronen, so daß sie bisher nur für Kathodenuntersuchungen verwandt werden konnte) war inzwischen durch entsprechende Bauweise der Spulen³⁾ erheblich verringert worden. Dazu kam die Verwendbarkeit der Spule auch für höchste Strahlspannungen, wie diese zur Untersuchung durchstrahlter Objekte notwendig sind. Die Form der neuen Spule (innen liegende Polschuhe mit minimalem, freiem Querschnitt) verlangte eine Metallausführung der Gesamtapparatur, wie sie auch bei dem Aufbau aus vielen Teilen (allein drei verschiedene Spulen, Objektkammer, Aufnahmekammern u. a.) zweckmäßig erschien. Wegen des mäßigen Vakuums (etwa 10^4 mm Hg), das in solchen stark zusammengesetzten und leicht auseinandernehmbaren Apparaturen zu erreichen ist, war die zunächst gegebene Strahlquelle das Gasentladungrohr, das wegen seiner nahezu punktförmigen Emission und guten Richtstrahlereigenschaft auch optisch am geeignetsten ist.

¹⁾ Unter selbstemittierenden Objekten sollen diejenigen verstanden werden, deren abbildende Strahlung im Objekt ihren Ursprung nimmt, wobei die Ursache dazu auch außerhalb gelegen sein kann. Es sind dieses also nicht nur kalte, glüh- und lichtelektrische Kathoden, sondern beispielsweise auch Körper, von denen unter irgendwelchen Einflüssen (Elektronen-, Höhen-, Röntgenstrahlung) Sekundärelektronen ausgehen. — ²⁾ H. Johansson, Ann. d. Phys. 18, 385, 1933. — ³⁾ E. Ruska, Berliner Dissertation, erscheint demnächst.

Die Bauweise der Gesamtapparatur (Fig. 1) lehnt sich eng an die im Hochspannungslaboratorium der Technischen Hochschule, Berlin, und von der Studiengesellschaft für Höchstspannungsanlagen¹⁾ entwickelten Konstruktionen von Kathodenstrahloszillographen hoher Leistung an²⁾. Ins-

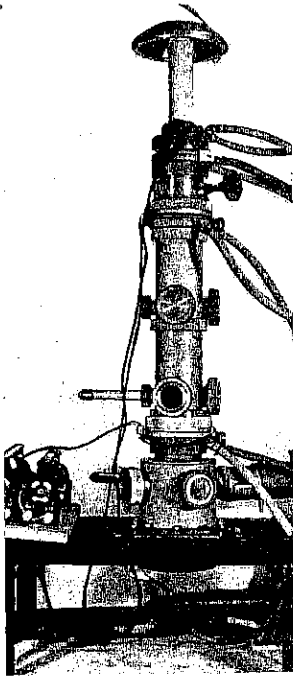


Fig. 1. Gesamtansicht des elektrischen Elektronenmikroskops. (Länge vom Kathodenschirm bis Kassettensboden = 1,20 m)

besondere konnten von dort vakuumtechnisch erprobte Elemente übernommen werden. Das EM ist senkrecht aufgestellt wegen der dann besonders bequemen Beobachtbarkeit von Objekt, Zwischenbild und endgültigem Bild in der gewohnten Weise. Die senkrechte Orientierung schien ferner deshalb am günstigsten, weil zur Zentrierung der Einzelteile hier keine besonderen konstruktiven Maßnahmen notwendig sind, um die Wirkung des Eigengewichts auszugleichen, und weil ferner Zerlegung und Aufbau besonders leicht sind. Der letzte Grund und die durch kein Stützgestell beeinträchtigte Zugänglichkeit aller Teile, insbesondere der Objektkammer sprachen weiter für die Bauart mit obener liegender Kathode.

Die Apparatur zerfällt axial in verschiedene in sich abgeschlossene Bauteile. Von oben nach unten sind dies: Entladungsröhre, Kühlkörper dazu, Kondensorenspule, Objektwechselkammer, Objektivspule, Zwischenbildtubus, Projektionsspule und Endtubus mit Aufnahmekammer. Alle Teile werden unter Zwischenlage von Gummidichtungen miteinander verbunden und gleichzeitig zentriert durch Überwurfmutter, die bei unzureichendem Vakuumdruck auch noch eine genügende Anpressung gewährleisten. Sämtliche Teile sind hierfür an beiden Enden mit Dichtungsflanschen versehen, die auf ihrer Stirnfläche zwei konzentrische konvexe Dichtungsriefen aufweisen. Diese greifen kammartig zwischen entsprechende

¹⁾ Studiengesellschaft für Höchstspannungsanlagen e. V. Berlin-Charlottenburg 2, Bismarckstr. 111. — ²⁾ Die Anfertigung der meisten Einzelteile, insbesondere der recht schwierigen Spulengehäuse, übernahm Herr Mechanikermeister A. Keltz, Berlin-Zehlendorf. Endtubus und Aufnahmekassette wurden von den Institutsmechanikern Herrn Gürgen und Herrn Reichert hergestellt.

Riefen des Anschlußteiles und stellen auf der zwischenliegenden Gummidichtung praktisch den ganzen Luftabschluß her. Fast alle diese Verbindungen haben gleichen Durchmesser und sind in gleicher Weise ausgebildet, so daß die Einzelbauteile in beliebiger Reihenfolge zusammengesetzt werden können, wodurch das EM für die verschiedensten Untersuchungen nach jeweils kurzem Umbau brauchbar ist. Für sämtliche Beobachtungsfenster ist zum Schutze gegen Röntgenstrahlen Bleiglas von 6 bis 10 mm Stärke (Bleiäquivalentstärke 1,5 bis 2,5 mm) verwandt.

2. Einzelteile.

Entladungsrohr und Kühlkörper. Das Entladungsrohr zur Beleuchtung der zu untersuchenden Objekte muß außerordentlich ruhig, d. h. ohne Stromstöße und damit verbundene Spannungsrückgänge brennen. Diese Anforderung wächst mit steigenden Vergrößerungen immer mehr. Das Rohr soll ferner den Dauerbetrieb bei hohem Betriebsstrom aushalten und muß trotzdem ein möglichst punktförmiges Emissionsgebiet behalten. Schließlich soll es gute

Richtstrahlereigenschaften haben, d. h. es muß die Strahlstromdichte von der Strahlachse nach außen möglichst rasch abfallen¹⁾. Alle vier Forderungen werden zur Zeit durch das von Knoblauch²⁾ für den Kathodenstrahloszillographen entwickelte Metallentladungsrohr (Gasentladungsrohr mit kalter Al- bzw. Eisenkathode) am besten erfüllt. Es besteht aus einem 22 cm langen röhrenförmigen Isolator aus Steatit oder Hartporzellan mit geschliffenen Endflanschen, auf die mittels Überwurfmutter und geteilten Ringen auf der einen Seite ein rotationssymmetrischer Kathoden-

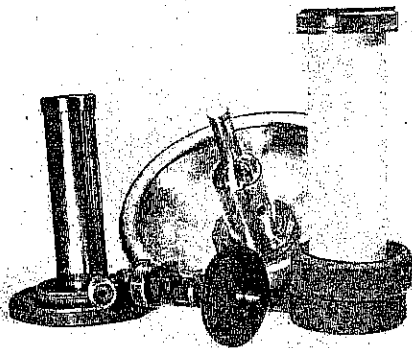


Fig. 2. Entladungsrohr mit dem Kühlkörper.

entwickelte Metallentladungsrohr (Gasentladungsrohr mit kalter Al- bzw. Eisenkathode) am besten erfüllt. Es besteht aus einem 22 cm langen röhrenförmigen Isolator aus Steatit oder Hartporzellan mit geschliffenen Endflanschen, auf die mittels Überwurfmutter und geteilten Ringen auf der einen Seite ein rotationssymmetrischer Kathoden-

