

Die Berücksichtigung der Strukturviskosität brachte Aufklärung in starke Streuungen und Unstetigkeiten bei der Aufnahme der Beziehung zwischen Schichtdicke, Filmgeschwindigkeit und Viskosität der Emulsion. Besonders ausgeprägt sind die Streuungen bei hohen Laufgeschwindigkeiten der Unterlage und bei Emulsionen, deren Viskosität durch Zusätze hochmolekularer Polyacrylverbindungen eingestellt war. Anstelle einer konstanten Viskosität wird nunmehr mit befriedigendem Ergebnis mit Formel (16) gearbeitet. Der Vergleich verschiedener Verdickungsmittel wird veröffentlicht werden.

Zusammenfassung

Die Auswertung von Versuchen über das maschinelle Vergießen von photographischen Emulsionen als Grundlage der Schichtdicke-Regelung zeigte derartige Streuungen, daß sich eindeutige Beziehungen nicht gewinnen ließen. Es wurde darum mit Erfolg die Struktur-Viskosität der Emulsionen in einer Berechnung der Beziehungen berücksichtigt.

Herrn Dipl.-Phys. Kamke, Marburg, sind wir für freundliche Literaturhinweise zu Dank verpflichtet.

Aus der Abteilung für Elektronenoptik der Siemens & Halske AG Berlin

Über neue magnetische Durchstrahlungs-Elektronenmikroskope im Strahlspannungsbereich von 40... 220 kV

Teil I

Von E. Ruska (Berlin)

Mit 12 Abbildungen

(Eingegangen am 15. Dezember 1949)

Wenngleich dieser Aufsatz die heutigen technischen Möglichkeiten auf dem Gebiete der Elektronenmikroskopie, speziell für Deutschland, behandelt, haben wir ihn in der Kolloid-Zeitschrift aufgenommen, da das Elektronenmikroskop zu einem der wichtigsten Werkzeuge in der Hand des Kolloidforschers geworden ist.

Inhaltsangabe:

Übersicht über die Herstellung von Elektronenmikroskopen.

Über verschiedene Richtungen bei der Entwicklung von Elektronenmikroskopen.

Strahlengang und Dimensionierung neuer Geräte für 100 und 220 kV.

Konstruktive Ausführung der neuen 100 kV-Geräte von S. & H.

Übersicht über die Herstellung von Elektronenmikroskopen

Im Jahre 1931¹⁾ wurden die ersten mittels Elektronenlinsen vergrößerten Bilder durchstrahlter Objekte aufgenommen. Schon 1933²⁾ konnten Aufnahmen erzielt werden, in denen das Auflösungsvermögen des Lichtmikroskops erreicht bzw. überschritten wurde. Das damals entwickelte magnetische Gerät mit Kondensor³⁾ und besonderen Polschuhsystemen in den Vergrößerungslinsen⁴⁾ wurde

bei Siemens & Halske seit 1937 nach technischen Gesichtspunkten weiterentwickelt und seit Ende 1939 als serienmäßiges Gerät geliefert⁵⁾. Das damals erzielte Auflösungsvermögen von 10 $m\mu$ konnte bis 1944 auf 2 $m\mu$ verbessert werden⁶⁾. Während die Grundlagen der Elektronenoptik und Elektronenmikroskopie überwiegend in Deutschland geschaffen wurden, wo auch die ersten Übermikroskope mit elektrostatischen Linsen entstanden⁷⁾, haben in den seit der Lieferung der ersten Seriengeräte vergangenen 10 Jahren auch verschiedene ausländische Entwicklungsstellen den Bau von Elektronenmikroskopen aufgenommen und durch wertvolle Arbeiten gefördert. Außerhalb Deutschlands werden heute elektromagnetische Geräte in den USA (Radio Corporation of America), England (Metropolitan-Vickers und Plessey Company), Schweden (Schönander)

¹⁾ M. Knoll und E. Ruska, Ann. Phys. 12, 607—640 und 641—661 (1932).

²⁾ E. Ruska, Z. Phys. 87, 580—602 (1934); Forschg. u. Fortschr. 10, 8 (1934).

³⁾ M. Knoll und E. Ruska, Z. Phys. 78, 318 bis 339 (1932).

⁴⁾ B. v. Borries und E. Ruska, DRP 680 284, angem.: 17.3.32, erteilt: 3.8.39.

⁵⁾ B. v. Borries und E. Ruska, Wiss. Veröff. Siemens W. 17, 99—106 (1938); Z. wiss. Mikr. 56, 317—333 (1939); Naturwiss. 27, 577—582 (1939); Siemens-Z. 20, 217—227 (1940).

⁶⁾ E. Ruska, Kolloid-Z. 107, 2—16 (1944).

⁷⁾ H. Mahl, Jahrb. AEG-Forschg. 7, 43—54 (1940), (Sonderheft Übermikroskop); H. Börsch, Jahrb. AEG-Forschg. 7, 34—42 (1940), (Sonderheft Übermikroskop).

und Holland (Philips) sowie in den UdSSR (Siemens-Gerät) und elektrostatische Geräte in der Schweiz (Trüb-Täuber), in Frankreich (Compagnie Générale de T. S. F.) sowie in den USA (Farrand Optical Company of New York) gebaut. In Tabelle 1 sind die wesentlichen Angaben über die handelsüblichen Durchstrahlungs-Elektronenmikroskope zusammengestellt.

Von den bis 1944/5 in Deutschland von Siemens & Halske aufgestellten rund 40 magnetischen Elektronenmikroskopen wurden nach Kriegsende etwa 30, darunter alle in Berlin befindlichen Geräte, in andere Länder überführt und die in Berlin gelegene Entwicklungs- und Fertigungsstelle demontiert. Es konnten daher zunächst nur konstruktive Arbeiten wieder aufgenommen werden, bei denen wir bestrebt waren, die an den älteren Geräten gesammelten praktischen Erfahrungen auszuwerten. Wegen der Zeitverhältnisse konnten verschiedene schon vor Jahren entstandene Ideen erst jetzt bei lieferfähigen Geräten verwirklicht werden. In Anbetracht der besonders großen Schwierigkeiten und Hemmnisse, die sich dem Wiederaufbau in Berlin entgegenstellten, möchte der Verfasser seinen Mitarbeitern dafür danken, daß sie trotz mannigfaltiger zeitbedingter Entbehrungen unentwegt ihre ganze Kraft zur Bewältigung der gemeinsamen Aufgabe eingesetzt haben.

Über verschiedene Richtungen bei der Entwicklung von Elektronenmikroskopen

Die heute von zahlreichen wissenschaftlichen und technischen Forschungsstätten betriebene Entwicklung von Durchstrahlungs-Elektronenmikroskopen hat zu einer großen Mannigfaltigkeit von Mikroskopkonstruktionen geführt. Dies erklärt sich einerseits aus den verschiedenen beim Entwurf gestellten Anforderungen an die optischen und betrieblichen Leistungen, andererseits daraus, daß sich verschiedene physikalische und konstruktive Wege zur Erfüllung der gestellten Anforderungen darbieten. Nicht zuletzt ergeben sich auch dadurch verschiedene Lösungen, daß den einzelnen Entwicklungsstellen voneinander abweichende technische und wirtschaftliche Möglichkeiten zur Verfügung stehen, mit denen sie ein günstiges Kompromiß zwischen Fertigungsaufwand und Betriebsleistung der Geräte finden müssen und durch welche die spätere Überwachung und Instandhaltung der Geräte gewährleistet werden kann.

Der Wert eines Elektronenmikroskops für die Erforschung von Feinstrukturen hängt in erster Linie von seinen optischen Qualitäten ab, welche den Grad des Aufschlusses über eine untersuchte Struktur und den Bereich der untersuchbaren Strukturen bestimmen. Ein Gerät mit einem möglichst hohen Auflösungsvermögen und einem entsprechend hohen Vergrößerungsbereich sowie einer in weitem Umfang veränderlichen Elektronenbeschleunigungsspannung, von der die Durchstrahlung und Erwärmung des Objekts und der Kontrast bei der Darstellung der Objekteinheiten abhängt, wird besonders aufschlußreiche Ergebnisse in einem vielseitigen Arbeitsbereich ermöglichen, da mit ihm auch noch dickere Objektschichten bei hoher Auflösung untersucht werden können, ohne daß sie sich unzulässig erwärmen.

Der Arbeitsbereich des Elektronenmikroskops wird nicht nur durch die eben genannten Faktoren bestimmt, welche die Qualität des einzelnen Mikrogramms beeinflussen, sondern hängt auch noch von der Art und Zahl der mit dem Gerät durchführbaren optischen Untersuchungsverfahren ab. Genannt sei hier die Möglichkeit, außer den normalen Mikrogrammen im Hell- und Dunkelbild auch stereoskopische⁸⁾ und Beugungs-Aufnahmen⁹⁾ zu erhalten oder die Objekte in einem größeren Temperaturbereich zu untersuchen. Auf gute betriebliche Eigenschaften wird man bei Geräten, deren Bau wegen ihrer hohen optischen Qualitäten ohnehin einen erheblichen Aufwand erfordert, ebenfalls besonderen Wert legen. Zu nennen sind hier in erster Linie zuverlässiges und rasches Arbeiten bei bequemer und einfacher Bedienung und Wartung.

Bei manchen Untersuchungen kann man mit geringerer Auflösung auskommen. So gehen z. B. in der Metallographie durch die bisher entwickelte präparative Technik der Oberflächennachbildung die äußersten Feinheiten der Originalobjekte ohnehin verloren. Für solche Arbeitsgebiete sind mit Rücksicht auf die Anschaffungskosten einfachere Geräte geringerer optischer Leistung erwünscht. Auch für derartige Geräte ist jedoch mit Rücksicht auf gute Aufhellung dickerer Abdruckfilme eine möglichst hohe Betriebsspannung wünschenswert. Hier lassen sich Fortschritte durch Ausbildung mag-

⁸⁾ M. v. Ardenne, Naturwiss. 28, 248—252 (1940).

⁹⁾ E. Ruska, Wiss. Veröffentl. Siemens-W. (Werkstoff-Sonderheft), 1940, 372—379.

netostatischer Linsen¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾ oder durch das schon früh angegebene Prinzip der kombinierten elektronen-lichtoptischen Vergrößerung¹³⁾ erreichen.

Einige besondere optische oder betriebliche Anforderungen lassen sich nur durch Spezialkonstruktionen erfüllen, wie z. B. die Untersuchung dickerer Objekte mit sehr (z. B. über 200 kV) schnellen Elektronen¹⁴⁾⁻¹⁷⁾, die stereoskopische Beobachtung¹⁸⁾⁻²⁰⁾ die kinematographische Verfolgung von Objektveränderungen²¹⁾ oder etwa die Untersuchung von flüssigen Objekten unter Luftdruck. Bei solchen Geräten spielt die Frage des Aufwands eine weniger wichtige Rolle.

Bei der Wiederaufnahme unserer Entwicklungsarbeiten nach Kriegsende wurde von Anfang an die Entwicklung mehrerer Mikroskoptypen entsprechend den obigen Überlegungen begonnen. Da von den früher gebauten optisch leistungsfähigen und universellen Mikroskopen für 100 kV Strahlspannung nur noch vereinzelte Geräte in Deutschland verblieben waren, und wir auf diesem Gebiet über besonders umfangreiche Erfahrungen verfügten, entschieden wir uns dafür, an erster Stelle ein universelles 100 kV-Gerät als Nachfolger des bis Kriegsende gebauten Typs zu entwickeln. Die optische und elektrische Dimensionierung dieses Geräts wurde so getroffen, daß es sich bei Ersatz des Elektronenstrahlrohrs durch ein solches mit zwei Beschleunigungsstufen und durch einen entsprechend dimensionierten Hochspannungs- und Röntgenstrahlenschutz auch mit einer 220 kV-Anlage betreiben läßt. Ferner wurde unter teilweiser Verwendung gleicher Baueinheiten ein Gerät für 60 kV Strahlspannung entwickelt, das bei nur wenig verminderter optischer Leistung

die Vielseitigkeit und die günstigen betrieblichen Eigenschaften des 100 kV-Geräts aufweist. Alle Geräte erhielten magnetische Linsen, da die Entwicklung im In- und Ausland bisher bestätigt hat, daß das magnetische Prinzip in optischer und betriebstechnischer Hinsicht sowie in seiner konstruktiven Durchbildbarkeit für einige Sonderaufgaben besonders geeignet ist. Das 60 kV-Gerät erhielt neben der elektromagnetischen Ausführung des Linsensatzes auch eine magnetostatische, für welche eine besondere Linsenstromquelle und Regelstromkreise entfallen. Die bisher von uns bevorzugte senkrechte Aufstellung der Mikroskopröhre haben wir beibehalten, da hierbei die Ausrichtung der Teilabschnitte der Mikroskopröhre, insbesondere auch eine mechanische Justierung des Bestrahlungsteils zum Abbildungsteil, am einfachsten ausgebildet werden kann und die Handierungen beim Mikroskopieren und bei der Reinigung des Geräts besonders bequem vorgenommen werden können.

