



SIEMENS

# ZEITSCHRIFT

SIEMENS & HALSKE AG · SIEMENS-SCHUCKERTWERKE AG

20. JAHRGANG · BERLIN · NOV./DEZ. 1940 · HEFT 6

## Die Technik des Siemens-Übermikroskops<sup>\*)</sup>

Von Dr.-Ing. B. v. Borries und Dr.-Ing. E. Ruska, Siemens & Halske AG, Laboratorium für Elektronenoptik.

Die bisher veröffentlichten Beschreibungen des Siemens-Übermikroskops<sup>1)</sup> wendeten sich in erster Linie an die Forscher, deren Arbeiten durch die Auflösungsgrenze des Lichtmikroskops behindert waren. Für diese Kreise war es besonders wertvoll, daß durch Verwendung von Elektronenstrahlen kurzer Wellenlänge die Mikroskopie in das ihr bisher verschlossene Gebiet fortgesetzt werden konnte.

Der Schwerpunkt der früheren Darstellung lag demgemäß darauf, zu zeigen, was das Gerät optisch leistet und in welchem Maße die dem Forscher vom Lichtmikroskop her bekannte Handhabung auf das neue Gerät übertragen worden war (Einlegen von Objekt und Platte, Justierung des Strahls, Scharfstellung und Beobachtung des Bildes, Durchsuchen des Objektes und Belichtung der Aufnahme). Nähere Einzelheiten, die in erster Linie vom geräte-technischen Gesichtspunkt aus gesehen wissenschaftlich sind, wurden bisher nicht veröffentlicht. Dagegen wurde einerseits die Physik der Bildentstehung untersucht, andererseits wurde durch spezielle Arbeiten in den verschiedensten Wissensgebieten der Beweis erbracht, daß durch die Anwendung des neuen Forschungsverfahrens der Übermikroskopie Ergebnisse erzielbar sind, die auf andere Weise nicht gewonnen werden können<sup>2)</sup>; dadurch wurde der Übermikroskopie ein fester Platz unter den wissenschaftlichen Forschungsverfahren gesichert<sup>3)</sup>.

Nachdem nun seit einem Jahre durch den Beginn der Lieferung das Übermikroskop als erstes

hochauflösendes Elektronenmikroskop seinen Weg heraus aus dem Entwicklungslaboratorium in die Praxis genommen hat und schon eine Anzahl solcher Geräte außerhalb, einige weitere Geräte in dem von Siemens & Halske eingerichteten Gastlaboratorium für Übermikroskopie in Betrieb sind, nachdem ferner von anderen Seiten spätergebaute Laboratoriumsgeräte sehr eingehend beschrieben worden sind<sup>4)</sup> ...<sup>5)</sup>, soll jetzt auch vom Siemens-Übermikroskop eine nähere Beschreibung seines elektronenoptischen, vakuumtechnischen und elektrischen Aufbaues sowie seiner Wirkungsweise gegeben werden. Dabei möchten wir einerseits dem Ingenieur einen Einblick in dieses Arbeitsgebiet geben und andererseits dem Benutzer des Übermikroskops sein Gerät nahebringen. Wir werden zeigen können, daß sich das Siemens-Übermikroskop in seiner jetzigen Form ohne weiteres in den Betrieb eines Entwicklungs- und Forschungslaboratoriums einfügt.

### 1. Physikalische Grundlagen.

Das Auflösungsvermögen des Lichtmikroskops ist bekanntlich durch die Wellenlänge des Lichts begrenzt und kann bei der Verwendung sichtbaren Lichtes für gitterförmige Strukturen mit etwa  $0,2 \mu = 200 \text{ m}\mu$  angesetzt werden. Das bedeutet, daß zwei Punkte wenigstens diese Entfernung voneinander haben müssen, um noch getrennt abgebildet zu werden. Durch die Entwicklung des mit Quarzlinse ausgestatteten Ultraviolett-Mikroskops, bei dem das Bild mit ultraviolettem Licht von etwa der halben Wellenlänge des sichtbaren Lichts erzeugt wird, konnte diese Grenze noch auf etwa  $0,1 \mu$  erweitert werden.

\*) Eingegangen 3. 11. 1940.

<sup>1)</sup> B. v. Borries und E. Ruska, Wiss. Veröff. Siemens Bd. 17 (1938), S. 99. Naturwiss. Bd. 27 (1939), S. 577. Z. wiss. Mikrosk. Bd. 56 (1939), S. 317.