¹⁾ Als Kennlinie zur Beurteilung einer Röhre trägt man am besten den Strahlanteil, der in einen bestimmten Raumwinkel fällt, über diesem auf. Vgl. auch F. Malsch, Arch. f. Elektrot. 27, 642, 1933 und B. v. Borries u. E. Ruska, Forschungsheft 3/4 der Studiengesellschaft für Höchstspannungsanlagen, Berlin 1934. — ²⁾ M. Knoll, H. Knoblauch und B. v. Borries, Elektrot. ZS. 51, 966—970, 1930; ferner H. Knoblauch, Forschungsheft 3/4 der Studiengesellschaft für Höchstspannungsanlagen, Berlin 1934.

körper aus Aluminium aufgeschraubt wird. Sein Durchmesser beträgt erst 4,4 cm bei 4,6 cm Innendurchmesser des Isolators und geht nach etwa 7 cm über eine Abrundung auf 1,8 cm (Kathodenschaft) herunter, den es bis zur ebenen Kathodenvorderfläche beibehält. Der vordere Teil, die eigentliche Kathode, ist als auswechselbarer Schraubeinsatz ausgebildet. Ein neuer Kathodeneinsatz wird erst sauber poliert, um einen kleinen und runden Brennfleck zu erzielen. Wenn nach längerer Betriebszeit (etwa 10 Stunden) der Zerstäubungskrater zu tief und breit geworden ist, sinkt die Strahlungsdichte in der Achsenrichtung erheblich und das Rohr brennt nicht mehr so vollkommen ruhig, wie dies für die Aufnahme starker Vergrößerungen notwendig ist, so daß sich die Auswechslung empfiehlt. Die Eisenkathode hat den Vorteil der geringen Empfindlichkeit gegen Hg-Dämpfe, zeigt aber wegen ihrer größeren Zerstäubungsfähigkeit eine schnellere Alterung, die sich in einer Verschlechterung der Richtstrahlung äußert.

Die Anode besteht aus einem Metallrohr, das den Kathodenschaft umgibt, so daß die Entladung in einem völlig von Metallwänden umgebenen Raum brennt. Den Abschluß des Anodenrohres bildet ein Schraubeneinsatz, in den mehr oder weniger große Blenden zur Ausblendung des Strahlkegels eingespannt werden können. Zur Verhinderung zu starker Luftdrosselung erhält der Einsatz mehrere für den Strahledurchtritt verdeckte Entlüftungsbohrungen. Anodenrohr und Anodenblende werden bei der vorliegenden Apparatur in einen eigenen Röhrenkühlkörper eingesetzt, auf den das

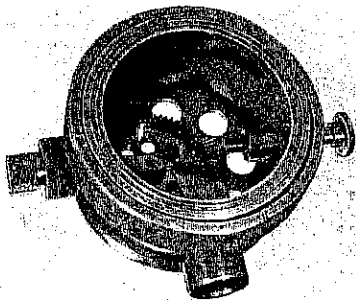


Fig. 3. Objektwechselkammer.

Entladungsrohr in der üblichen Weise leicht abnehmbar aufgeschraubt wird. Ein Lufteinlaßventil (Spindelschraube) am Kühlkörper ermöglicht die stetige Regelung des Druckes und damit des Arbeitspunktes (Stromspannung) der Röhre.

Objektwechselkammer (Fig. 3). Dieser Teil der Apparatur entspricht dem Objektisch des normalen Mikroskops, er sitzt unmittelbar hinter dem Röhrenkühlkörper, wenn ohne Kondensorenpule, hinter dieser Spule, wenn mit Strahlvorsammlung auf das Objekt gearbeitet wird. Die Kammer dient dazu, mehrere Objekte zu untersuchen, ohne beim Objektwechsel das Vakuum zu

unterbrechen. Zu diesem Zwecke sitzt in dem objektivseitigen Boden der Kammer (und zwar unmittelbar vor dem Objektiv) exzentrisch ein Kegelrad, bei dem innerhalb des Zahnkranzes acht Einsatzbohrungen angebracht sind, in denen die Objekte zwischen je zwei Lochblenden durch Schraubringe eingespannt werden. Das Zahnrad sitzt soweit außerhalb der optischen Achse, daß sich beim Drehen die Objektivsätze quer zum Strahl genau durch diese bewegen. Die Drehung erfolgt von außen mittels eines konischen Drehschliffes, auf dessen (zum Strahl senkrechter) Achse das zweite Kegelrad sitzt. Die Stellung des Kegelrades kann durch ein Fenster beobachtet werden; eine Rast sorgt für die jeweilige Festhaltung des Rades in den zentrierten Lagen der acht Bohrungen.

Die Objektblenden müssen zur guten Wärmeableitung vollkommen eben (möglichst poliert) sein. Insbesondere muß die Bohrung selbst gratfrei sein, da sonst die Objekte am Bohrungsrand abgedrückt werden, wodurch die Wärmeableitung außerordentlich leidet. Die Blendenbohrung braucht bei den starken Vergrößerungen nur $\frac{1}{10}$ mm zu betragen. Bei kleineren Bohrungen (0,03 und 0,05 mm) traten starke Bildfehler auf, die ihren Grund in der Reflexionswirkung der Zylindermantelfläche der Blendenbohrung hatten. Solche sehr kleinen Blenden müssen daher

einseitig angesenkt werden. Diese Ansenkung beider Blenden soll die engste Blendenbohrung in der Länge auf höchstens den doppelten Blendendurchmesser beschränken. Eine günstige Blendenausbildung ist in Fig. 4 gezeigt. Die erste Blende („Objektträger“) ist zur guten Wärmeabfuhr ziemlich stark, die zweite („Deckglas“) möglichst schwach, um an Entfernung bis zum Objektiv zu sparen. Der Blendensitz muß genau passend sein (Toleranz möglichst nicht größer als $\frac{3}{100}$ mm). Günstig ist die Verwendung von Edelmetallen mit hohem Schmelzpunkt (Goldplatin), um ein Verdampfen des Blendenmaterials oder Schmelzspuren an der Blendenbohrung, aber auch die Bildung von isolierenden Oxydteilchen in der Bohrung zu vermeiden. Die letzteren können durch Aufladung zu optischen Störungen Veranlassung geben. Sehr zu empfehlen ist beim Arbeiten die Abblendung des Strahles unmittelbar vor dem Objekt durch eine „Vorsammelblende“, deren möglichst groß zu machende Wärmeableitung jedoch nicht nach der Objektkammer, sondern nach der Kondenserspule hin erfolgen soll. Die mit Entlüftungslöchern versehene Kupferblende wird daher in diese Spule geschraubt.

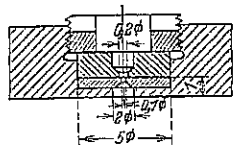


Fig. 4. Geeigneter Objektträger (Maße in Millimeter).

einseitig angesenkt werden. Diese Ansenkung beider Blenden soll die engste Blendenbohrung in der Länge auf höchstens den doppelten Blendendurchmesser beschränken. Eine günstige Blendenausbildung ist in Fig. 4 gezeigt. Die erste Blende („Objektträger“) ist zur guten Wärmeabfuhr ziemlich stark, die zweite („Deckglas“) möglichst schwach, um an Entfernung bis zum Objektiv zu sparen. Der Blendensitz muß genau passend sein (Toleranz möglichst nicht größer als $\frac{3}{100}$ mm). Günstig ist die Verwendung von Edelmetallen mit hohem Schmelzpunkt (Goldplatin), um ein Verdampfen des Blendenmaterials oder Schmelzspuren an der Blendenbohrung, aber auch die Bildung von isolierenden Oxydteilchen in der Bohrung zu vermeiden. Die letzteren können durch Aufladung zu optischen Störungen Veranlassung geben. Sehr zu empfehlen ist beim Arbeiten die Abblendung des Strahles unmittelbar vor dem Objekt durch eine „Vorsammelblende“, deren möglichst groß zu machende Wärmeableitung jedoch nicht nach der Objektkammer, sondern nach der Kondenserspule hin erfolgen soll. Die mit Entlüftungslöchern versehene Kupferblende wird daher in diese Spule geschraubt.