Strahlengang und Dimensionierung neuer Geräte für 100 und 220 kV

Optische und betriebliche Anforderungen

Die bei geeigneten Objekten und unter Berücksichtigung des kleinstmöglichen Öffnungsfehlers drehsymmetrischer Magnetfelder theoretisch erzielbare elektronenmikroskopische Bildauflösung beträgt weniger als $1\text{m}\mu=10^{-6}\text{ mm}^{22)}$. Praktisch wurden mit den früheren Siemensgeräten bei sorgfältigem Arbeiten mit geeigneten Objekten etwa $2\text{m}\mu$ erreicht. Die förderliche Vergrößerung, die zum bequemen Erkennen der nur geringe Kontraste enthaltenden Objekteinzelheiten von $1\dots 2\text{m}\mu$ Größe notwendig ist, beträgt mindestens $300\,000:1$ bzw. $150\,000:1$. Photographische Platten hoher Empfindlichkeit für schnelle Elektronen darf man nur etwa vierfach nachvergrößern, wenn man mit Sicherheit vermeiden will, daß die statistischen Kornanhäufungen auf der Platte im vergrößerten Bild Objekteinzelheiten vortäuschen, die im Elektronenbild nicht vorhanden sind²³⁾. Daraus ergibt sich, daß die maximale elektronenoptische Vergrößerung in einem für den Auflösungsbereich von $1\dots 2\text{m}\mu$ dimensionierten Gerät etwa $80\,000$ bis $40\,000:1$ betragen muß.

¹⁰⁾ B. v. Borries, E. Ruska, J. Krumm und H. O. Müller, Naturwiss. 28, 350—351 (1940).

¹¹⁾ E. Kinder und A. Pendzich, Jahrb. AEG-Forschg. 7, 23—26 (1940), (Sonderheft Übermikroskop).

¹²⁾ B. v. Borries, Kolloid-Z. 114, 3, 165 (1949).

¹³⁾ M. Knoll und E. Ruska, vgl. ³⁾.

¹⁴⁾ H. O. Müller und E. Ruska, Kolloid-Z. 95, 21—25 (1941).

¹⁵⁾ M. v. Ardenne, Z. Phys. 117, 657—688 (1942).

¹⁶⁾ V. K. Zworykin, J. Hillier und A. W. Vance, J. Appl. Phys. 12, 738—742 (1941).

¹⁷⁾ A. C. van Dorsten, W. J. Oosterkamp und J. B. Le Poole, Philips Techn. Rdsch. 9, 193—202 (1947).

¹⁸⁾ E. Kinder, Naturwiss. 33, 367 (1946).

¹⁹⁾ G. Möllenstedt und F. Heise, Optik 5, 531—533 (1949).

²⁰⁾ R. Rühle, Optik 5, 534—548 (1949).

²¹⁾ M. v. Ardenne, Z. Phys. 120, 397—412 (1943).

²²⁾ W. Glaser, Acta Physica Austriaca 3, 38 bis 51 (1949); u. Oesterr. Ing. Archiv. 3, 39—46 (1949).

²³⁾ B. v. Borries, Optik 3, 321—377 u. 389 bis 412 (1948).

Die Bedienung des neuen Mikroskops sollte einfacher und bequemer als bei dem älteren Gerät gestaltet und es sollte die Sicherheit der Objektverschiebung und der elektrischen Einstellung von Objektbeleuchtung und Bildschärfe erhöht werden. Der Übergang zu anderen Vergrößerungsstufen und zu Beugungsaufnahmen sowie die Aufnahme von stereoskopischen Teilbildern und von Bildreihen sollte ohne Unterbrechung des Vakuums leicht möglich sein. Schließlich bestand auch der Wunsch nach einer konstruktiven Durchbildung, die durch einfache zusätzliche Teile auch die Aufnahme von Objektreaktionen und von Veränderungen der Objekte bei hohen Temperaturen sowie von Schrägbestrahlungsaufnahmen elektronenundurchlässiger Objekte ermöglichen sollte.

Unterteilung in Abbildungsstufen

Wenn man die aufgestellte Vergrößerungsforderung bei 100 kV Strahlspannung mit einer Konstruktion verwirklichen will, bei der die Mikroskopröhre noch eine für die Bedienung bequeme Länge behält, und bei der das Objektivpolschuhsystem nicht so kleine Abmessungen erhält, daß die Einbringung und Bewegung des Objekts wesentlich erschwert wird, ist es notwendig, von der bei den älteren Konstruktionen vorherrschenden zweistufigen auf eine dreistufige Vergrößerung überzugehen. Bei gleichbleibender Endvergrößerung kann dann selbst bei kleinerer Gesamtlänge aller Abbildungsstufen mit größerer Brennweite der Elektronenlinsen gearbeitet werden. Die größeren Brennweiten lassen einerseits eine Verminderung von Durchflutung und Leistungsaufnahme der Spulen und andererseits weitere Polschuhsysteme zu. Der letztere Umstand erleichtert die Einbringung und Bewegung des Objekts im Objektivpolschuhsystem und ermöglicht es, einen genügend großen Strahlenkegel für Beugungsaufnahmen in den Projekten freizuhalten²⁴⁾.

Bei der Festlegung der Länge der einzelnen Abbildungsstufen beginnt man mit der Endstufe. Ihre Länge ergibt sich aus der gewünschten Endbildgröße und dem Bildwinkel, innerhalb dessen noch keine merkliche Verzeichnung eintritt. Mit Rücksicht auf das gewählte Plattenformat von 6,5·9 cm² sollte ein Endbildschirm von 10 cm Durchmesser verwendet werden. Nach den Erfahrungen mit unseren früheren Projek-

tivsystemen war bei einem vollen Bildkegel von 1:4 bei maximaler Linse nbrechkraft praktisch keine Verzeichnung mehr zu beobachten. Mit Polschuhen von 1 mm lichtem Durchmesser ließen sich Brennweiten von 1 mm bei 100 kV bequem erreichen. Bei der mit 360 mm festgelegten Bildweite der Projektivstufe ergibt sich also in letzter Stufe eine 360fache maximale Vergrößerung. Um die Gesamtvergrößerung auf mindestens 10⁶ steigern zu können, mußte das von den beiden ersten Vergrößerungsstufen gelieferte Zwischenbild einen Abbildungsmaßstab von etwa 300:1 aufweisen. Da aus weiteren zu erörternden Gründen die Vergrößerungsregelung durch Auswechseln von Polschuhsystemen im Endprojektiv vorgenommen wurde, konnte auf eine Regelung des Abbildungsmaßstabs bei den beiden ersten Stufen verzichtet werden²⁵⁾. Die Abmessungen des Objektivsystems wurden von unseren erprobten früheren Objektiven²⁶⁾ übernommen. Der freie Durchmesser der Zwischenlinsenpolschuhe sollte so festgelegt werden, daß die am Objekt abgebeugten Strahlen durch die Zwischenlinse erst bei einem vollen Kegel von 7° begrenzt werden, wie er bei 100 kV Strahlspannung für die meisten Beugungsuntersuchungen ausreicht. Die kürzeste Abbildungslänge für eine gegebene Endvergrößerung und Stufenzahl ergibt sich bei gleichen Längen der einzelnen Abbildungsstufen, d. h. bei zwei Abbildungsstufen dann, wenn diese halb so lang wie die gesamte Abbildungslänge sind. Da aber das Maximum flach ist und die Brechkraft der zweiten Linse bei Annäherung an das Objektiv wegen des kleiner wählbaren Linsendurchmessers zunimmt, ist es möglich, die Anordnung so zu treffen, daß die erste Stufenlänge nur etwa 1/5 der zweiten beträgt und die Länge der beiden ersten Stufen zusammen etwa 20 cm wird. Die Linsenfelder von Objektiv und Zwischenlinse können dann wegen ihres geringen Abstands leicht durch eine gemeinsame Wicklung erregt werden, wobei sie magnetisch gleichsinnig hintereinander geschaltet sind. Das etwa 300fache Zwischenbild zweiter Stufe wird auf einem Zwischenbildschirm sichtbar gemacht, so daß es zur Vergrößerungsbestimmung ausgemessen werden kann. Das ausgedehnte Zwischenbild erleichtert eine auf wenige Prozent genaue Vergrößerungsbe-

²⁴⁾ E. Ruska, DRPa S 149 234 VIIIc 21 g vom 3. 3. 42.

²⁵⁾ E. Ruska, DRPa S 153 750 VIIIc 21 g vom 15. 1. 43.

²⁶⁾ E. Ruska, Arch. Elektr. 38, 102—130 (1944).

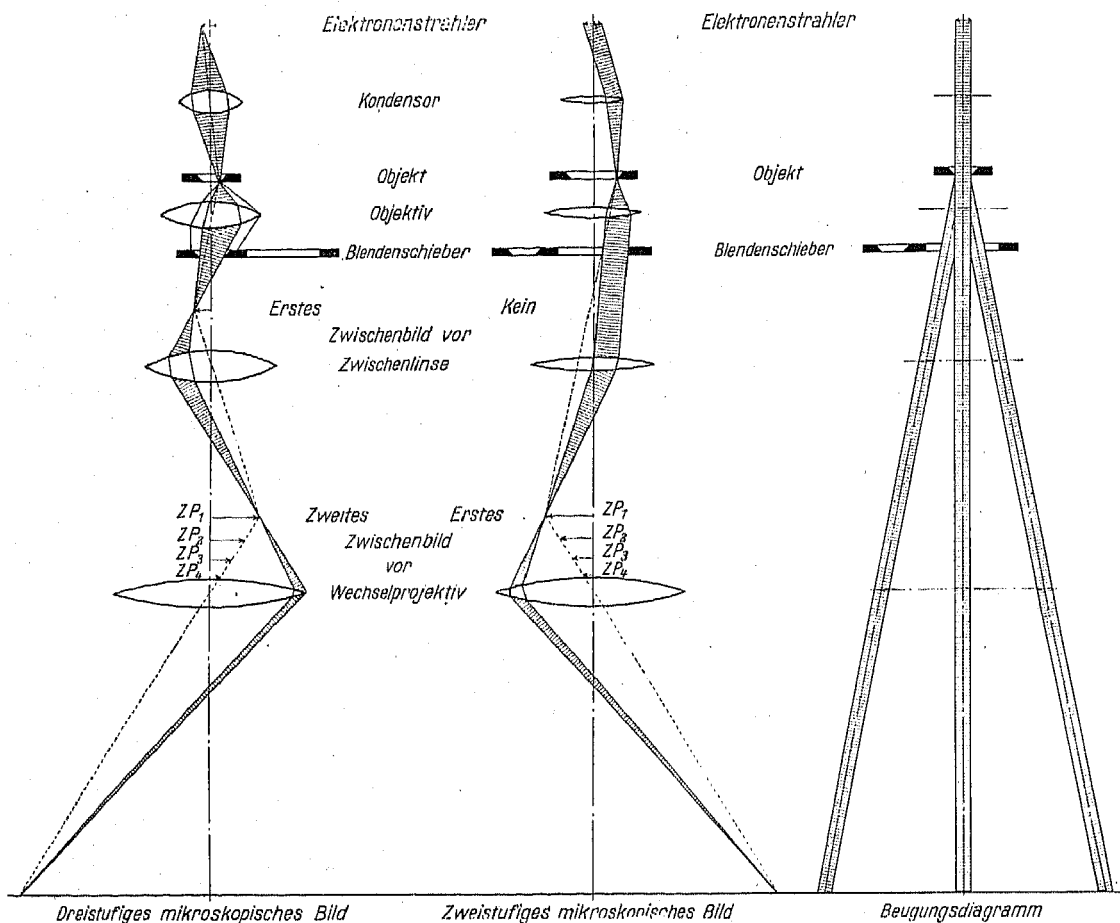


Abb. 1 Strahlengang des 100 kV-Übermikroskops

stimmung, die in vielen Fällen erwünscht ist. Ebenso erleichtert die gleichzeitige Sichtbarkeit des ganzen Objektfelds bei geringer Vergrößerung das Aufsuchen bestimmter Objektbereiche für die hohe Vergrößerung.

Die Spulen wurden für eine Spannung von 64 V dimensioniert, wobei maximal eine Leistung von 250 Watt verbraucht wird, ohne daß die Wicklungen der wassergekühlten Spulen unzulässig erwärmt werden. Die maximale Vergrößerung beträgt beim 100 kV-Gerät 100 000 : 1, beim 220 kV-Gerät 40 000 : 1.