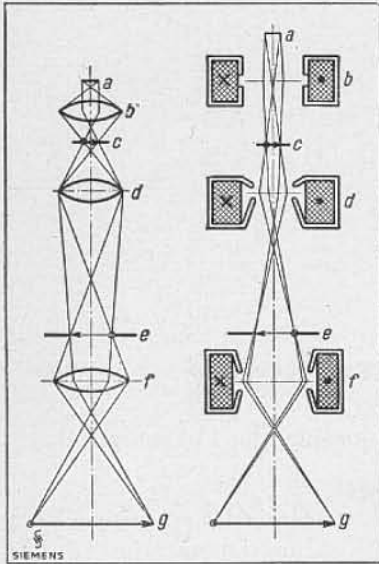
<sup>2)</sup> Vgl. hierzu den zusammenfassenden Bericht der Verfasser in *Ergebn. exakt. Naturw.* Bd. 19 (1940), S. 237.

<sup>3)</sup> Über die vielfältigen Untersuchungsmöglichkeiten vgl. den nachfolgenden Aufsatz von H. Ruska.

<sup>4)</sup> H. Mahl, *Jb. d. AEG-Forschg.* Bd. 7 (1940), S. 43.

<sup>5)</sup> E. Brüche und E. Götz, *Jb. d. AEG-Forschg.* Bd. 7 (1940), S. 60.

<sup>6)</sup> M. v. Ardenne, *Z. Phys.* Bd. 115 (1940), S. 339.



a = Lichtquelle, b = Kondensator, c = Objekt, d = Objektiv, e = Zwischenbild, f = Projektionslinse, g = Endbild.

Bild 1. Schematischer Strahlengang des lichtoptischen Projektionsmikroskops und des Übermikroskops.

Lichtstrahlen ist. Die Elektronenstrahlen zeigen ein ähnliches optisches Verhalten wie Lichtstrahlen, so daß man das Arbeitsgebiet der Elektronenstrahlröhren als Elektronenoptik bezeichnet. Die optischen Eigenschaften der Elektronenstrahlen sind durch die experimentellen Untersuchungen im Laufe der Entwicklungsgeschichte dieses Gebietes bekanntgeworden, so insbesondere ihr geradliniger Verlauf im feldfreien Raum und bei genügend hohem Vakuum (Hittorf 1869), die Absorption und Streuung beim Durchgang durch Materie (Lenard 1894) und die der Brechung entsprechende Ablenkbarkeit in magnetischen und elektrischen Feldern. Die bündelnde Wirkung eines dreh-symmetrischen Feldes auf einen Elektronenstrahl wurde schon früh zur Erzeugung kleiner Schirmquerschnitte bei Versuchen mit Kathodenstrahlen (Wiechert 1899, Rankin 1905, Wehnelt 1906) und später beim Bau von Kathodenstrahl-Oszillographen benutzt. Es konnte schließlich auch der mathematische Beweis für die Linseneigenschaften der erwähnten Felder erbracht werden (Busch 1926). Damit waren die Grundlagen für eine optische Abbildung mittels Elektronenstrahlen gegeben: 1931 bauten Knoll und Ruska das erste Elektronenmikroskop, dessen anfänglich noch geringe Auflösungs- und Vergrößerungsleistungen durch verschiedene Vorschläge (1932) der Verfasser in einem weiteren, 1933 gebauten Instrument so gesteigert werden konnten, daß sie die des Lichtmikroskops erreichten, wenn nicht übertrafen. Die weitere technische Durchbildung dieses Geräts bei Siemens & Halske führte 1937 zum Bau des ersten Siemens-Übermikroskops.

Von dieser durch die Natur des Lichts gegebenen Grenze wird man frei, wenn man Strahlen von wesentlich kürzerer Wellenlänge benutzt. Solche Strahlen stehen in den Kathodenstrahlen zur Verfügung, deren schnellbewegten Elektronen bei entsprechend hoher Beschleunigungsspannung eine Wellenlänge zugeordnet ist, die etwa hunderttausendmal kleiner als die der

Der Strahlengang des Übermikroskops ist im Vergleich zu dem eines lichtoptischen Projektionsmikroskops in Bild 1 dargestellt. Das Endbild wird, wie bei diesem auf einer Mattscheibe, so hier auf einem unter der Einwirkung von Elektronenstrahlen fluoreszierenden Leuchtschirm aufgefangen und beobachtet. Für die photographische Aufnahme wird der Leuchtschirm entfernt, so daß die darunterliegende Platte unmittelbar von den Elektronen getroffen wird. Bei der Konstruktion und der Handhabung des nach dem angedeuteten Prinzip arbeitenden Geräts bedeutet es einen wichtigen Unterschied gegenüber dem Lichtmikroskop, daß Elektronenstrahlen nur im Vakuum geradlinig verlaufen. Der ganze Mikroskopkörper muß deshalb als Vakuumröhre ausgebildet sein, in die Objekte und photographische Platten einzuschleusen sind.