Die Objektwechselkammer erleichtert natürlich Untersuchungen ganz wesentlich. Es können entweder zur ersten Orientierung verschiedenartige

Objekte eingesetzt werden, deren Verhalten im EM geprüft werden soll, oder es können auch gleichartige Objekte vorrätig gehalten werden, besonders dann, wenn sie durch die Bestrahlung leicht zerstört werden. Ferner wird man immer in einen Einsatz ein Blind- und Meßobjekt (etwa eine Lochblende mit bekanntem Durchmesser) einsetzen. Bei Vorschaltung dieses wärmeempfindlichen Objektes erfolgt die erste Zündung des Entladungsrohres (stärkerer Stromstoß) und dann auch die optische Einstellung (Strom der Vergrößerungsspulen und der Kondenserspule). Weiter kann so auf einfache Weise die Vergrößerung der beiden Abbildungsstufen mittels Meßleuchtschirmen am Ort des Zwischenbildes und des endgültigen Bildes und damit die Gesamtvergrößerung festgestellt werden. Bequem ist auch die Verschiebbarkeit des Objektes zum Ausgleich der Verbiegung der optischen Achse durch das Erdfeld (exzentrische Lage des Zwischenbildes auf dem Schirm) und zur Trennung von Objekt und Leuchtschirmstruktur auf dem Zwischenbildschirm. Auch die Ausmessung des Zwischenbildes auf dem Meßschirm wird erleichtert, ebenso die zentrische Bestrahlung des Objektes. Durch Vergleich des Abbildungsstromes von Folien verschiedener Dicke ist die Bestimmung des häufigsten Geschwindigkeitsverlustes in diesen Objekten möglich. Durch Beobachtung der Ausbreitung des Strahles hinter einer Objektblende mit und ohne Folie bei nicht eingeschalteter Optik kann die zerstreue Wirkung der Folie quantitativ bestimmt werden.

Tubus (vgl. Fig. 1). Hinter beiden Vergrößerungslinsen sitzt je ein Tubusrohr, durch dessen Länge bei den gegebenen Kleinstbrennweiten der magnetischen Linsen die maximal mögliche Vergrößerung der einzelnen Stufen festgelegt ist. Die Tubusrohre besitzen seitlich angesetzte Rohrstützen, deren Anschlußflansche ebenso wie die Endflansche der Einzelteile des EM untereinander gleich sind, so daß mit ebenfalls normalen Überwurfmutter Beobachtungsfenster, Ventile, Vakuumprüfrohren oder andere Einzelheiten, wie Schiffe und Verstellfederungskörper für bewegliche Zwischenbildschirme oder Faraday-Käfige nach Belieben aufgeschraubt werden können. Solche Anschlüsse sind in einigen wenigen Größen normiert, für die auch die Anschlußteile gebaut werden. Wird ein Stutzen nicht gebraucht, so kann er durch einen Blindflansch (flache runde Scheibe) verschlossen werden, der durch die Mutter auf die Dichtung gepreßt wird. Der Zwischenbildtubus erhält zwei bis drei Beobachtungsfenster und ein Prüfrohr.

Der Tubus der zweiten Vergrößerungsstufe erhält bei der vorliegenden Ausführung außerdem noch den Pumpstutzen, an den der Hahn der Hochvakuumpumpe angeschlossen wird. Der Tubus ist mit dem Stütz-

gestell verschraubt, das seinerseits stabil auf dem Experimentiertisch befestigt war.

Die *Pumpe*, zu der am besten die leistungsfähige drei- oder vierstufige Hg-Diffusionspumpe aus Stahl verwandt wird, ist über einen Metallhahn und ein federndes Tombakrohr zur Fernhaltung der Hg-Siedestöße vom EM mit diesem verbunden und für sich gesondert abgestützt. Der lichte Querschnitt des Hahnkübens beträgt überall 40 mm, die sonstige (kurze) Pumpenleitung 50 bis 60 mm, um die Saugleistung groß zu halten. Damit nicht das ganze Luftvolumen der Apparatur bei neuem Auspumpen durch die heiße Hg-Pumpe strömt, hat das Hahnküben außer der Verbindungsstellung mit dem Hochvakuumstutzen und einer Absperrstellung noch eine Vorvakuumstellung, bei der das erste Auspumpen erfolgt. Erst nach Erreichung des Vorvakuum in der Apparatur wird der Hahn auf die Hochvakuumpumpe weitergeschaltet. Der Lufteinlaß in das EM erfolgt am besten durch ein besonderes Ventil an der Apparatur, um keinen Luftstrom vom Pumpenhahn zum EM zu erzeugen, durch den leicht Hg in die Apparatur kommt, was mit Rücksicht auf ruhiges Brennen der Entladung zu vermeiden ist. Dieses Ventil kann in einfachster Form aus einem Blindflansch mit Schaft bestehen, der nach Lockern der Überwurfmutter heruntergedrückt wird, so daß sich der Blindflansch vom Stutzenflansch abhebt.

Aufnahmekammer. Als Abschluß der Apparatur können an den letzten Tubus Kammern für Außen- oder Innenaufnahmen angesetzt werden. Sie lassen sich in drei bis vier Sekunden durch eine einfache Vorrichtung anbringen oder abnehmen. Die Außenaufnahmekammer (Fig. 5) enthält bei der bisherigen Ausführung vier Leuchtschirme, die durch konische Schliffe wahlweise in die gleiche Ebene des Strahlenganges gebracht werden können. Vorhanden sind zwei runde 10 cm große Metalleuchtschirme mit erhöhtem Rande, von denen einer eine in den Boden gravierte Millimeterteilung trägt. Die Zentimeterstriche werden alle 5 mm angeköhnt, da Unterschiede in der Strichstärke beim Selbstleuchten der Striche schlecht herauskommen. Als dritter und vierter Schirm können

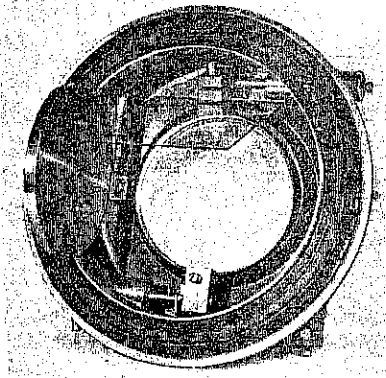


Fig. 5. Außenaufnahmekammer.

rechteckige Glasleuchtschirme ($10 \times 11 \text{ cm}^2$), einer mit Leuchtmaterial und einer metallbestäubt¹⁾, angebracht werden. Statt dessen können jedoch auch weitere Metallschirme als Ersatz oder mit anderem Leuchtmaterial zu Vergleichszwecken eingesetzt werden²⁾. Um empfindliche Schirme zu erhalten, wird die Leuchtsubstanz ohne Bindemittel als Alkoholaufschwemmung auf die Schirme gegossen. Das empfindlichste Material war ein blauleuchtendes Zinksulfid mit sehr feinem Korn²⁾. Für dieses Leuchtmaterial zeigte sich wegen ihrer großen Blauempfindlichkeit die Isochromplatte am geeignetsten. Aufgenommen wurde von der Seite des einfallenden Strahles über einen im Vakuum befindlichen Oberflächenspiegel durch einen der seitlichen Beobachtungsflansche mit Schneider-Xenar 1:3,5 in $\frac{7}{8}$ natürlicher Größe. Den zur Außenaufnahme von unten

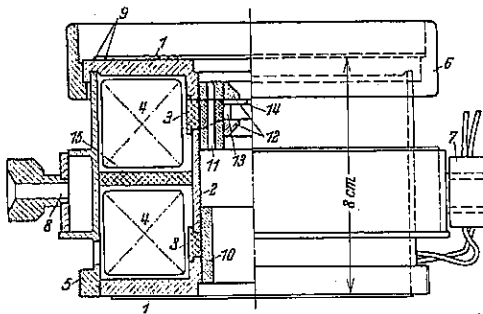


Fig. 6. Schnitt durch die Objektivspule (Doppelobjektiv).