Einstellung verschiedener Vergrößerungen und Aufnahme von Beugungsbildern (Abb. 1)

Die Erfahrungen der mikroskopischen Praxis zeigten, daß es wünschenswert ist, die elektronenoptische Gesamtvergrößerung in weitem Umfang und ohne Betriebsunterbrechung verändern zu können. Bei einem Gerät, das hinter dem Objekt außer den beiden Vergrößerungslinsen, dem Objektiv

und dem Projektiv, kein weiteres Hilfs-linsenfeld enthält, ist dies in einwandfreier Weise nicht möglich. Eine Änderung der Objektivbrennweite in größerem Umfang erfordert einen axial verschiebbaren Objektisch, dessen Konstruktion und Bau schwierig sind, da gleichzeitig hohe Anforderungen an eine stetige und spielfreie Querverschiebung gestellt werden. Überdies nimmt der Öffnungsfehler eines Objektivs mit der Brennweite zu, so daß die Auflösung der schwächer vergrößerten Bilder leidet. Es bleibt also die Projektivregelung, um die Endvergrößerung zu variieren. Hierbei muß man jedoch die Feldform des Projektivs verändern. Eine ausschließliche Verringerung der Feldstärke bei unveränderlicher Polschuh- (bzw. Elektroden-)form ergibt zwar eine größere Brennweite und damit eine kleinere Projektivvergrößerung, doch bewirkt dabei der Öffnungsfehler des Projektivs, daß die weiter von der Achse entfernten Bereiche des Zwischenbilds, die bei kleinerer Projektivvergrößerung auf dem Endbildschirm zur Ab-

bildung gelangen, kissenförmig verzeichnet werden. Wegen der geringen Eintrittsapertur des von jedem Zwischenbildpunkt in das Projektiv eintretenden Strahlenbündels tritt dagegen keinerlei Unschärfe des Endbilds ein.

Wir hätten bereits früher aus diesen Gründen für die älteren zweistufigen Siemensgeräte ein Wechselprojektiv gebaut, das in einem Revolver vier verschieden weite Polschuhsysteme enthielt, die von außen wahlweise in den Strahlengang gedreht werden konnten. Eine solche Anordnung ergibt überdies bei Verwendung eines besonders weiten Polshuheinsatzes die Möglichkeit, Beugungsaufnahmen von dem mikroskopischen Objekt zu machen, ohne dabei, wie es vielfach geschieht, seine Lage im Gerät zu ändern oder eine zweite Aufnahmekamera vor dem Projektiv zu verwenden²⁷⁾.

Bei einem dreistufig vergrößernden Elektronenmikroskop kann man durch elektrische Regelung der Brennweite der mittleren Linse eine kontinuierliche Herabsetzung der Endvergrößerung in weitem Umfang erreichen²⁸⁾. Das von der Zwischenlinse mit variabler Brennweite entworfene Bild ist innerhalb des kleinen Bereichs, der vom Projektiv weitervergrößert wird, wegen des zugehörigen geringen Bildwinkels verzeichnungsfrei. Das Projektiv arbeitet nur in der Nähe seiner Minimalbrennweite, so daß in dieser Stufe ebenfalls keine Verzeichnung eintritt. Man kann bei dieser Anordnung noch einen zweiten geringeren Vergrößerungsbereich erhalten, wenn man Objektiv und Zwischenlinse nur so schwach erregt, daß kein reelles Bild vor der Zwischenlinse zustandekommt, sondern daß Objektiv und Zwischenlinse zusammen ein nur schwach vergrößertes Zwischenbild vor dem Projektiv erzeugen.

Die beim Philips-Elektronenmikroskop verwirklichte dreistufige Abbildung mit regelbarer Mittellinse hat den Vorteil, daß das Endbild immer sichtbar bleibt. Es ist bei dieser Anordnung auch möglich, vom Objekt in seiner Normallage ein Beugungsbild auf der Endbildkamera zu erzeugen, wenn man durch Brechkraftregelung dieser oder einer weiteren zwischen Objektiv und Regel linse liegenden Zwischenlinse, der „Beugungslinse“, das hinter dem Objektiv entstehende Beugungsbild des Objekts in der

Gegenstandsebene des Endprojektivs abbildet, so daß es durch letzteres stark vergrößert auf dem Endbildschirm erscheint. Dabei ist es möglich, nur die von einem gewünschten Objektausschnitt abgebeugten Strahlen in das Beugungsdiagramm zu bekommen, wenn man in der Bildebene des Objektivs eine Blende anordnet²⁹⁾. Diese Blende begrenzt einerseits bei dreistufiger Abbildung den im Endbild sichtbaren Objektbereich und läßt daher andererseits, wenn die schwach erregte Zwischenlinse in der Beugungsanordnung benutzt wird, nur diejenigen am Objekt gebeugten Strahlen zum Endbildschirm gelangen, die dem vorher abgebildeten Objektbereich entstammen. Bei einer Verkleinerung der Blende verringert sich mit dem Objektbereich zugleich die Apertur und damit die Helligkeit des Beugungsbilds. Dagegen wird die Größe des Beugungsbilds, d. h. der erfaßte Winkelbereich, nur durch die Aperturblende des Objektivs begrenzt. Ein Nachteil dieser kombinierten Mikroskopier- und Beugungsanordnung besteht darin, daß die am Objekt gebeugten Strahlenbündel bis zu ihrem Eintreffen auf dem Endbildschirm hintereinander drei Linsfelder durchlaufen müssen, deren Öffnungsfehler eine Abweichung der Beugungsreflexe von der allein durch den Beugungsvorgang beeinflussten Lage bewirken. Bei der genauen quantitativen Auswertung solcher Beugungsbilder muß daher die Verzeichnung durch die drei Linsfelder berücksichtigt werden. Um die Größe des in der hinteren Brennebene des Objektivs entstehenden Beugungsbilds nicht zu begrenzen, darf der Durchmesser der Aperturblende nicht einige Hundertstel mm betragen, wie es zur Erzielung eines guten Bildkontrasts notwendig ist, sondern man muß Blenden von etwa 10mal größerem Durchmesser verwenden. Falls man die damit verbundene Kontrastminderung nicht in Kauf nehmen will, muß man eine Anordnung wählen, bei der eine enge Aperturblende unter Vakuum in den Strahlengang eingerückt werden kann.

Das neue 100 kV-Gerät von Siemens wurde einerseits mit Rücksicht auf hohe maximale Vergrößerung bei kurzer Rohrlänge dreistufig, andererseits mit Revolverprojektiv ausgebildet, um sowohl die Vergrößerung stufenweise herabsetzen zu kön-

²⁷⁾ E. Ruska, vgl. ⁶⁾; DRPa S 142272 VIIIe 21 g vom 14. 9. 40; DRPa S 154503 VIIIe 21 g vom 6. 3. 43.

²⁸⁾ J. B. Le Poole, Philips Techn. Rdsch. 9, 33–46 (1947); Philips Techn. Rdsch. 9, 180 (1947).

²⁹⁾ H. Börsch, Ann. Phys., 5. Folge, 26, 631 bis 644 (1936); Ann. Phys., 5. Folge, 27, 75–80 (1936).

nen, als auch um für die am Objekt abgebeugten Strahlen einen freien Durchgang zum Endbildschirm zu ermöglichen. Bei Beugungsuntersuchungen werden alle Vergrößerungslinsen hinter dem Objekt ausgeschaltet, so daß die Aufnahmen ohne Kor-

rektur quantitativ auszuwerten sind, da die am Objekt gebeugten Strahlen keine Linsfelder mehr durchlaufen müssen. Der höhere mechanische Aufwand dieser Anordnung bringt indessen außer den bereits besprochenen Vorteilen bei Beugungsaufnahmen noch einige weitere mit sich. Die verschiedenen hoch vergrößerten Endbilder werden durch das Wechselprojektiv kaum gegeneinander verdreht, da bei jeder Vergrößerungsstufe im Projektiv annähernd dieselbe magnetische Erregung zur Abbildung benutzt wird. Bei Regelung der mittleren Vergrößerungsstufe verdreht sich das Endbild dagegen erheblich, falls man die Mittellinse nicht in zwei gemeinsam geregelte, magnetisch gegeneinander geschaltete Teillinsen gleicher Brechkraft auflöst, wobei man diese Doppellinse ein- oder zweistufig vergrößern lassen kann. Ferner ist bei der von uns gewählten Anordnung beim Übergang auf eine andere Vergrößerung nur eine sehr geringe bzw. überhaupt keine Nachregelung der Bildschärfe durch das Objektiv erforderlich. Die Schärfe des Endbildes leidet beim Polschuhwechsel deshalb so wenig, weil die Strahlapertur in der Gegenstandsebene des Wechselprojektivs infolge der relativ hohen zweistufigen Vorvergrößerung schon sehr klein ist. Die Zwischenbildebene läßt sich schon durch geringe Stromänderungen in die nur wenig auseinanderliegenden Gegenstandsebenen der verschiedenen Projektivpolshuhsysteme bringen. Die einzelnen Polshuheinsätze in der Wechseltrommel können aber auch so dimensioniert werden, daß ihre zum Endbild gehörenden Gegenstandsebenen zusammenfallen, und damit die Scharfstellung des Endbildes beim Vergrößerungswechsel praktisch aufrecht erhalten bleibt. Bei Regelung der mittleren Vergrößerungsstufe muß der Ort des ersten Zwischenbildes verschoben und daher das Objektiv stärker nachgeregelt werden.

Konstruktive Ausführung der neuen 100 kV-Geräte von Siemens³⁰⁾

Aufbau des Gesamtgeräts (Abbildung 2—4)

Die Hauptteile des Geräts, wie Mikroskopröhre, Hochvakuumtumppe, elektrische Bedienungstafel und die Hochspannung führenden Teile, sind durch ein gemeinsames

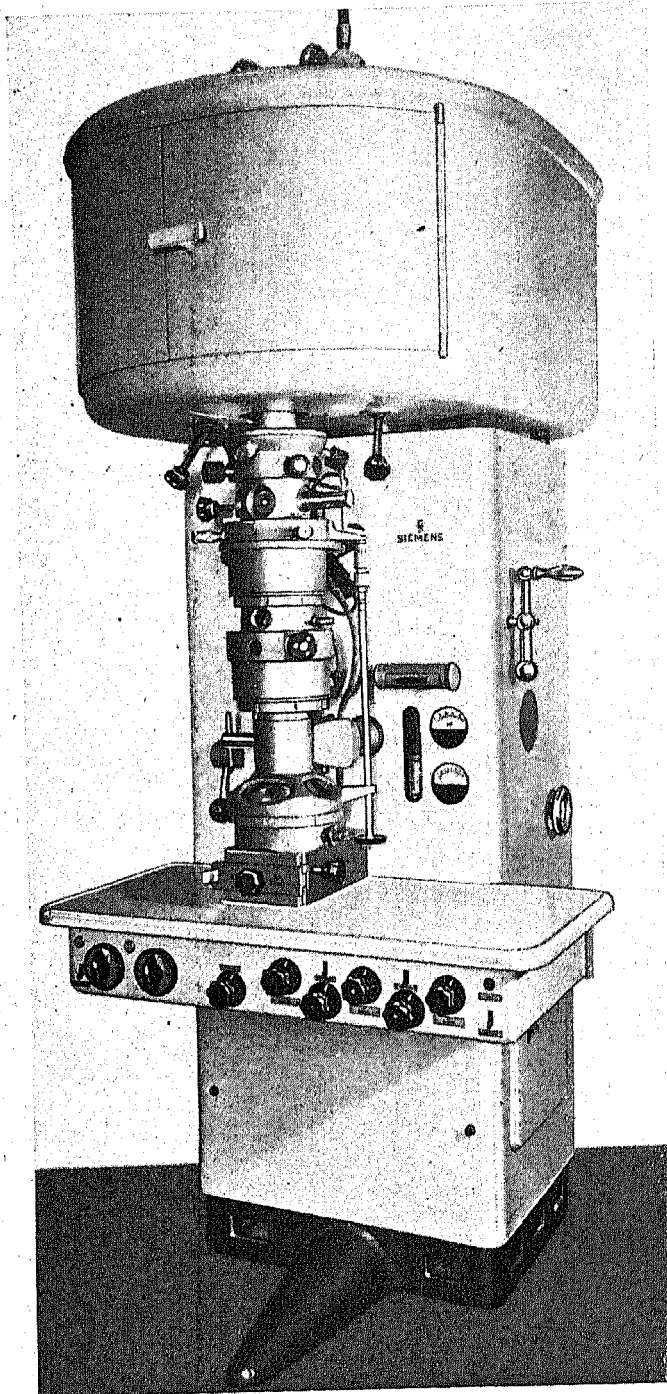


Abb. 2 Vorderansicht des 100 kV-Übermikroskops

³⁰⁾ Die konstruktiven Arbeiten wurden von den Herren A. Asmus, M. Eisfeldt, F. Kolwitz, A. Mohr und W. Schomburg durchgeführt, denen der Verfasser für verständnisvolle Mitarbeit und vielfache Anregungen danken möchte.

Hohlstativ organisch zusammengefaßt, das aus einem Standgehäuse mit Tischanbau und einer Abschirmwanne mit Batteriekasten besteht.

Das Standgehäuse hat ein schrankartiges Aussehen. Seine Rückseite kann durch eine leicht entfernbare Blechabdeckung geöffnet werden. Es enthält die Hochvakuumpumpe, einen Vorvakuumbehälter, die Einrichtung zur Kühlung mit flüssiger Luft und die Anzeigergeräte für das Vakuum, einen Hebel-schalter für die Hochspannung, Meßinstrumente für Strahlstrom und Endbildhelligkeit und eine Vorrichtung zum Abheben und Ausschwenken der oberen Teile der Mikroskopröhre, sowie zwei kleine Schränke für Werkzeug und Zubehörteile.

Auf der Vorderseite des mit einem Fuß versehenen Gehäuses ist ein Tisch angebaut, der die Mikroskopröhre trägt. Diese ist senkrecht und unverkleidet angeordnet und daher von allen Seiten bequem zugänglich. Die Abschnitte der Mikroskopröhre sind unter Zwischenlage von Gummidichtungen durch Überwurfmuttern miteinander verschraubt. Der Tisch ist nach einem Vorschlag von H. Ruska³¹⁾ so dimensioniert, daß dem vor dem Gerät sitzenden Beobachter rechts neben der Mikroskopröhre ein genügender Arbeitsplatz zur Verfügung steht, und zwei weitere Beobachter auf der rechten und linken Tischseite Platz finden. Das Endbild kann von allen drei Beobachtern durch große binokulare Fenster im Projektivtubus betrachtet werden. Die Fenster sind auf der Innenseite leitend gemacht, um ihre Aufladung durch Streuelektronen und damit Deformationen und Unruhe des Endbilds zu verhindern. Infolge hinreichender Dimensionierung der Wandstärken der Mikroskopröhre werden die in der Röhre erzeugten Röntgenstrahlen beim Austritt aus der Röhre so weit geschwächt, daß für den Mikroskopierenden auch bei achtstündiger normaler Arbeit am Gerät die tägliche Toleranzdosis (0,25 Röntgen) nicht erreicht wird. Die elektrischen Schalt- und Regелеlemente sind in einem Kasten unter der Tischplatte vereinigt, der herunterklappbar angeordnet ist, damit sie bei Störungen leichter zugänglich sind. Die Sicherungen sind durch eine Klappe auf der linken Kastenseite leicht auszuwechseln.

Die über dem Gehäuse befindliche Abschirmwanne verhindert, daß die in ihr untergebrachten auf hohem negativen Potential

befindlichen Teile versehentlich berührt werden können. Sie umschließt den Kathodenteil am oberen Ende der Mikroskopröhre und den von einem Stützisolator getragenen abgerundeten Kasten, in dem die Batterie für die Kathodenheizung und die zugehörigen Schalter, Regler und Meßgeräte untergebracht sind. Auf der Vorderseite besitzt die Wanne eine zweiflügelige Tür, um die Kathode und den Rohrisolator herausnehmen zu können. Durch eine Kurbel an der rechten Seite des Gehäuses wird über ein Kegehradgetriebe ein Arm angehoben, der

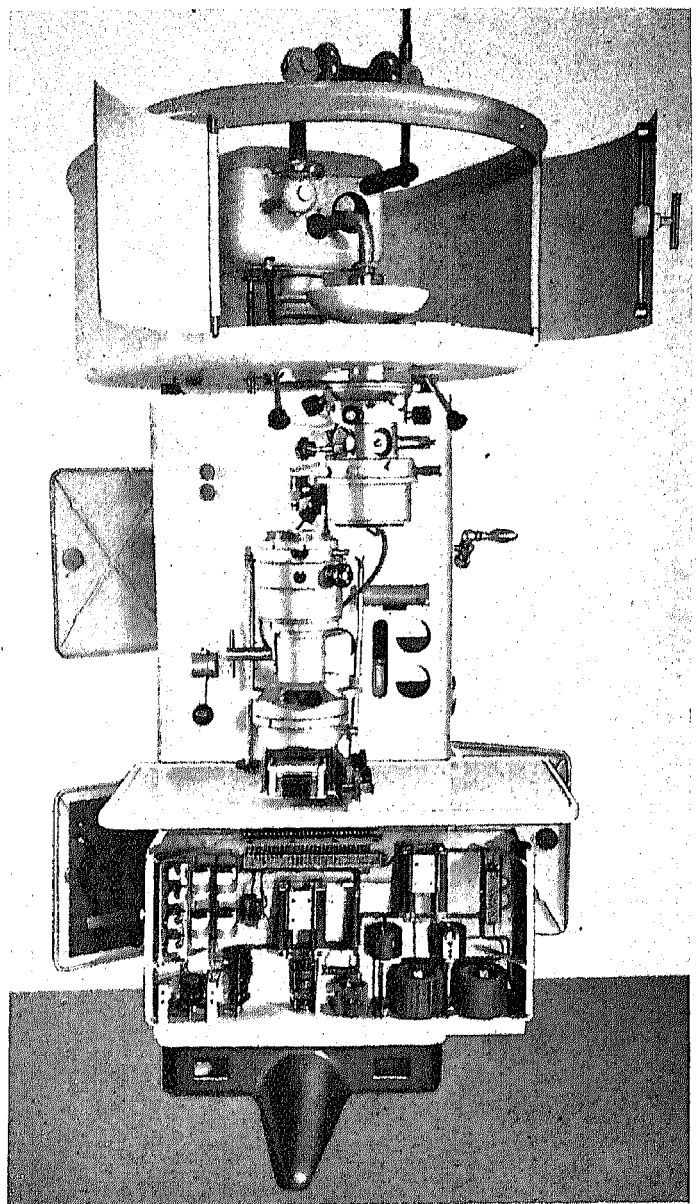


Abb. 3 100 kV-Übermikroskop: Mikroskopröhre ausgeschwenkt, Schaltkasten geöffnet

³¹⁾ H. Ruska, DRPa S 160-408 VIIIc 21 g vom 13. 7. 44.

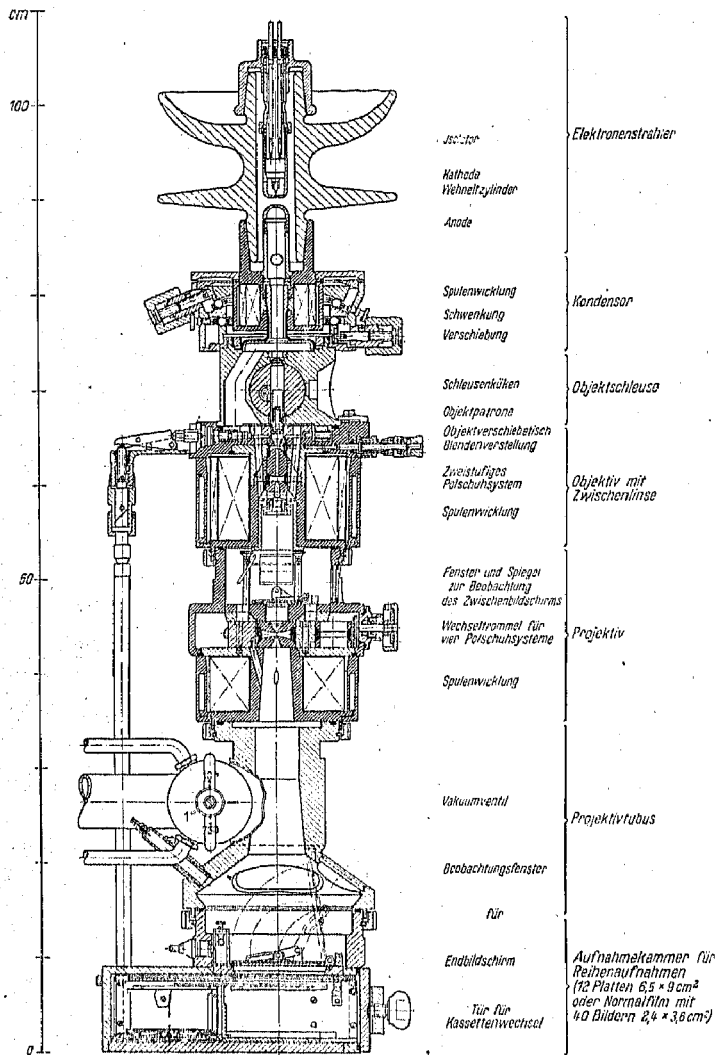


Abb. 4 Querschnitt durch die Mikroskopröhre EM 100 b

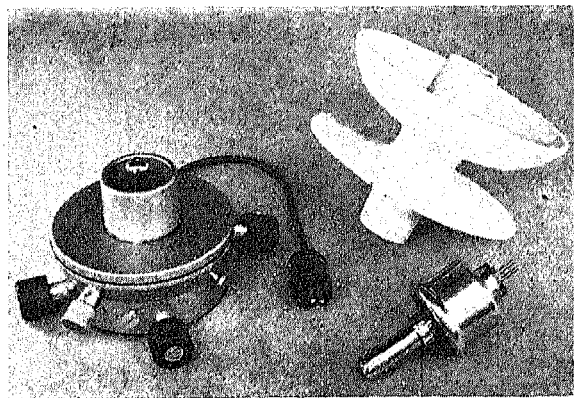


Abb. 5 Elektronenstrahler mit Kondensator

den Oberteil der Mikroskopröhre einschließlich des Objektivs zusammen mit der Abschirmwanne und dem Batteriekasten anhebt und seitlich ausschwenkt. Dadurch wird das Objektiv von unten und das Projektiv von oben zugänglich, so daß Pol-schuhsysteme, Blenden und Leuchtschirme rasch auszuwechseln sind. Ferner können Undichtigkeiten durch Aufkitten einer Abschlußscheibe auf die Reströhre leichter lokalisiert werden.

Elektronenstrahler (Abb. 5)

Der Elektronenstrahler besteht aus dem Kathodenträger, dem Kondensator mit Anodenrohr und einem diese beiden Teile zueinander zentrierenden vakuumdichten Röhrenisolator. Letzterer besteht aus glasiertem Hartporzellan oder Calit und hat die Form eines zur Erhöhung der äußeren Überschlagespannung mit zwei tellerförmigen Querrippen versehenen, etwa 20 cm langen Rohrs von 40 mm lichtem Durchmesser. Um die Luftüberschlagsstrecke genügend lang zu halten, ist der obere Teller konkav ausgebildet. Die beiden Enden des Rohrisolators sind außen mit genau zueinander laufenden konischen Schliften versehen, welche in Verbindung mit entsprechenden Gegen-schliffen am Kathodenträger und Kondensator die genaue koaxiale Ausrichtung von Kathode und Wehnelt-Zylinder mit der Anode bewirken.

Die negative Hochspannungselektrode im Innern des Röhrenisolators besteht aus einem Rohr von etwa 20 mm Durchmesser, das an seinem unteren Ende eine abnehmbare, gut abgerundete, zentral durchbohrte Kappe trägt. Die Wehneltkappe wird auf das Rohr des Kathodenträgers aufgeschoben und mittels Überwurfmutter festgezogen. Die Heizzuleitungen sind durch eine Gummischeibe im Kathodenträger vakuumdicht nach außen geführt. Die innere Spannungs-festigkeit von über 100 kV wurde durch ein Anodenrohr erreicht, das ebenso wie die negative Elektrode in einer abschraubbaren gut abgerundeten Kappe endet. Wehnelt- und Anodenkappe können zur Reinigung und Politurerneuerung leicht herausgenommen werden.

Die Glühkathode besteht aus einem haarnadelförmig gebogenen 0,12 mm starken thorierten Wolframdraht und ist mit zwei Durchführungsdrähten eines keramischen Sockels verschweißt. Dieser Zwischensockel ist auf einem Stecker zentrierbar befestigt. Wenn der Glühfaden durchgebrannt ist,

Wenn der Stecker nach Lösen der Wehneltkappe leicht vom Kathodenträger abgezogen wird durch einen neuen Kathodenstecker ersetzt werden. Die Haarnadelkathoden werden bei der Herstellung unter Vakuum ausgeglüht, und dann wird der Zwischensockel unter dem Lichtmikroskop durch drei radiale Schrauben zum Stecker genau zentriert. Die Kathodenstecker in der Wehneltkappe zentrisch zur Steuerbohrung gepaßt ist, sitzt die Spitze der Haarnadel koaxial in der Bohrung der Wehneltkappe, so daß sich der Strahl genügend genau nach der Achse des Beschleunigungssystems ausrichtet. Eine wesentliche Lagenänderung der Kathodenspitze durch die Erhitzung des Heizfadens im Betrieb tritt infolge des Vorglüehens nicht mehr ein.