(Glasleuchtschirme) durchsichtigen Boden der Kassette bildet zum Schutze gegen Röntgenstrahlen eine Blei-glasplatte.

Spulen (Fig. 6 bis 9). Ein leistungsfähiges magnetisches Mikroskop braucht zu den meisten Untersuchungen drei Spulen: die Kondensorenspule zur Sammlung des beleuchtenden Strahles auf das zu untersuchende Objekt, die eigentliche Objektivspule, und die das Zwischenbild mit ebenfalls kleiner Brennweite nochmals vergrößernde Projektionsspule. Nur in ganz extremen Fällen wird man noch eine zweite Projektionsspule anordnen, d. h. mit zwei Zwischenbildern arbeiten. Es zeigt sich, daß die Anforderungen an alle Linsen im wesentlichen dieselben sind, so daß für alle drei Verwendungsarten einheitliche Konstruktionen entwickelt werden konnten.

In einer vorhergehenden Arbeit³⁾ wurde an einer ersten Ausführung (Fig. 6 und 7) das optische Verhalten geprüft und nach den dort gewonnenen Ergebnissen eine verbesserte Spule gebaut (Fig. 9). Die *technische Ausbildung der Spulen*⁴⁾ ist aus der Schnittzeichnung Fig. 6 ersichtlich. Der eine Hauptteil

¹⁾ M. Knoll u. E. Ruska, Ann. d. Phys. 12, 607, 1932. — ²⁾ Dieses Material stellte mir Prof. Dr. A. Schleede, Leipzig, dankenswerterweise zur Verfügung. — ³⁾ Vgl. Ann. 2, S. 581. — ⁴⁾ Bei der konstruktiven Durchbildung der Spule verdanke ich den Herren Dr.-Ing. B. v. Borries und Dr. Ing. M. Freundlich wertvolle Ratschläge.

der Spulenkapselung besteht aus den beiden Abschlußtellern (1) aus Eisen und dem sie verbindenden eisernen Innenrohr (2). An den beiden Anschlußtellern sind Messingringe (3) dazwischen gesetzt, die vakuumdicht mit den Eisenteilen verlötet sind. Nach Aufbringen der Wicklung (4) wird der Außenmantel (5) zusammen mit der Überwurfmutter (6) über den kleineren Tellerflansch geschoben und mit dem Kernteil verschraubt. Die Überwurfmutter dient der Verschraubung mit dem Nachbarteil, bei der Objektivspule beispielsweise mit dem Objektstisch. Die mit Isolierschlauch überzogenen Enden der Wicklungen werden nachträglich durch Öffnungen im Außenmantel an eine Anschlußklemme (7) herausgeführt, die auf der Wasserkühlung (8) des Mantels befestigt ist. Eine solche Wasserkühlung der Spule ist zweckmäßig, um die Änderung des eingestellten Spulenstroms und damit der Brennweite der Spule klein zu halten. Da eine Wasserkühlung auch für das Entladerohr und die Quecksilberpumpe benutzt wird, bedeutet die Spulenkühlung kaum einen Mehraufwand. Alle Kühlstellen sind hintereinander geschaltet. Mit (9) sind die Dichtungsriefen auf den Anschlußflanschen bezeichnet.

Das ganze Innenrohr der Spule ist mit einem durchgehenden Gewinde versehen. Soll ein Spalt nicht als Linse wirken, so wird er durch ein Kurzschlußstück (10) (Hohlzylinder aus Eisen mit Außengewinde) überbrückt. Die offenen Spalte, die als Vergrößerungslinsen wirken sollen, erhalten noch eine „innere Optik“ aus ringförmigen eisernen Polschuhen. Um das Auspumpen nicht zu erschweren, wird erst ein Zwischenstück mit mehreren im Kreis angeordneten axialen Lüftungsbohrungen eingeschraubt. Dieser „Polschuhträger“ (11) besteht entsprechend dem Innenrohr der Spulenkapselung aus drei miteinander fest verbundenen ringförmigen Teilen [vgl. im folgenden Fig. 8¹⁾], zwei äußeren Eisenteilen und dem inneren Messing-

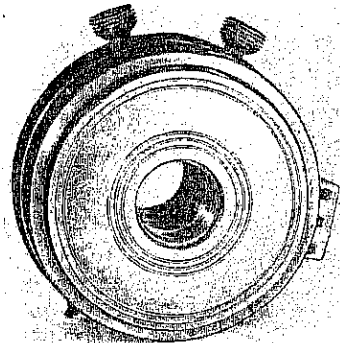


Fig. 7. Ansicht des magnetischen Doppelobjektivs.

¹⁾ Der in Fig. 8 u. a. gezeigte Polschuh mit *rechteckigen* Durchlaß dient dazu, um zusammen mit dem *runden* Spulengehäuse eine Zylinderlinse zu erzeugen. Versuche mit Blenden und Kathodenabbildung ergaben sehr gute optische Eigenschaften dieser Zylinderlinse. Solche Linsen erweisen sich für manche Spezialaufgaben der Kathodenstrahlzillographie und der Tonaufzeichnung als zweckmäßig.

teil und trägt ein ebenfalls durchgehendes Außengewinde und Innengewinde. Erst in das innere Feingewinde werden die eigentlichen Polschuhe (12) eingeschraubt unter Zwischenlegung von Abstandsstücken (13) und Blenden (14) aus Messing. Durch die letzteren werden bei starken Öffnungsfehlern der Polschuhe die Randstrahlen in verschieden hohem Maße ausgeblendet. Bewährt hat sich als Material für die Polschuhe bisher schwedisches Holzkohleneisen.

Die Polschuhe der Projektionsspule sind auf der einen Seite eben, auf der anderen Seite von der Bohrung aus trichterförmig mit einem Gesamtöffnungswinkel von 90° erweitert. Die Abrundung am lichten Durchmesser hat im Querschnitt einen Radius von 1 mm. Auf der Vorderseite des ersten Polschuhes liegt der Zwischenbildschirm in Form einer runden Blende mit zentralem Loch, die genau in das Polschuhgewinde paßt. Zum Zwecke der Messung der Vergrößerung der Projektionsstufe kann noch unmittelbar hinter dem ersten Polschuh eine zentrierte Lochblende von bekanntem und gegenüber dem Schirmloch von kleinerem Lochdurchmesser eingelegt werden.

Die Objektivspule erhält, um das Feld möglichst nahe an das Objekt zu bringen, besser unsymmetrische Polschuhe, deren engster Durchmesser nach dem Objektisch zu verlegt ist (vgl. Fig. 8). Der erste Polschuh ist so weit nach der Objektkammer zu gelegen, daß das Objektkarussell unter Vakuum, d. h. bei zusammengedrückter Dichtung, zwischen Objektivspule und Objektkammer gerade noch ohne metallische Reibung gedreht werden kann.

Bei Verwendung der Spule als Kondensorlinse kann die innere Optik (Polschuhring und Polschuh) fehlen, zweckmäßig ist lediglich eine relativ weite Mittelpunktblende geringer Luftdrosselung, die als Anodenabschluß oben schon beschrieben wurde.

Bei der ersten Spulenausführung (Fig. 6 und 7) wurden aus mehreren Gründen sowohl zwei Spalte wie zwei Wicklungen vorgesehen. *Erstens* ist man so in der Wahl der Lage der Linse relativ zu den anschließenden Bauteilen des EM freier, es kann entweder der eine oder der andere Spalt magnetisch kurz geschlossen werden. Solange die, die Wicklungen trennende, in zwei Hälften abnehmbare Zwischenwand (15) nicht aus permeablem Material besteht, ist es in erster Annäherung gleichgültig, ob man die eine, die andere oder beide Wicklungen zur Erzeugung des magnetischen Spannungsabfalles am offenen Spalt vom Strom durchfließen läßt.

Doppelobjektiv. *Zweitens* wird durch Ersetzen der trennenden Messingscheibe (15) durch eine Scheibe aus Eisen oder sonst einem permeablen

Material aus der Einfachlinse ein Doppelobjektiv, das praktisch den Revolver des normalen Mikroskops ersetzt. Wir haben dann zwei unabhängig voneinander steuerbare Einzellinsen in gegenseitigem festen Abstand. Durch verschiedene Verteilung der Gesamtbrechkraft (Stromdurchflutung) auf die beiden Einzelspulen kann die Lage der Hauptebenen innerhalb des ganzen Bereiches zwischen den beiden Spalten verschoben werden, so daß von einem kurz vor dem ersten Spalt liegenden Objekt in gegebener Entfernung von der Gesamtpule ein mehr oder weniger stark vergrößertes Bild und auch ein kleineres oder größeres Gesichtsfeld sichtbar wird. Es kann also hier, wie durch den Trieb beim Mikroskop, die Objektivlinse dem Objekt mehr oder weniger genähert werden, wobei indessen gleichzeitig die Brennweite diesem veränderten Abstand angepaßt wird. Die dadurch mögliche feste axiale Lage des Objektes in der Apparatur ist besonders deshalb angenehm, weil man zur Auswechslung der Objekte unter Vakuum in vielen Fällen eine Objektverschiebung quer zum Strahl einrichten wird. Eine doppelte Verschiebung quer und längs zum Strahl ist aber unter Vakuum

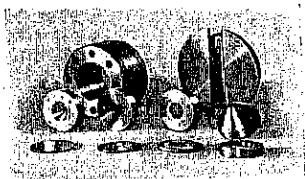


Fig. 8. Innere Optik der Spulen.

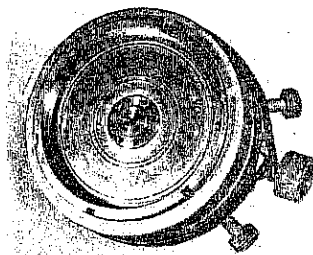


Fig. 9. Zweite Ausführung der magnetischen Objektivspule.

konstruktiv schwierig durchzuführen. Schließlich kann auch noch durch den ersten Spalt schon vor dem zweiten ein Bild erzeugt werden, das durch den zweiten Spalt bereits weiter vergrößert wird, womit sich eine höhere Gesamtvergrößerung ergibt.

Bei der zweiten Ausführung (Fig. 9) wurde der Einfachheit halber auf den zweiten Spalt und die Trennscheibe verzichtet. Zwei in den ungeteilten Wicklungsraum zusammen (bifilar) aufgebrachte Wicklungen können parallel (Vergrößerungsspulen) oder hintereinander (Kondensorspulen) geschaltet werden. Verbessert ist die Querschnittsgestaltung, die Herausführung der Drahtenden und die Wasserkühlung. Weiter ist ein Stutzen mit ins Spulenninnere führender Bohrung vorgesehen, um bei Verwendung als Kondensorlinse ein Lufteinlaßventil anbringen zu können.

Bezüglich Dimensionierung der Spulen und der optisch interessierenden Gesetzmäßigkeiten vgl. die angezogene Arbeit.

3. Notwendigkeiten und Möglichkeiten der Verbesserung.

Das EM ist heute das einzige Forschungsinstrument, durch das auch noch von den feinsten Einzelheiten der Materie geometrisch getreue Bilder erhalten werden können, da die die geometrische Optik begrenzenden Beugungserscheinungen bei allen in Frage kommenden Elektronengeschwindigkeiten praktisch noch nicht in Erscheinung treten. Der Gewinn, der sich für die Forschung hieraus ergibt, ist so groß, daß die Aufwendung außergewöhnlicher Mittel für die noch notwendige Entwicklungsarbeit, wie auch für die einzelne Apparatur gerechtfertigt erscheint. Nach dem heutigen Stande ist die Apparatur besonders noch in den folgenden Richtungen verbesserungsbedürftig:

Das Entladungsrohr muß zu einer Strahlenquelle extremer Spannungs- und Stromkonstanz weiter entwickelt werden. Dabei ist Wert zu legen auf möglichst punktförmigen Strahlansatz bei relativ hohem Betriebsstrom und gutem Richtstrahlvermögen. Der Wert eines so beschaffenen Rohres für die Elektronenmikroskopie kann nicht genug betont werden, da einerseits mindestens die Hälfte der Schwierigkeit bei der photographischen Aufnahme stärkster Vergrößerung vom unruhigen Brennen herrührt und da sich andererseits die kontrastreichsten Bilder bei der Bestrahlung des Objektes mit möglichst wenig divergenten Strahlen ergeben. Ob als Strahlungsquelle das Gasentladungsrohr seine augenblickliche ausgezeichnete Stellung immer beibehalten wird, ist noch ungewiß. Die durch die Gasentladung gegebene Koppelung von Strom und Spannung ist lästig. Bequemer wäre eine optisch gleichwertige Glühkathodenröhre desselben Strom-Spannungsbereichs.

Die Konstruktion der Objektkammer, sowie die Einbringung der Objekte wird immer große Sorgfalt verlangen. Mechanische Präzisionsarbeit und intensivste Objektkühlung sind die Hauptforderungen. Eine eigene gut wirkende Wasserkühlung des Objektträgers wäre wünschenswert. Zur laufenden Untersuchung, insbesondere organischer Objekte, wird man zu den ebenfalls vom Kathodenstrahloszillographen her bekannten Einschleusverfahren greifen.

Pumpenanschluß. Um die geringen miteingeschleusten Luftmengen sowie kleine Gasausbrüche im Entladungsrohr möglichst unschädlich zu machen, empfiehlt es sich, die Pumpe an die Objektkammer anzuschließen.

Konstruktiv ist dann noch peinlicher auf die Vermeidung der Schwingungsübertragung zu achten. Bei der bisher getroffenen Anordnung des Pumpenanschlusses bewirkt die mehrfache Drosselung des Luftquerschnittes auf dem Wege von Entladungsrohr zur Abschlußkassette und Pumpe durch die beiden inneren magnetischen Optiken einen so beträchtlichen Druckabfall, daß das Entladungsrohr bei jedem Gasausbruch 2 bis 5 Sekunden dauernde Stromstöße aufnimmt, während der die optische Einstellung verloren geht. Weiter haben auch schon sehr geringe Undichtigkeiten, die an aus so viel Teilen zusammengesetzten Metallapparaturen nicht leicht zu vermeiden sind, selbst bei leistungsfähigen Pumpen ein zu schlechtes Vakuum im Entladungsrohr zur Folge.

Die *Einführung der Innenphotographie* wird sich für die Aufnahme sehr starker Vergrößerungen nicht ungehen lassen, da durch die dann möglichen Belichtungszeiten von Bruchteilen der Sekunde eine Unruhe des Elektronenbildes nicht mehr als Unschärfe im photographischen Bilde sich auswirkt. Der konstruktiven Durchbildung ist hier wie anderen Problemen der Elektronenstrahlmikroskopie durch entsprechende Entwicklungsarbeiten am Kathodenstrahlzillographen weitgehend vorgearbeitet (Plattenschleuse, Barometerrohr und Schlitz Einführung¹⁾). Durch Anwendung der Innenphotographie kann indessen die minimal zulässige Bildintensität praktisch auch nur soweit verringert werden, daß auf der für das Auge empfindlichsten Leuchtsubstanz die Bildhelligkeit noch zur Scharfeinstellung des Elektronenbildes genügt. Eine Blindeinstellung mit nachfolgender entsprechend längerer Belichtungszeit dürfte schwierig sein. Man kann erst die Projektionsspule auf die Zwischenbildschirmebene einstellen, wobei man zur genügenden Beleuchtung mit dem Objektiv das Kathodenbild auf der Bohrung des Zwischenbildschirms erzeugt. Hierzu bringt man am Rande der Bohrung ein kleines Stück zerstreuernde Folie an und bildet diese ab, damit die sonst viel zu wenig tiefenscharfe Einstellung genügend genau wird. Erst dann stellt man durch Objektivstromsteigerung das Objektbild auf dem Zwischenbildschirm ein und nimmt das (kaum sichtbare) endgültige Bild auf. Während dieser Zeit müssen natürlich die Spannungen und die einmal eingestellten Ströme völlig konstant bleiben. Dies ist auch Bedingung, wenn auf ein Blindobjekt mit sehr hohem Strahlstrom eingestellt wird, während das Untersuchungsobjekt erst nach erheblicher Verringerung der Strahlintensität vorgeklappt wird. Hierbei ist auch noch völlige Gleichheit der beiden Objektebenen Voraussetzung.