Kondensor mit kreuzförmiger Verschiebung und Schwenkung gegenüber dem Objektiv (Abb. 5)

Der Kondensor besteht aus einer konzentrischen gekapselten Spule ohne besonderes Schutzsystem, da sein Magnetfeld nur die geringe Brechkraft zu erzeugen braucht, die erforderlich ist, um die Kathode in der Objektenebene abzubilden. Der Spalt der Spulenwicklung unterteilt die Strecke Kathode-Objekt etwa im Verhältnis 1:1, so daß auf dem Objekt im Fall der Kathodenabbildung eine Stromdichte im engsten Strahlquerschnitt (kurz hinter der Kathode) erzeugt werden kann. Diese ist bei einem Strahlstrom von $20\mu A$ höher, als sie zu einem genügend hellen Bild des Objekts bei maximalem Abbildungsmaßstab von 100 000:1 notwendig ist. Man kann daher, falls dies besonderen Fällen erwünscht ist, eine sehr hohe Ionisierung und Erwärmung der Objekte erreichen.

Das Elektronenstrahlrohr ist starr mit der Kondensorenspule zusammengebaut und bildet mit ihr und einem Verstellmechanismus zusammen den Bestrahlungsapparat (Abb. 5). Mittels der Verstelleinrichtungen kann der Bestrahlungsapparat jeweils nach zwei zueinander senkrechten Koordinaten in der zur Bildungsachse des Mikroskops senkrechten Ebene verschoben und um das Objekt als Mittelpunkt geneigt werden. Die Führung der gegeneinander bewegten Geräteteile erfolgt durch einen Stahlring, der auf seiner Unterseite eben, auf seiner oberen Seite mit einer Kugelfläche geschliffen ist, deren Mittelpunkt mit der Objektlage auf der Mikroskopachse zusammenfällt. Zwischen diesem Stahlring und den beiden angrenzenden

Geräteteilen liegt je ein Kugellagerring zur Erzielung leichter Beweglichkeit. Beide Bewegungen werden nach Art eines Kreuzförmiges durch zwei Paare von Einstellschrauben mit Gegenfedern bewirkt, die radial zur Mikroskopachse in einem mit dem Stahlring verbundenen Zylindermantel angeordnet sind. Die Einstellbolzen und Federhülsen sind an ihren inneren Enden mit kleinen Rollen versehen, welche den Druck auf die Kondensorenspule bzw. die Objektschleuse übertragen. Die Abdichtung des beweglichen Bestrahlungsteils gegen das Mikroskop erfolgt durch eine Gummimanschette, die an ihren beiden Enden mit den beiden anschließenden Geräteteilen (dem Strahlrohr mit Kondensor und der Objektschleuse) durch Ringschrauben verbunden ist. Die Konstruktion gestattet in übersichtlicher Weise die genaue Ausrichtung des Strahls bei der Aufnahme von Hellfeldbildern sowie die Schrägstellung des Strahls, z. B. zur Aufnahme von Dunkelfeldbildern.

Küken-Objektschleuse (Abb. 6)

Abb. 5 zeigt die neue Form der von uns schon früher²²⁾ verwendeten Hahnküken-schleuse, die einen einfachen und raschen Objektwechsel gestattet. In dem Schleusenblock oberhalb des Objektivs ist das Schleusenküken mit waagerechter Achse eingesetzt. Es besitzt eine Querbohrung, die als Schleusen-kammer für das Objekt dient. Durch einen im Schleusenküken gelagerten Trieb kann in der Querbohrung eine gezahnte Hülse verschoben werden, innerhalb der eine zur Aufnahme des Objekts dienende Patrone locker gelagert ist. Durch Drehen des Schleusenküken, das mit einem Anschlag in beiden Richtungen verse-

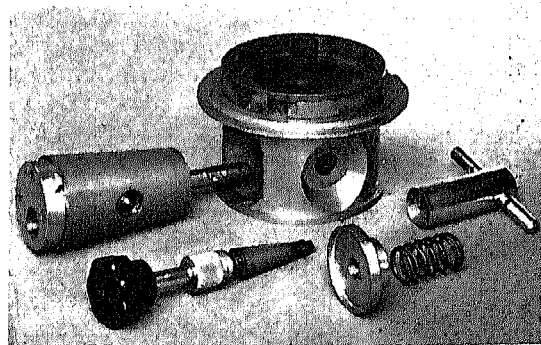


Abb. 6 Objektschleuse mit ausgebautem Schleusenküken

²²⁾ vgl. 5).

hen ist, kann die Querbohrung in die Richtung der Mikroskopachse (Betriebsstellung) oder quer dazu (Einschleusstellung) gebracht werden. Durch eine Öffnung auf der Vorderseite des Schleusenblocks, die in der Einschleusstellung mit der Kükbohrung übereinstimmt, wird die Objektpatrone mittels des Triebts herausgeschoben, so daß die Schraubfassung mit dem Objektträger von Hand ausgewechselt werden kann. Nachdem die Patrone wieder in das Schleusenköken zurückgeholt ist, wird letzteres in die Betriebsstellung gedreht und mittels des Triebts so weit nach unten gesenkt, bis sie in der konischen Bohrung des unter dem Schleusenköken liegenden Objektverschiebetisches festsetzt. Da der Triebknopf auf der linken (großen) Stirnfläche, der Kniebel für die Kükendrehung auf der rechten (kleinen) Stirnfläche des Schleusenkökens angeordnet ist, läßt sich die Schleuse besonders bequem und schnell beidhändig bedienen. Infolge des kleinen Schleusenvolumens kann das Objekt unmittelbar in das Hochvakuum eingeschleust werden. Eine vakuummäßige Fehlbedienung der Schleusen ist unmöglich. Die Unterbrechung der Bildbeobachtung durch den Objektwechsel erfordert nur eine Minute. Der Schleusenkörper ist durch drei Spannklauen fest mit dem Objektiv verbunden.

Meßkreuztisch zur Objektverschiebung mit Objektkipfung für Stereobilder; Objektiv mit zentrierter Eingangsblende sowie zentrier- und ausrückbarer Aperturblende; Zwischenprojektiv (Abb. 7)

Bei den neuen Geräten wurde eine sehr präzise Objektverschiebung erreicht, die unempfindlich gegen Erschütterungen ist und ohne Totgang und Seitenabweichung arbeitet. Die Objektblendenfassung wird fest mit der konisch ausgebildeten Objektpatrone verschraubt, die mittels des Triebts im Schleusenköken in die konische Bohrung des Objektkreuztisches fest eingedrückt wird. Der Objektverschiebetisch ist mit dem Objektiv vereinigt und wird durch zwei Schraubenfedern auf dessen Vorderseite angeedrückt, um durch Reibung Schwingungen des Objektträgers gegenüber dem Objektiv zu verhindern. Die Verstellung des Objektisches erfolgt durch zwei senkrechte, zu beiden Seiten hinter der Mikroskopröhre angeordnete Drehsäulen, die über Kniehebel die im Objektivgehäuse vakuumdicht gelagerten Verstellbolzen verschieben. Für beide Bewegungsrichtungen sind je zwei Gegen-

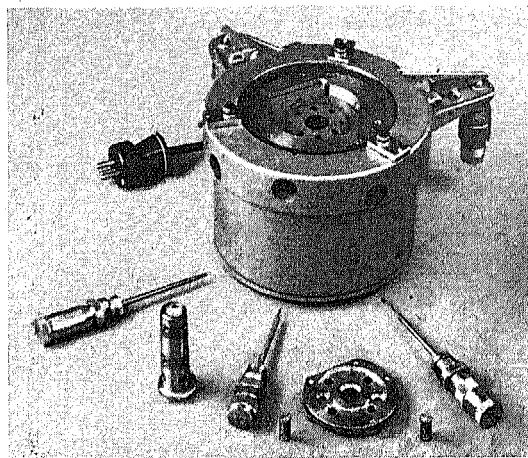


Abb. 7 Objektiv mit ausgebautem Objektverschiebetisch, Polschubsystem und Blendenverstellungen

federn vorgesehen. Eine um die Verstellbolzen liegende Schraubenfeder preßt den Bolzen entgegen dem Vakuumdruck gegen den Kniehebel. Eine zweite auf der gegenüberliegenden Seite des Kreuztisches wirkende Schraubenfeder, die in einer Verschiebehülse liegt, preßt nur noch den Tisch selbst gegen den Verstellbolzen. Die Verstellbolzen und Gegenfedern drücken über kleine Rollen auf den Tisch, um eine leichtere Beweglichkeit des Tisches gegenüber den Einstellorganen zu erzielen. Um den Tisch genau in beiden Koordinaten zu führen, besitzt das eine der beiden Tischrückstellglieder ein Querstück, das mit seinen beiden Enden auf je eine im Tisch gelagerte Rolle drückt und zur Geradföhrung dient. Die Verschiebung des Kreuztisches kann in jeder Richtung durch an den Drehsäulen angebrachte mikrometerartige Teilungen (axiale und Trommel-Teilung) gemessen werden. Ein Intervall auf der Trommel ($\sim 2\text{mm}$) entspricht gerade einer Objektverschiebung von 1μ . Durch Einstellschrauben auf den Druckbolzen kann die zentrierte Lage der Objektblende im Mikroskop und die Nullstellung der Mikrometerablesung in Übereinstimmung gebracht werden.

Zur Aufnahme stereoskopischer Teilbilder³³⁾ wird die Objektpatrone gegen eine Stereopatrone ausgetauscht, in der die Objektträgerfassung unter Vakuum um $\pm 5^\circ$ gegen die Normallage gekippt werden kann, wobei die Kippachse durch die Objektebene verläuft. Die Kippung wird durch einen in das Objektiv eingesetzten,

³³⁾ vgl. 8).

in radialer Richtung verstellbaren Trieb bewirkt, der die Objektverschiebung nicht behindert.

Um von empfindlichen Objekten Abschlattungs-aufnahmen³⁴⁾ zu machen, wird eine weitere Spezialpatrone verwendet, die eine seitliche Bohrung für die Abschattschneide besitzt. Die Schneide wird durch einen Grob- und Feintrieb betätigt, der anstelle des Stereotriebs in das Objektiv eingesetzt wird. Durch den Grobtrieb wird die Schneide durch die Bohrung der Abschattpatrone ein- und ausgeführt, um den Objektwechsel zu ermöglichen. Durch den Feintrieb wird die Abschattung des zu schonenden Objektbereichs und die Freigabe zur Aufnahme bewirkt, um so die geringstmögliche Dosisbelastung für den aufgenommenen Objektbereich zu erhalten.

Eine dritte Spezialpatrone dient zur Einbringung von kompakten Objekten, deren Oberflächen mittels Beugungs-aufnahmen nach dem Reflexionsverfahren untersucht werden sollen. Es können Objektproben bis zur Abmessung $10 \times 5 \times 2$ mm durch eine Schraube so in die Patrone eingespannt werden, daß die zu untersuchende Oberfläche vom Format 5×5 mm parallel zur optischen Achse des Mikroskops liegt. Durch Neigen des Bestrahlungsapparats kann der flache Einfallswinkel zwischen Strahl und Objektoberfläche eingestellt werden. Der bei diesen Untersuchungen nicht benötigte Objektivpolschuh wird herausgenommen, um Platz für das breitere Ende der Spezialpatrone zu schaffen.

Zur Erzielung der vorstehend begründeten Dreistufigkeit des Mikroskops wurde das Objektiv konstruktiv mit der Zwischenlinse vereinigt, wobei die beiden Linsfelder durch eine gemeinsame Wicklung erregt werden. Der Weicheisenkern der Spulenkapselung besitzt daher zur Erzeugung der beiden Linsfelder zwei Spalten, die so dimensioniert sind, daß bei eingebautem Polschuhsystem am Objektivspalt etwa $\frac{4}{7}$, am Spalt der Zwischenlinse etwa $\frac{3}{7}$ der Gesamtdurchflutung in der Wicklung, d. h. der magnetischen Spannung, zur Wirkung kommen³⁵⁾. Die Feldrichtung in beiden Polschuhsystemen ist gleichsinnig. Das ebenfalls zweistufige konische Polschuhsystem wird von unten, d. i. von der Zwischenlinse

her, eingesetzt und besteht aus drei miteinander durch unmagnetische Zwischenringe verschraubten Polschuhen. Das Linsensystem entwirft auf dem 163 mm vom Objekt entfernten Zwischenbildleuchtschirm vor dem Projektiv ein Bild des Objekts, das bei starker Spulendurchflutung (zweistufige Abbildung) 350fach, bei schwacher Durchflutung (einstufige Abbildung) 7fach vergrößert ist.