¹⁾ P. Hochhäusler, Elektrot. ZS. 50, 860, 1929.

B. Leistung des magnetischen EM.

1. Auflösung, Apertur und Intensität.

Beim gewöhnlichen Mikroskop ist die Auflösung der Bildfeinheiten durch das Auflösungsvermögen des Objektivs gegeben. Bei den gegebenen, relativ großen Wellenlängen des sichtbaren Lichtes ist man, um das Auflösungsvermögen zu steigern, zur äußersten Vergrößerung der Apertur gezwungen, die wiederum durch die Korrektionsmöglichkeiten begrenzt ist. Qualitativ liegen diese Verhältnisse auch beim EM vor. Wegen der größenordnungsmäßig kleineren Wellenlänge der Elektronen spielt aber bei den bis heute erreichten Vergrößerungen die Apertur noch keine entscheidende Rolle. Sie kann daher so klein gehalten werden, wie es die gewünschte Fehlerfreiheit des Magnetfeldes erfordert. Lediglich die zulässige Intensität der Objektdurchstrahlung begrenzt hier die Aperturverringern. Bei einer 10^4 -fachen Vergrößerung ist das Verhältnis der Strahlungsdichte im Objekt zu der im Bild schon 10^8 , selbst wenn die ganze vom Objekt kommende Strahlung zum Bild gelangt. Bei den geringen Aperturen, die bis heute zur Vermeidung störender Öffnungsfehler der noch mäßig korrigierten magnetischen Linsen angewandt werden (etwa 1:10), gelangt aber nur ein Bruchteil der Beleuchtungsintensität zum endgültigen Bild. Dieser Wert ist abhängig von der Intensitätsverteilung hinter dem Objekt über die Streurichtungen. Selbst bei Verwendung der empfindlichsten Leuchtmaterialien bzw. Emulsionen ist also eine ganz erheblich intensive Objektdurchstrahlung notwendig, die ein nicht sehr gut gekühltes Objekt zerstört.

2. Verteilung der Gesamtvergrößerung.

Die Verteilung der Gesamtvergrößerung auf die (zwei) Einzelstufen, die beim Lichtmikroskop etwa 5:1 (z. B. Objektiv 100 zu Okular 20) beträgt, erfolgt beim EM besser gleichmäßig, da diese Verteilung bei gegebener Apparatlänge zu den stärksten Vergrößerungen führt. Eine geringe Abweichung hiervon ergibt sich dadurch, daß die ausnutzbaren Brennweiten bei beiden Stufen nicht gleich groß sind. Die ausnutzbare Brennweite fällt bei der Projektionsstufe mit der kleinsten Brennweite, die optisch eingestellt werden kann, zusammen. Diese ist eine Funktion der Polschuhform, insbesondere des Polschuhdurchmessers und bei gleicher Polschuhform noch eine Funktion der Strahlspannung¹⁾. Der Gegenstand liegt bei kleinen Polschuhdurchmessern meist schon innerhalb der Polschuhe. Während das Objekt der zweiten Stufe (Zwischenbild) leicht in

¹⁾ Vgl. Anm. 2, S. 581.

die Polschuhe verlegt werden kann, ist dies bei der ersten Stufe nicht möglich, mindestens dann nicht, wenn ein quer zur optischen Achse beweglicher Objektträger Verwendung finden soll, bei dem nicht auch noch eine axiale Verstellmöglichkeit vorgesehen ist. Da also aus konstruktiven Gründen die kleinste Objektivbrennweite doch nicht ausgenutzt werden kann, ist die erste Vergrößerung noch etwas schwächer als die Projektionsvergrößerung bei sogar ein wenig größerer Strahlänge. Die günstigsten Einzelvergrößerungen β_1 und β_2 , sowie die entsprechenden Teillängen l_1 und l_2 ergeben sich für maximale Endvergrößerung $\beta = \beta_1 \cdot \beta_2$ bei den ausnutzbaren Brennweiten von Objektiv- und Projektionsspule f_1 und f_2 und der Gesamtstrahlänge von Objekt zum Bild $l = l_1 + l_2$ zu

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= \frac{l - (f_1 + f_2)}{2f_1}, & \beta_2 &= \frac{l - (f_1 + f_2)}{2f_2}, \\ l_1 &= \frac{l + f_1 - f_2}{2}, & l_2 &= \frac{l - f_1 + f_2}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

3. Bildeinstellung.

Die optische Einstellung erfolgt zweckmäßig zunächst auf das Blindobjekt und so, daß bei stromloser Kondenserspule (geringe Objektbeleuchtung) mit der Objektivspule das Zwischenbild des Objekts auf dem vor dem ersten Projektionspolschuh liegenden Leuchtschirm entworfen wird (Grobeinstellung). Nur ein kleiner Ausschnitt dieses Bildes gelangt durch die zentrale Öffnung im Zwischenbildschirm hindurch und damit zur zweiten Vergrößerung. Der durch diese Bohrung bestimmte Teilstrahl hat zwischen Lochschirm und Projektionslinse wegen der gegen die Strahlänge kleinen Öffnungen von Objektiv und Zwischenbildblende praktisch konstanten und bekannten Durchmesser¹⁾. Man stellt nun den Projektionsspulenstrom einfach so ein, daß der Bildbegrenzungskreis am größten wird. Damit ist automatisch auch die kleinste Brennweite dieser Stufe eingestellt. Durch Ausmessung auf dem Meßschirm wird die Vergrößerung der Projektionsstufe festgestellt. Die Brennebene fällt dann im allgemeinen nicht mit dem Zwischenbildschirm zusammen, so daß die Gesamteinstellung noch nicht scharf ist. Nach Vorklappen des Untersuchungsobjektes und vorsichtiger Steigerung der Beleuchtung durch Erregung der Kondenserspule erfolgt die Scharfeinstellung durch Feinregulierung des Objektivspulenstroms, wodurch das Zwischenbild genau in die vorher eingestellte Brennebene

¹⁾ Während beim Objektiv zur Ausblendung eine Mittelpunktblende vorhanden sein muß, genügt es aus diesem Grunde bei der Projektionslinse, die Öffnung des Zwischenbildschirms entsprechend klein zu machen (etwa $\frac{1}{3}$ des Polschuhdurchmessers).

der Projektionsspule verlegt wird, d. h. also meist etwas hinter den Zwischenbildschirm. Diese Feinregulierung kann durch einen zweiten zur Spule parallelen Widerstand erfolgen und ist nur bei dem Objektiv notwendig. Beobachtet wird dabei das Endbild; das Bild auf der Zwischenbildblende ist dann im allgemeinen unscharf. Die Ausmessung des Zwischenbildes ergibt die erste Teilvergrößerung.

Die Bildeinstellung ist vom Grad der Beleuchtung (Kondensorspule) unabhängig; dagegen ist die erreichbare Bildschärfe, sowie der Kontrastreichtum wesentlich von der Art der Objektbeleuchtung abhängig. Am günstigsten ist, wie wir weiter unten sehen werden, die Objektdurchstrahlung mit möglichst wenig divergent einfallenden Strahlen. Daher ist die Bildschärfe leider gerade bei maximaler Beleuchtung (Kathodenbild auf Objekt) nicht groß, wegen der dann großen Apertur der einfallenden Strahlung. Besser ist infolgedessen die Beleuchtung bei etwas größerer Brennweite der Kondensorspule. Aus dem gleichen Grund wird man mit entsprechend größerem Strahlstrom das Objekt beleuchten. Ferner ist es deshalb nicht gleichgültig, welcher Teil des Kathodenbildes auf das Objekt fällt. In unserem Falle der kalten Kathode scheint die Beleuchtung mit dem Krater- rand vorteilhafter als mit dem intensiveren Kraterzentrum. Dieselbe Erscheinung ist für die Forderung nach möglichst guter Richtstrahlung in der Entladungsröhre verantwortlich.

Bei der Bildeinstellung macht sich die Verbiegung der optischen Achse durch das Erdfeld unangenehm bemerkbar. Da eine Orientierung der Mikroskopachse in Richtung des Erdfeldes konstruktiv und beim Arbeiten mit der Apparatur Nachteile hat, bleibt die Kompensationsspule als Gegenmittel. Sie braucht praktisch kein homogenes Feld (Helmholtzsche Doppelspule) zu erzeugen, so daß auch eine einfache längliche Spule in größerer, nicht störender Entfernung, mit ihrer Wicklungsebene parallel zur Mikroskopachse aufgestellt, genügt. Der Strahlquerschnitt, dessen optische Sauberkeit erhalten bleiben muß, ist ja bis zum Zwischenbild, bis zu dem auch die Richtungskorrektion hauptsächlich erwünscht ist, noch nicht sehr groß. Man kann indessen, mindestens bei nicht zu langer Apparatur ($< 1,5$ m) und beim Arbeiten mit höheren Spannungen (> 40 kV) auch ganz auf die Spule verzichten und die Strahlage einfach durch einen Stahlmagneten von Hand kompensieren. Man benutzt dieses Mittel doch schon zur Ablenkung des Zwischenbildes über der Bohrung, um andere Teile des Objektes im Endbild zu beobachten. Insofern ist auch Eisen als Material für die Mikroskopröhre zur Abschirmung des Erdfeldes nicht zu empfehlen.

4. Objektstärke und Strahlspannung

müssen aufeinander abgestimmt sein. Ein wesentlicher Geschwindigkeitsverlust darf im Objekt nicht eintreten, um die ursprünglich homogene Strahlgeschwindigkeit nicht durch ungleich große Verluste zu zerstören. Damit befinden wir uns immer auch im Gebiet relativ kleiner Absorption, was für die Wärmeabfuhr vom Objekt günstig ist. Dickere Objekte verlangen schnellere Strahlung, um so schnellere, je größer ihr spezifisches Gewicht ist. Für 60 kV ist etwa 1μ Al das obere Grenzgebiet. Besser ist es, die Objektstärken möglichst gering zu wählen, soweit dies mit Rücksicht auf deren Wärmeempfindlichkeit zulässig ist. Die Helligkeitsunterschiede der einzelnen Bildpunkte ergeben sich einerseits aus verschieden starker Absorption der einzelnen Objektstellen (Massendicke). Wegen der an sich kleinen Absorption sind Absorptionsunterschiede praktisch von geringem Einfluß auf die Bildkontraste. Dagegen ist bei relativ zur Strahlspannung sehr dünnen Objekten trotz praktisch konstanter durchsetzender Strahlstromdichte die Bildhelligkeit deswegen stark verschieden, weil die einzelnen Objektstellen mit entsprechend ihrer Massendicke verschiedener Apertur (Intensitätsverteilung auf die Streuwinkel) strahlen, so daß bei genügend kleinen Spulenöffnungen verschieden große Ströme von den Objektpunkten auszugehen scheinen bzw. in das Bild gelangen. Man könnte im Grenzfall von Absorptions- und Diffusionsbildern sprechen, doch überwiegt in ihrer Wirkung meist die Diffusionserscheinung. Wegen der großen Bedeutung dieser Erscheinung für das Zustandekommen der Bildkontraste hängt der Kontrastreichtum der Bilder so wesentlich von der Apertur der einfallenden Objektstrahlung (Brennweite der Kondensorenspule) ab.

5. Ergebnisse und Aussichten.

Die folgenden Aufnahmen (in $\frac{7}{10}$ nat. Größe) sollen die erheblich gesteigerte optische Leistungsfähigkeit der neuen Apparatur zeigen, ohne näheres Eingehen auf die Frage der Bilddeutung. Die Bilder durchstrahlter Objekte im EM wird man ebenso „lesen“ lernen müssen, wie die Emissionsbilder von Kathoden. Da die vorliegende Arbeit das EM selbst weiter entwickeln und die erreichte Güte der Linsen feststellen sollte, waren die Objekte in erster Linie in der Richtung von Interesse, ob sie genügend kleine Einzelheiten aufwiesen. Solche können bei Folien kleinste Löcher und Risse sein, die meist erst durch die Wärmewirkung der Bestrahlung entstehen. Noch besser und eindeutiger kann die Linsengüte aus der Abbildung von Kanten geschlossen werden. Dazu soll aber die Kante in Richtung der optischen Achse eine möglichst geringe Ausdehnung besitzen, um Bildstörungen infolge von

Reflexionserscheinungen an den Kanten herabzusetzen. Auch hier bewähren sich daher dünne Folien¹⁾. Zu beachten ist dabei natürlich, daß die im Gesichtsfeld liegende Kantenstrecke möglichst in einer Ebene liegt.

Erscheint eine solche Kante im ganzen Bildfeld scharf gegen die (helle) Umgebung begrenzt, so hat die Linse innerhalb des beaufschlagten Gebietes keine Öffnungsfehler und zeigt auch innerhalb des sichtbaren Gegenstandsfeldes keine astigmatischen oder sonstigen Erscheinungen. Gleichmäßige Unschärfe deutet auf Öffnungsfehler, Schärfe in der Mitte bei Randunschärfe auf Astigmatismus usw. Erst eine einwandfrei abgebildete Kante gibt uns das Recht, auch andere Bildeinzelheiten, die dasselbe optische System innerhalb des gleichen Bildfeldes zeigt, als getreue Abbildung zu werten.

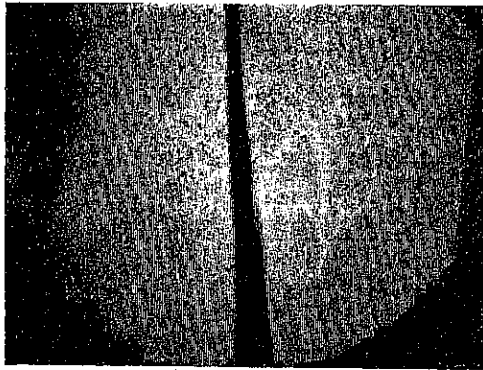


Fig. 10. Baumwollgespinnst, verkohlt, Vergrößerung 8000 fach.

Aus der Zone z des Übergangs von dunkel zu hell an einer abgebildeten Kante wurde die noch aufgelöste Strecke Δl bestimmt nach

$$\Delta l = \frac{2z}{\beta}, \quad (2)$$

wobei β die gemessene Gesamtvergrößerung ist. In Fig. 10 (Strahlspannung 75000 Volt) beträgt $z = 0,02$ cm, also

$$\Delta l = \frac{2 \cdot 0,02}{8000} = 5 \times 10^{-6} \text{ cm}^2),$$

d. i. fast das Zehnfache des maximalen Auflösungsvermögens des Lichtmikroskops. An seiner dünnsten sichtbaren Stelle ist der Faden $3 \cdot 10^{-5}$ cm

¹⁾ B. v. Borries u. E. Ruska, ZS. f. Phys. 83, 187, 1933. — ²⁾ Praktisch wird man auch noch zwei Punkte im Abstand z/β als getrennt wahrnehmen, so daß sich eine doppelt so hohe Auflösung ergibt.

stark, er wäre im Lichtmikroskop gerade unterhalb der Grenze der Sichtbarkeit. Eine „numerische Apertur“ A_n der verwandten Objektivlinse kann gemäß

$$A_n = \frac{\lambda}{\Delta l} \quad (3)$$

bei

$$\lambda = \sqrt{\frac{150}{U}} \cdot 10^{-8} \text{ cm} \quad (U = \text{Strahlspannung in Volt}) \quad (4)$$

zu

$$A_n = \frac{0,45 \cdot 10^{-9} \text{ cm}}{0,5 \cdot 10^{-5} \text{ cm}} \approx 10^{-4}$$

berechnet werden, wie ersichtlich, ein gegenüber dem geometrischen Öffnungsverhältnis von etwa 1:12 ($f_{\text{Obj.}} = 0,6 \text{ cm}$; $d_{\text{Obj.}} = 0,05 \text{ cm}$) sehr kleiner Wert.