Im Spalt des Objektivsystems liegt ein flacher Schieber, der sowohl die Aperturblende für mikroskopische Aufnahmen als auch eine den Beugungskegel durchlassende Blende von größerem Durchmesser enthält. Am äußeren Umfang der Objektiveneinheit sind, um 90° gegeneinander versetzt, zwei in radialer Richtung verstellbare Feintriebe eingesetzt, von denen der eine noch zusätzlich eine Grobbewegung ausführen kann, so daß durch den Schieber sowohl die Aperturblende zur optischen Achse zentriert werden, als auch die größere Blende für Beugungs-aufnahmen anstelle der Aperturblende in den Strahlengang gebracht werden kann. Der Blendenschieber wird durch im Objektivspalt liegende Federn in Richtung auf die Verstellspindeln gedrückt, die ihn am äußeren Umfang des konischen Polschuhsystems berühren. Beim Ausbau des Polschuhsystems zur Reinigung der Aperturblende brauchen daher die Blendenverstellungen nicht ausgebaut, sondern nur zurückgezogen zu werden. Eine von der eben beschriebenen Ausführung abweichende Anordnung wurde entwickelt, um die Aperturblende ohne Ausbau des Polschuhsystems herausnehmen zu können. Hierbei sitzt die Blende auf dem Ende einer Verstellspindel, die bis in das Polschuhsystem hereinragt, und wird zur Reinigung durch Abschrauben der Verstell-einrichtung zusammen mit dieser aus dem Mikroskop herausgenommen.

Um stigmatische Abbildungen zu erhalten, hat es sich bewährt, unmittelbar hinter dem Objekt eine zum Objektiv zentrierte Eintrittsblende einzuordnen. Dadurch läßt sich vermeiden, daß das abbildende Strahlenbündel exzentrisch oder schief zur Achse in das Objektivfeld eintritt. Bei schiefem Strahleintritt würde der Öffnungsfehler des Objektivs eine unterschiedliche Schnittweite für sagittale und meridionale Strahlenbündel zur Folge haben, wodurch sich auch bei völlig drehsymmetrischem Objektivfeld astigmatische Bilder ergeben würden. Um sicher zu sein, daß der Strahl achsenparallel durch die Eintrittsblende fällt, kann der Bestrahlungsteil bei eingeschalteter Kondensor-

³⁴⁾ vgl. 11).

³⁵⁾ Für die Berechnung der magnetischen Linsen ist der Verfasser Herrn Dr.-Ing. O. Wolff zu Dank verpflichtet.

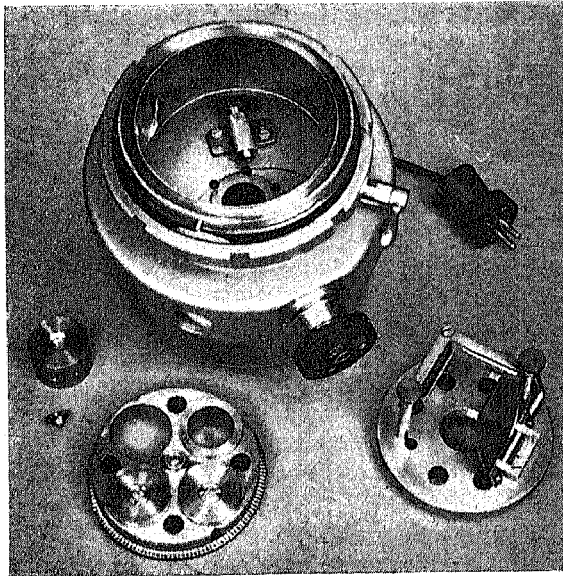


Abb. 8 Projektiv mit herausgenommener Joehplatte mit Zwischenbildschirm und ausgehauener Wechseltrommel für Polschuhsysteme

linse aber ausgeschalteter Objektivlinse mechanisch so eingestellt werden, daß der Strahl durch das Loch im Zwischenbildschirm auf eine Mittenmarkierung des Endbildschirms fällt.

Mehrfachprojektiv mit Wechseltrommel für vier Polschuhsysteme und Klappschirm für Zwischenbild (Abb. 8)

Das Mehrfachprojektiv besteht aus einem Spulengehäuse, welches über der Wicklung eine exzentrisch zum Strahl sitzende, von einem Zahnkranz umgebene Trommel mit vier Polschuhsystemen verschiedener Brennweite enthält, die von außen über ein Kegelarad gedreht werden kann. Über der Trommel liegt ein Eisenteller, der den magnetischen Fluß von dem jeweils im Strahlengang befindlichen Polschuhsystem nach dem eisernen Spulengehäuse leitet. Die Polschuhe sind mit eingeschraubten fest zentrierten Gesichtsfeldblenden solcher Größe versehen, daß der Endbildschirm voll ausgeleuchtet wird. Eine auf den äußeren Trommelumfang wirkende Raste sorgt dafür, daß man diejenigen Lagen der Trommel fühlt, bei denen die Polschuhsysteme zur Mikroskopachse zentriert sind. Durch ein rundes Fenster im Spulengehäuse kann das wirksame Polschuhsystem an einer auf dem Trommelumfang angebrachten Leuchtmarkierung erkannt werden, so daß man die gewünschte Vergrößerung einstellen kann.

Es lassen sich auf dem Endbildschirm bzw. der photographischen Platte im ge-

samten Strahlspannungsbereich von 40... 100 kV die folgenden elektronenoptischen Vergrößerungen einstellen:

Projektiv- erregung	Polschuh- system	Vergrößerungsbereiche	
		einstufig	zweistufig
ausgeschaltet	1	28	1400
		zweistufig	dreistufig
eingeschaltet	1	100 ... 200	5000 ... 10000
"	2	200 ... 500	10000 ... 25000
"	3	500 ... 1000	25000 ... 50000
"	4	1000 ... 2000	50000 ... 100000

Die dem in der Mikroskopachse befindlichen Polschuhsystem benachbarten Polschuhe bewirken eine Unsymmetrie des Streufeldes im Projektiv, das sich bei dem weitesten Polschuhsystem in einer Bildverschiebung auf dem Endleuchtschirm bemerkbar macht. Der Streufluß wurde daher durch Anbringung einer entzerrenden Weicheisenmasse symmetriert.

Der Eisenteller, der leicht aus dem Spulengehäuse herausgenommen werden kann, trägt einen aus dem Strahlengang herausklappbaren Zwischenbildschirm von 50 mm Durchmesser mit zentraler Bohrung und einer mm-Teilung sowie zwei ebene Oberflächenspiegel. Über diese Spiegel kann der Leuchtschirm durch zwei runde Fenster in der Vakuumwand des Spulengehäuses von dem vorn und links sitzenden Beobachter betrachtet werden. Im Stehen können die beiden Beobachter den Leuchtschirm unter einem kleineren Winkel zur Schirmfläche unmittelbar beobachten.

Bei mikroskopischen Aufnahmen dient der Zwischenbildschirm zum bequemeren Ausschauen des im Endbild zu beobachtenden Objektbereichs, wobei man mittels der mm-Teilung die Größe des Zwischenbildes zur genauen Vergrößerungsbestimmung ausmessen kann. Bei Beugungsuntersuchungen lassen sich auf dem Zwischenbildschirm besonders gut schwach ausgeprägte Beugungsbilder erkennen, da der ungebeugte Zentralstrahl durch die zentrale Schirmöffnung fällt, so daß keine Blendung eintritt. Das Beugungsbild ist in dem kleineren Abstand vom Objekt zudem kleiner und daher heller als im Endbild. Bei der Aufnahme von Beugungsbildern klappt man den Zwischenbildschirm aus dem Strahlengang, so daß der Beugungskegel durch das in den Strahlengang gerückte, weiteste Projektiv-Polschuhsystem auf den Endbildschirm gelangen kann.

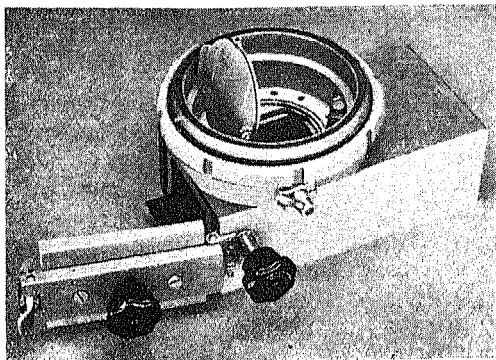


Abb. 9 Aufnahmekammer für Bildreihen

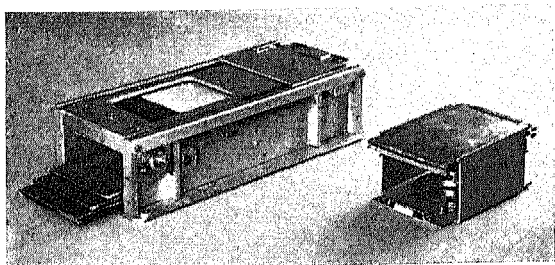


Abb. 10 Wechseinrichtung für 12 Platten $6,5 \times 9 \text{ cm}^2$

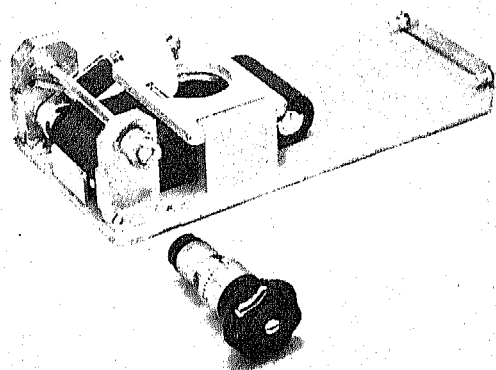


Abb. 11 Normalfilmkassette für 36 Bilder $2,4 \times 3,6 \text{ cm}^2$

Aufnahmekammer für Bildreihen mit Wechseinrichtung für 12 Plattenkassetten ($6\frac{1}{2} \times 9 \text{ cm}^2$) bzw. Normalfilmkassette; Belichtungsmesser (Abb. 9, 10 und 11)

Für die neuen Geräte wurde eine Aufnahmekammer entwickelt, um außer Einzelaufnahmen rasch und bequem kürzere und längere Bildreihen aufzunehmen. Solche Aufnahmevorrichtungen sind besonders dann von Vorteil, wenn von Bild zu Bild völlig gleiche Strahlverhältnisse und Objektschnitte aufrechterhalten werden, oder wenn langsame Änderungen der Objekte während

der Bestrahlung verfolgt werden sollen. Zwischen zwei Aufnahmen kommt dabei keine Luft in das Gerät, so daß der Elektronenstrahl bestehen und alle sonstigen Einstellungen aufrechterhalten bleiben können. Die Kammer besteht aus einem quaderförmigen Vakuumgehäuse, das sich nach dem Projektivtubus zu als weites Rohr fortsetzt. Die Decke des flachen Gehäuses besitzt einen Ausschnitt, der zur Exposition von $6\frac{1}{2} \times 9 \text{ cm}^2$ -Platten ausreicht. Darüber liegt eine Expositionsklappe mit eingelegtem Leuchtschirm von 10 cm Durchmesser zur Beobachtung des Endbildes.

Die Expositionsklappe kann durch einen im Rohransatz gelagerten Hebel von außen nach dem vorn sitzenden Beobachter zu aufgeklappt werden, so daß dieser Beobachter bei nur halb hochgeklapptem Leuchtschirm diesen unverkürzt vor sich sieht. Dies ist besonders vorteilhaft, wenn man zur besseren Scharfstellung die fünffach vergrößernde Fernrohrlupe benutzt, die vor jedes der drei Beobachtungsfenster im Projektivtubus geschwenkt werden kann, weil dann das ganze Bildfeld der Lupe von 50 cm Durchmesser scharf erscheint.

Die Expositionsklappe besitzt an ihrem Umfang einen kleinen schräg nach oben gestellten Becher. Will man bei Beugungsaufnahmen das zentrale Maximum von der Aufnahme abhalten, so kann man die Klappe nur halb öffnen, so daß der Zentralstrahl in den Becher fällt.

Auf dem runden Leuchtschirm ist das rechteckige Platten- und Filmformat markiert, um den gewünschten Bildausschnitt bei der Aufnahme sicher zu erhalten. In der Schirmmitte befindet sich ein Loch von 0,5 mm Durchmesser, das von einem Markierungskreis von 60 mm umgeben ist. Das Loch dient zur Strahlausrichtung bei nicht eingeschalteten Vergrößerungslinsen. Bei Beugungsaufnahmen läßt man den nicht abgelenkten Strahl zur Vermeidung der Überblendung in das Loch fallen. Der Kreis dient zur Vergrößerungsbestimmung. Man stellt den Objektstisch mittels einer der beiden Drehsäulen so, daß eine Bildeinheit vom Kreisumfang durch das Mittelloch auf die Gegenseite des Markierungskreises wandert, und liest die zugehörige Objektverstellung ϵ auf der in μ geteilten Trommel ab. Die Vergrößerung ergibt sich zu $\frac{60000 \mu}{\epsilon \mu}$. Diese einfache Vergrößerungsbestimmung ist besonders bei niedrigeren Vergrößerungen schon recht genau.

Die vordere Seite des Vakuumgehäuses ist durch eine flache gummigedichtete Tür abgeschlossen, durch welche entweder eine Wechseinrichtung für zwölf Plattenkassetten $6,5 \times 9 \text{ cm}^2$ oder eine Normalfilmkassette eingesetzt und zur Neufüllung entnommen werden kann.

Die Plattenwechseinrichtung enthält zwei Stapelräume für je zwölf Kassetten, die mit ihrer schmalen Seite aneinandergrenzen, so daß der nicht exponierte Stapel im hinteren Gehäuseeteil, der exponierte Stapel unter der Leuchtschirmklappe und unmittelbar hinter der vorderen Türöffnung liegt. Zur Aufnahme wird die oberste Kassette des Vorratsstapels nach vorn geschoben, wobei der Deckel in seiner ursprünglichen Lage bleibt, so daß die Platte unter die Expositions-klappe zu liegen kommt und durch Hochklappen des Leuchtschirms exponiert werden kann. Dann wird der Kassettendeckel ebenfalls nach vorne geschoben, so daß sich die Kassette wieder schließt. Dabei fällt sie nach unten in einen Sammelbehälter für exponierte Kassetten. Diese können nach Öffnen der Tür zur Entwicklung entnommen werden. Falls alle Kassetten exponiert sind und die Wechseinrichtung frisch gefüllt werden soll, zieht man sie durch die Tür aus dem Vakuumgehäuse heraus, nimmt den Boden des Vorratsbehälters ab und legt zwölf frisch gefüllte Kassetten ein. Dann setzt man den mit einer federnden Grundplatte versehenen Boden wieder ein, so daß beim Betrieb der Wechseinrichtung der Kassettenstapel immer um eine Kassette nach oben gedrückt wird, sowie die oberste Kassette weggeschoben ist. Die Verschiebung von Kassettendeckel und Kassette bewirken zwei Greiferpaare, die zu beiden Seiten der Wechseinrichtung durch geschlossene Seilzüge angetrieben werden. Hierbei ist das Greiferpaar für die Kassette an dem oberen, das für den Deckel an dem unteren Seilabschnitt befestigt, so daß das Seilantriebsrad zuerst im Uhrzeigersinn und dann in entgegengesetzter Richtung gedreht werden muß, um einen Kassettenwechsel zu vollziehen. Nach der Exposition kann die auf dem Kassettendeckel aufgebrauchte Kassettennummer durch die beiden Fenster im Projektivtubus abgelesen werden.

Die Photoeinrichtung für Normalkinofilm besteht aus einer Kleinbildkamera (Leica 1c ohne Optik), die leicht herausnehmbar auf einem Chassis befestigt ist. Dieses besitzt ein Rädervorgelege, das die Bewegung des

Transportknopfs der Aufnahmekammer auf die anstelle der Plattenwechseinrichtung eingebaute Kleinbildkassette überträgt. Eine Rechtsdrehung des Transportknopfes bis zum Anschlag bewirkt die Weiterbewegung des Filmes um eine Bildbreite und das Spannen des Verschlusses, während eine Linksdrehung des Knopfes den Auslösehebel des Verschlusses betätigt. Die Belichtungszeit ist von der Dauer der Linksdrehung abhängig. Vor der Aufnahme ist die Expositions-klappe hochzuheben. Eine besondere durch den Auslösehebel gesteuerte Klappe schützt den Verschuß vor ungewollter Bestrahlung. Die Bildzahl kann durch einen am Transportknopf angebrachten Skalenring abgelesen werden, da dieser bei jeder Filmweiterschaltung ($1 - \frac{1}{40}$) Umdrehung macht. Bei Verwendung einer normalen Patrone mit 1,6 m langem Film können 36 Aufnahmen vom Format $24 \times 36 \text{ mm}^2$ gemacht werden. Das Einlegen und Herausnehmen des Filmes erfolgt, wie bei der Leica üblich, bei Tageslicht. Eine Sperre in der Leica verhindert Doppelbelichtungen und Leeraufnahmen.

Anstelle der Aufnahmekammer für Bildreihen kann das Mikroskop auch mit einer Schleuse für je eine Plattenkassette $6,5 \times 9 \text{ cm}^2$ geliefert werden, deren Prinzip schon früher³⁶⁾ beschrieben wurde. Das Vakuumgehäuse dieser Schleuse wurde in seiner äußeren Form der Aufnahmekammer für Bildreihen angepaßt, so daß beide Einrichtungen miteinander ausgetauscht werden können. Ebenso ist die Expositions-klappe und ihre Betätigung in beiden Fällen identisch.

In beiden Aufnahmekammern ist nach einem Vorschlag von B. v. Borries³⁷⁾ eine einfache Einrichtung zur Messung der Expositionszeit eingebaut. Sie besteht aus einem mit einer grünlichen Glasscheibe abgedeckten Kästchen, das eine Glühlampe enthält und so neben dem Leuchtschirm aufgestellt ist, daß die Grünscheibe von dem vorderen und linken Beobachter jeweils unter dem gleichen Winkel wie der Leuchtschirm gesehen wird. Die Lampe wird auf gleiche Helligkeit mit der hellsten Stelle des Leuchtschirms abgeglichen und der Lampenstrom an einem Instrument abgelesen. Aus ihm kann die Expositionszeit für die verschiedenen Plattensorten anhand einer Eich-tabelle entnommen werden.

³⁶⁾ vgl. 5).

³⁷⁾ B. v. Borries, DRPa S 159 808 VIIIc 21 g vom 25. 5. 44.

Erzeugung, Schaltung und Anzeige des Vakuums (Abb. 12)

Das Volumen der Mikroskopröhre wurde dem Strahlverlauf nach Möglichkeit angepaßt und dadurch auf etwas weniger als 5 l reduziert. Als Hochvakuumpumpe dient eine dreistufige Quecksilberdiffusionspumpe, die auf ihrer Vorvakuumseite einen Pufferbehälter trägt, als Vorpumpe eine rotierende Ölkapselpumpe (Gasballastpumpe). Bei heißer Diffusionspumpe wird das Mikroskop in 3 Minuten auf das Betriebsvakuum von 10^{-4} mm Hg gebracht. Bei Störung des Kühlwasserdurchflusses wird die Pumpenheizung abgeschaltet und ein Klingelsignal ausgelöst. Durch ein auf der Rückseite der Mikroskopröhre am Projektivtubus befindliches Vakuumventil können alle notwendigen Vakuumschaltungen vom Platz des Beobachters aus vorgenommen werden:

- 1) Lufteinlaß, wobei Vor- und Hochvakuumleitung vom Mikroskop abgetrennt sind, (Markierung 760)
- 2) Evakuierung mittels Vorpumpe, wobei die Hochvakuumleitung vom Mikroskop abgetrennt ist, (Markierung 1)
- 3) Evakuierung mittels Diffusionspumpe, wobei diese durch die Vorpumpe evakuiert wird, (Markierung 10^{-4})
- 4) Dichtigkeitsprüfung, wobei Vor- und Hochvakuumleitung vom Mikroskop abgetrennt sind. (Markierung —)

Das Vakuumventil besteht aus einem Mehrwegehahn, der so durchgebildet ist, daß nirgends Luft längs des Schliffumfangs auf die Hochvakuumseite gelangen kann, sondern auf diesem Weg allenfalls in einen Raum dringen kann, der durch die Vorpumpe laufend evakuiert wird. Die unter Atmosphärendruck stehenden axialen Strecken des sorgfältig eingeschliffenen Kükens sind hinreichend groß, um einen sicheren Betrieb zu gewährleisten. Die Hochvakuumleitung führt vom Vakuumventil nach hinten in das Standgehäuse und über eine Kühlfalle zur Diffusionspumpe, die an einer Traverse im Gehäuse angeschellt ist. Diese trägt auch den Fahrstuhl mit dem Devargefäß für die flüssige Luft. Er wird durch ein Handrad auf der rechten Gehäusesseite über Ritzel und Zahnstange bewegt und dabei in jeder Höhenlage durch eine Reibungskupplung festgehalten. Von der Vorpumpe, die in oder außerhalb des mikroskopischen Arbeitsraums aufgestellt werden kann, führt die Vorvakuumleitung über ein Absperrventil und ein verkürztes Quecksilbermanometer im Standgehäuse zum Va-

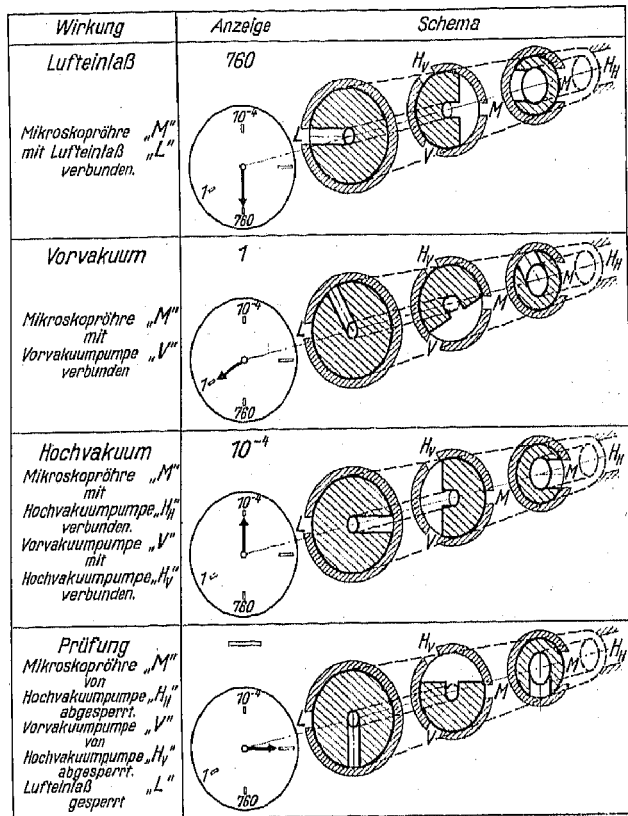


Abb. 12 Vakuumventil: Prinzipschaltung und Habakükens

kuumventil der Mikroskopröhre und von dort weiter zum Vorvakuumbehälter der Endpumpe. Über das Absperrventil, das mit dem Schalter für den Antriebsmotor der Vorpumpe verbunden ist, kann die Vorpumpe ausgeschaltet und luftgefüllt werden. Zur Prüfung des Vakuums wird mittels Druckknopfs durch ein Hochfrequenzgerät in der Mikroskopröhre und in der Pumpleitung eine Gasentladung erzeugt. Das verkürzte Manometer (Vorvakuumanzeige) und die Gasentladungen in den Prüfröhrchen am Projektivtubus und an der Kühlfalle (Hochvakuumanzeige) werden durch ein Fenster in der rechten Vorderseite des Gehäuses beobachtet.

Zur Einsparung der flüssigen Luft kann auch eine dreistufige Öldiffusionspumpe mit einer zweistufigen Ölkapselpumpe (Gasballastpumpe) eingebaut werden, wobei die Kühlfalle und die Fahrstuhleinrichtung entfällt.

Elektrische Anlage

Die erforderliche hohe Konstanz der Elektronenbeschleunigungsspannung wird durch magnetische Spannungsgleichhaltung erzielt,

welche aus der nach Amplitude und Frequenz schwankenden Netzspannung eine konstante Eingangswchelspannung für den Hochspannungstransformator erzeugt. Ein solcher Gleichhalter besteht aus zwei Drosseln, von denen die eine (Querdrossel) hochgesättigt, die andere (Vordrossel) mit einem Luftspalt versehen ist, und aus einem Kondensator. Kleine Spannungsänderungen haben große Stromänderungen in der Querdrossel zur Folge, die noch dadurch wirksamer gemacht werden, daß der Kondensator den Blindstrom der Querdrossel zum großen Teil ausgleicht. Da diese Stromänderungen entsprechende Änderungen der Spannung an der Vordrossel bewirken, verursacht z. B. eine Vergrößerung der Netzspannung zwar eine wesentliche Vergrößerung der Spannung an der Vordrossel, aber nur eine kleine Spannungserhöhung an der gesättigten Querdrossel. Auch diese wird ausgeglichen, indem in einer besonderen Wicklung der Vordrossel eine entsprechende Gegenspannung induziert wird. Zwei magnetische Spannungsgleichhalter sind in Reihe geschaltet, wobei auf ein richtiges Verhältnis von induktiver zu Ohmscher Belastung bei beiden Reglern zu achten ist.