Die Verringerung von Öffnungsfehlern durch systematische Untersuchungen von Polschuhformen und Polschuhmaterial ist beim augenblicklichen Stand die dringendste Forderung als einer der Wege zur Steigerung der Bildschärfe. In den Testaufnahmen dieser Arbeit werden erst Intervalle aufgelöst, welche noch um drei Größenordnungen über denen liegen, die dem theoretischen Auflösungsvermögen entsprechen. Es ist unwahrscheinlich, daß für dieses geringe Auflösungsvermögen allein Öffnungsfehler der Spulen verantwortlich sind. Die ausgedehnten Randübergänge können unter Umständen tatsächlich durch die Objekte vorgegeben sein und durch eine rasche Diffusionsabnahme in unmittelbarer Nähe des Randes erklärt werden. Darauf deutet jedenfalls der Umstand, daß Bilder dünnerer Objektstellen bei geringeren Kontrasten randschärfer waren. Entsprechende Untersuchungen müssen daher mit extrem dünnen Objektfolien vorgenommen werden. Rasche periodische Schwankungen von Strahlspannung und Spulenströmen können natürlich ebenfalls zu Bildunschärfen führen. Dies gilt bei den starken Vergrößerungen auch dann, wenn die Schwankungen sehr gering sind. Bei den Aufnahmen betrug die Beruhigungskapazität parallel zur Spannungsquelle (Zweiweggleichrichtung) und Entladerohr 80000 cm bei Röhrenströmen von etwa 1 mA. Die Spulen wurden aus Akkumulatoren gespeist. Eine weitere Quelle der Bildunschärfe könnte noch in den oben erwähnten mechanischen Apparatuschwankungen (Siedestöße der Hg-Pumpe, Wasserkühlung des Entladungsrohres und der Spulen) liegen. Auch hier genügen wegen der starken Vergrößerungen sehr geringe Amplituden. Prüfversuche sprachen indessen gegen diese letzte Möglichkeit.

Die angezogene Fig. 10 zeigt eine durch Verkohlung (Erhitzung durch den Strahl bei Abwesenheit von Luftsauerstoff) äußerst dünn



Fig. 11. Baumwollgespinnst, verkohlt, Vergrößerung 5000fach.

gewordene Baumwollfaser von der ursprünglichen Stärke $5\ \mu$. Durch die Verkohlung solcher feinen Fasern (es wurden noch Kunst- und Acetat-



Fig. 12. $0,8\ \mu$ Al-Folie, Vergrößerung 7800fach.

seide untersucht) konnten die zur Demonstration des erreichten Auflösungsvermögens geeignetsten Objekte erhalten werden¹⁾. Die fortschreitende Verkohlung wurde im Zwischenbild (Vergrößerung 55fach) beobachtet und entsprechend die Bestrahlungsintensität durch Röhrenstrom und Kondenserspule geregelt. Fig. 11 zeigt eine andere Stelle des gleichen Baumwollfadens; Fig. 12 eine Aluminiumfolie, die durch die starke Bestrahlung im Laufe von etwa 1 bis 2 Stunden erheblich zerstört worden war. Noch stärker (etwa 12000fach) vergrößerte Elek-

tronenbilder geben die Fig. 13a und 13b (Baumwollfasern) und Fig. 14a und 14b (Goldfolien) wieder. Sämtliche Leuchtschirmbilder wurden in $\frac{7}{8}$ der natürlichen Größe aufgenommen.

¹⁾ Auf die Eignung derartiger Präparate wurde ich von Prof. Dr. K. Hess (Kaiser Wilhelm-Institut für Chemie, Berlin-Dahlem) hingewiesen. Ihm und Herrn Dr. Drogus danke ich auch für die Überlassung der Versuchsproben.

Zusammenfassend läßt sich zum Problem stärkster elektronenoptischer Vergrößerungen nach den bisherigen Erfahrungen folgendes sagen: Wird der Kathodenkrater eines Gasentladungsrohres selbst bei nur 2 Milliamp.



Fig. 13 a und b. Baumwollgespinnst, verkohlt, Vergrößerung 12100 fach.



Fig. 14 a. 0,5 μ Au-Folie,
Vergrößerung 11400 fach.

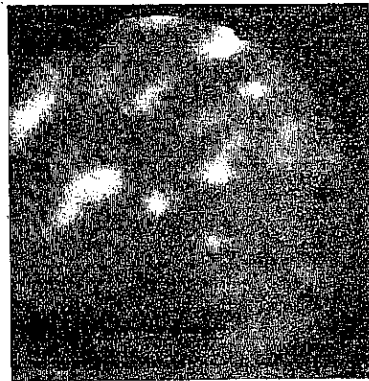


Fig. 14 b. 0,5 μ Au-Folie,
Vergrößerung 12200 fach.

Strahlstrom durch eine Sammeloptik in natürlicher Größe auf eine offene Objektblende abgebildet, so ist das Leuchtschirmbild bei den heute empfindlichsten Materialien noch bis zu Vergrößerungen von ungefähr 50000 noch eben beobachtbar bzw. aufnehmbar.

Stärker begrenzt scheint die erreichbare Vergrößerung durch die maximale Energiedichte, die die verschiedenen Arten von Objekten selbst bei intensivster Kühlung eben noch schadlos aushalten. Hier dürften bei Metallfolien allenfalls noch Werte von 80000 bis 40000 zu erreichen sein, jedoch bei selbst relativ wärmeunempfindlichen *organischen* Objekten höchstens 8000 bis 10000¹⁾.

Die *Bildschärfe* muß durch verschiedene Maßnahmen so weit gesteigert werden, daß bei Vergrößerungen von 50000 die Bildunschärfen unterhalb $\frac{1}{10}$ mm bleiben. Damit ergäben sich Auflösungsvermögen von $4 \cdot 10^{-7}$ cm, das sind Abmessungen, die von den Dimensionen der Kristallgitter nicht mehr allzuweit entfernt sind. Eine optische Weitervorgrößerung der aufgenommenen entsprechend geringer vergrößerten Elektronenbilder kann natürlich die Intensitätsschwierigkeit mildern, sie ist jedoch nur sinnvoll bei außerordentlich *scharfen* Ausgangsbildern.

Die vorliegende Arbeit wurde unterstützt von der Gesellschaft der Freunde der Technischen Hochschule Berlin und von der Notgemeinschaft der Deutschen Wissenschaft. Hierfür möchte ich beiden Stellen meinen besten Dank aussprechen. Herrn Prof. A. Matthias danke ich für die Ermöglichung und Unterstützung der Arbeit, Herrn Dr.-Ing. M. Freundlich bin ich für vielfache experimentelle Hilfe zu Dank verpflichtet.

¹⁾ Zur besseren Sichtbarmachung solcher Objekte — man denke etwa an Nervenfibrillen mit ihrer äußerst feinen Struktur — wird man u. U. dem Problem angepaßte „Färbungs“-Methoden, z. B. Imprägnierung mit Metallsalzen (Versilberung) entwickeln müssen, ähnlich wie solche in der üblichen histologischen Technik auch schon beim normalen Mikroskopieren gebräuchlich sind.