Aus der Arbeitsweise dieser magnetischen Regler ergibt sich eine starke Abhängigkeit der Ausgangsspannung von der Netzfrequenz. Damit nicht beim Arbeiten an Netzen mit schwankender Frequenz die Konstanz der Betriebsspannung hierdurch wieder verlorengeht, enthält der Konstanthaltesatz eine Schaltung, welche die von den Frequenzänderungen herrührenden Schwankungen der Spannung wieder ausgleicht⁸⁸⁾. Sie besteht aus einer Kapazität und einer Selbstinduktion, die zusammen mit der Primärwicklung des Hochspannungstransformators eine Impedanz geben, welche mit steigender Frequenz steil abfällt. An einem Widerstand, über den der Anordnung der Strom zugeführt wird, entsteht so ein um so größerer Spannungsabfall, je höher die Frequenz und damit die Spannung ist, die der magnetische Regler liefert. Zum Ausgleich des an diesem Vorwiderstand entstehenden Spannungsverlustes liegt am Eingang des Frequenzentzerrers ein Spartransformator, der zugleich die für die Einstellung der vorgesehenen vier Strahlspannungen von 40, 60, 80 und 100 kV benötigten Anzapfungen trägt. Ihre Einstellung erfolgt durch einen Drehschalter links unter dem Mikroskopisch.

⁸⁸⁾ Die Schaltung wurde von Herrn Dipl.-Ing. H. Everding entwickelt.

Die konstante Ausgangsspannung des Konstanthalters wird dem Transformator der Hochspannungseinrichtung zugeführt, dessen Sekundärwicklung in Spannungsverdopplungsschaltung über zwei Hochvakuumventile (Glühkathodengleichrichter) zwei hintereinandergeschaltete Kondensatoren auflädt. Die noch verbleibende Welligkeit der Ladesspannung wird durch eine aus weiteren Kondensatoren und zwischengeschalteten Widerständen bestehende Siebkette auf etwa 3 Volt geglättet.

Beim Einschalten der Hochspannungseinrichtung fließt ein gegenüber dem Dauerstrom (Strahlstrom) vielfach stärkerer Strom, der zum Aufladen der Siebkondensatoren aufgebracht werden muß. Dieser Einschaltstrom wird dem Hochspannungstransformator über ein Zeitrelais unter Umgehung des Spartransformators und des Vorwiderstands zugeführt, da sonst an letzterem ein zu großer Spannungsabfall auftreten würde, was ein langsames Hochkriechen der Arbeitsspannung zur Folge hätte. So baut sich die Hochspannung innerhalb zweier Sekunden auf, nach deren Ablauf das Zeitrelais anspricht und durch Freigabe des Vorwiderstandes den Frequenzentzerrer in Tätigkeit setzt.

Der Hochspannungstransformator, die beiden Glühventile mit ihren Heiztransformatoren und auch die Kondensatoren und Widerstände sind in einem ölgefüllten Gefäß untergebracht. Von diesem wird die konstante Gleichspannung durch ein mit einer geerdeten Metallumspinnung versehenes Kabel über einen Schutzwiderstand von 1 MegOhm dem Batteriekasten des Übermikroskops und von hier durch eine leicht bewegliche Schlauchleitung dem Kathodenteil (Wehneltzylinder) des Strahlrohrs zugeführt. Die Schlauchleitung enthält die beiden Heizleitungen für die Glühkathode. Die Änderung des Strahlstroms erfolgt ohne besondere Spannungsquelle durch einen regelbaren Hochohm-widerstand zwischen dem negativen mit dem Wehneltzylinder verbundenen Pol des Hochspannungsgleichrichters und dem Heizkreis der Kathode. An diesem Widerstand erzeugt der Emissionsstrom einen Spannungsabfall, so daß der Wehneltzylinder gegen die Kathode negativ wird. Bei Verminderung des Widerstandswerts steigt der Strahlstrom an, bis der Spannungsabfall den nur um wenige Volt geringeren Wert der Strom-Gitterspannungs-Kennlinie des Strahlrohrs erreicht hat.

An der Vorderseite der Abschirmwanne befinden sich rechts und links von der Mikroskopröhre zwei im Sitzen bedienbare Drehknöpfe, die über Isolierwellen die im Batteriekasten angeordneten Schalter und Regler für die Kathodenheizung (rechts) und zur Strahlstromeinstellung (links) betätigen. Das ebenfalls im Batteriekasten angeordnete Voltmeter (Meßbereich 6 V) für die Heizspannung von etwa 3 V kann durch ein Fenster in der Abschirmwanne beobachtet werden. Das Meßgerät für den Strahlstrom von 0...120 μ A (Meßbereich des Geräts 150 μ A) ist auf der rechten Vorderseite des Stativgehäuses über dem Meßgerät zur Expositionszeitbestimmung angebracht.

Zum Schutz des Strommessers gegen Überlast, z. B. bei Gasentladungen im Strahlrohr, schließt ein Überstromrelais das Instrument kurz, dessen Beleuchtung dabei erlischt. Fließt ein solcher Überstrom während längerer Zeit, so sinkt die an der Kathode liegende Hochspannung ab. Um ihre rasche Wiederkehr zu erreichen, schaltet das Überstromrelais beim Ansprechen die Antriebswicklung des zum Frequenzzerrer gehörenden Zeitrelais ab, so daß dieses in seine Ausgangsstellung zurückläuft. Es läuft sofort nach Behebung des Kurzschlusses wieder an, so daß jeweils nach 2 Sekunden die Hochspannung ihren Endwert erreicht hat, und die Frequenzverzerrung wieder wirksam ist.

Da nach Ausschaltung des Hochspannungsgleichrichters zunächst die Hochspannung am Gerät infolge der Aufladung der Glättungskondensatoren erhalten bleibt, muß der Kathodenteil und der mit ihm durch die Schlauchleitung verbundene Batteriekasten besonders geerdet werden. Der Hebelschalter auf der linken Vorderseite des Gehäuses betätigt daher zugleich eine Erdungsstange. Beim Beginn der Einschaltbewegung, bevor die Erdungsstange sich von dem Batteriekasten löst, wird eine grüne Lampe aus- und ein rotes Warnlicht sowie die Ventilheizspannung eingeschaltet. Erst am Ende der Einschaltbewegung, wenn die Erdungsstange am weitesten vom Batteriekasten entfernt ist, wird auch die Netzspannung auf den Hochspannungsgleichrichter geschaltet. Umgekehrt wird zu Beginn der Ausschaltbewegung zuerst die Netzspannung ausgeschaltet und erst am Ende der Ausschaltbewegung, nachdem die Erdungsstange schon mit dem Batteriekasten den Kontakt hergestellt hat, wird die rote Warnlampe und die Ventilheizung aus- und eine grüne

Entwarnungslampe eingeschaltet. Mit dem Hebelschalter ist das Türschloß der Abschirmwanne mechanisch über einen Bowdenzug derart verriegelt, daß die Tür erst bei ausgeschaltetem Hebelschalter geöffnet werden kann. Ebenso kann bei offener Wannen-tür der Hebelschalter nicht eingeschaltet werden.

Die Linsenspulen werden aus einer 64 Volt-Batterie von 100 Ah Kapazität gespeist, die durch einen aus dem Wechselstromnetz betriebenen Gleichrichter geladen werden kann. Kondensator und Objektivspule besitzen zur stetigeren Einstellung von Helligkeit und Schärfe der Bilder außer der Grundwicklung noch eine Feinregelwirkung²⁰⁾, deren Amperewindungszahl etwa 10% derjenigen der Grundwicklung beträgt. Der Strom in den Wicklungen wird über Drehwiderstände bzw. Drehpotentiometer geregelt. Bei 100 kV und dreistufiger Abbildung beträgt die Leistung aller Spulen etwa 250 Watt. Ein Spulenkombinationsschalter mit den vier Schaltungen:

1. Alle Linsen ausgeschaltet (Beugungsgerät ohne Kondensator)
2. Kondensator eingeschaltet (Beugungsgerät mit Kondensator)
3. Kondensator und Objektiv mit Zwischenlinse eingeschaltet (Mikroskopvergrößerung 24 : 1 und 1200 : 1)
4. Alle Linsen eingeschaltet (Mikroskopvergrößerung von 50 : 1 bis 100 000 : 1)

gestattet den raschen Wechsel von ein- bzw. zweistufig zu zwei- bzw. dreistufig vergrößerungsspulen werden Ersatzwiderstände Übergang zu Beugungsdiagrammen verschiedener Apertur. Beim Ausschalten der Vergrößerungsspulen werden Ersatzwiderstände eingeschaltet, um den genauen Wert der Stromdurchflutung im Kondensator aufrechtzuerhalten.

Der Mikroskopierende empfindet die Leuchtschirmbilder am hellsten im verdunkelten Raum. Um seine Dunkeladaption nicht zu stören, sind Raum-, Mikroskopisch- und Instrumentenbeleuchtung nur schwach gehalten. Für die Raumbeleuchtung ist am Gerät ein mit dem Türschalter des Mikroskopraumes korrespondierender Wechselschalter vorhanden, so daß der Beobachter eine ihm störende Einschaltung von anderer Seite rasch wieder aufheben kann.

²⁰⁾ R. Hackbarth, DRPa S 162640 VIIIc 21 g vom 8. 3. 45.

Tabelle 1

Daten handelsüblicher Durchstrahlungs-Elektronenmikroskope¹⁾

Land	Firma (Lieferbeginn)	Typ Jahr Bezeichnung	Elektronenbeschleunigung kV	Vergrößerungen der Elektronenaufnahmen bei höchster Strahlenspannung	Lupe zur Leuchtschirmbetrachtung	Photograph. Aufnahme			Abbildung		Strahlängen		Gerätehöhe cm
						Material-einsatz	Bildformat zahl cm ²	Linsenart	Stufenzahl	Kathode-Endbildschirm cm	Objekt-Endbildschirm cm		
Deutschland	Siemens (1939)	(1939 ÜM 100) 1949 ÜM 100	55-70-85-100 40-60 80-100	300 ... 40000 25 ... 100000	4 x 5 x	1 Platte 12 Platten oder Normalfilm 12 Platten oder Normalfilm	6,5·9,0 1 6,5·9,0 12 2,4·3,6 36 6,5·9,0 12 2,4·3,6 36	magn. magn.	2+K ²⁾ 3+K	100 82	59 55	240 216	
	AEG (1947)	(1947 EM 7) 1949 EM 8	50	1000-3000-10000 1500-5000-15000	10 x 20 x	24 Platten 24 Platten	6,5·9,0 24 6,5·9,0 24	elektr.	3	— 90	— 70	— 220	
USA	RCA (1940)	(1940 EMB) 1944 EMU (1944 EMC)	60 50 30	2000 ... 25000 100 ... 20000 500-5000	keine ~2 x ~2 x	1 Platte 1 Platte 1 Platte	5,1·25,4 5 5,1·25,4 5 5,1·5,1 1	magn. magn. magn.	2+K 2+K 2	114 84 32	80 55 27	213 190 105	
	Metrovic (1947)	(1947 EM2) 1949 EM3	50	? ... 10000 600 ... 40000 ³⁾	keine 2 (Vak.)	1 Platte 2 Platten	5,1·25,4 5 8,2·8,2 2...8	magn. magn.	2+K 3+K	124 90	80 ?	213 210 ²⁾	
England	Plessey (1949)	(1949)	50	400 ... 20000	keine	1 Platte	5,1·25,4 5	magn.	2+K	—	—	—	
Holland	Philips (1947)	1949 11980	40-60-80-100	250 ... 15000 ⁴⁾	keine	Normalfilm	2,4·3,6 40	magn.	3+K	66 ⁵⁾	48 ⁶⁾	118	
Schweden	Schölander (1946)	1949	25 ... 70	1000 ... 30000	keine	8 Platten	8,2·8,2 8	magn.	2+K	108	—	120	
Schweiz	Tüb-Täuber (1945)	1949	30 ... 50	1500 ... 12000 ⁷⁾ 8000 ⁸⁾	keine	1 Platte oder 1 Film	9,0·12,0 1 9,0·12,0 1	magn. u. elektr. ⁹⁾	2+K	138	100	232	
Frankreich	CSF (1946)	1949	65 30 ... 65	... 6500 1000 ... 15000	4 x 4 x	12 Filme oder Normalfilm 20 Filme oder Normalfilm	6,0·6,0 12 2,4·3,6 36 6,0·6,0 12 2,4·3,6 36	elektr. elektr.	2 2	95 ~105	82 92	238 252	

¹⁾ von den elektrostatischen Geräten der Firmen GEC und Farrand, USA, sind dem Verfasser keine näheren Angaben bekannt ²⁾ Geräte mit Kondensator sind durch „+K“ gekennzeichnet ³⁾ bei 50 kV: 1000 ... 100000 ⁴⁾ Vergrößerung auf Leuchtschirm: 1000 ... 60000 ⁵⁾ Kathode-Film: 42 cm ⁶⁾ Objekt-Film: 24 cm ⁷⁾ mit magnetischem Projektiv ⁸⁾ Kondensator magnetisch, Objektiv elektrisch, Projektiv ⁹⁾ magnetisch ^{b)} elektrisch