Von den beiden physikalischen Möglichkeiten, die Elektronen durch elektrische oder magnetische Felder zu beeinflussen, ist beim Siemens-Übermikroskop die letztere gewählt worden. Durch eine geeignete Ausbildung der die Magnetfelder erzeugenden Spulen als sogenannte Polschuhspulen gelingt es nämlich, kurze und sehr starke dreh-symmetrische Magnetfelder zu erzeugen, die auch für sehr schnelle, also mit hoher Spannung beschleunigte Elektronenstrahlen kleine Brennweiten ergeben. Mit steigender Beschleunigungsspannung werden die zu untersuchenden Objekte besser durchstrahlt und es treten beim Durchgang der Elektronenstrahlen geringere Verluste auf<sup>7)</sup>, so daß sich der Kreis der mikroskopierbaren Objekte erweitert. Die Kleinheit der Brennweite ist maßgebend für die erzielbare elektronenoptische Vergrößerung. Zudem läßt sich die Brennweite magnetischer Linsen in einfachster Weise durch Regelung der Stromstärke in den Spulen einstellen, so daß die Vergrößerung wie beim Revolverobjektiv des Lichtmikroskops je nach dem zu mikroskopierenden Objekt gewählt werden kann. Die gegenwärtig benutzten Beschleunigungsspannungen und Polschuhobjektive ermöglichen eine 50 bis 70mal bessere Auflösung als beim Lichtmikroskop.

Man spricht beim Lichtmikroskop von einem förderlichen Abbildungsmaßstab, wenn die noch auflösbaren Einzelheiten im Bild 0,3 mm groß sind. Bei einer Auflösung des Lichtmikroskops von 0,2  $\mu$  beträgt daher dieser förderliche Maßstab 1500 : 1. Da die Auflösung des Siemens-Übermikroskops z. Z. 3 bis 5  $\mu$  beträgt, hat der förderliche Abbildungsmaßstab hier den Wert 100 000 : 1 bis 60 000 : 1. Dieser Wert wurde als größter im Gerät selbst erzielbarer Abbildungsmaßstab angestrebt und mit z. Z. 40 000 : 1 annähernd erreicht. Man erfüllt damit die auch beim Lichtmikroskop für selbstver-

<sup>7)</sup> B. v. Borries und E. Ruska, Z. Phys. Bd. 116 (1940), S. 249.

ständig gehaltene Forderung, daß man die aufgelösten Dinge schon im beobachteten Bild wahrnehmen kann, was die Auswahl des aufzunehmenden Bildausschnitts erleichtert und wobei man von den aufgenommenen Bildern im allgemeinen keine nachträgliche photographische Vergrößerung mehr anfertigen muß. Übersichtsbilder geringerer Vergrößerung können in beliebigem Maßstab dank der einfachen Spulenstrom-Reglung ebenfalls eingestellt und aufgenommen werden.

## 2. Aufbau des Siemens-Übermikroskops.

### a) Die Gesamtanordnung.

Bei der Gestaltung des Siemens-Übermikroskops ergab sich eine ganze Reihe von Einzelaufgaben, die nur schrittweise gelöst werden konnten, so daß zwischen der ersten 1937 bei Siemens & Halske entstandenen Versuchsausführung und dem jetzt in Reihenfertigung hergestellten Gerät gewisse Unterschiede bestehen (Bild 2 und 3). Beim

neuen Gerät fällt vor allem auf, daß die vakuumtechnischen und ein Teil der elektrischen Hilfseinrichtungen in einem Hohlständer (a) (in Bild 3) und in einer Schutzwanne (b) zur Abschirmung der Hochspannung vereinigt sind. Auf einem Tischanbau (c) steht das eigentliche Übermikroskop. Unter dem Gerät ist eine Schalttafel angebracht, auf der alle vom Mikroskopierenden benötigten Bedienungsgriffe vereinigt sind. Bis herunter zur Plattenschleuse reichen die Drehsäulen, mit denen das Objekt nach Art eines Kreuztisches verschoben werden kann. Die Plattenschleuse liegt unmittelbar über der Schalttafel. Es ergibt sich also die Annehmlichkeit, daß der Mikroskopierende alle Bedienungsgriffe, vor dem Gerät

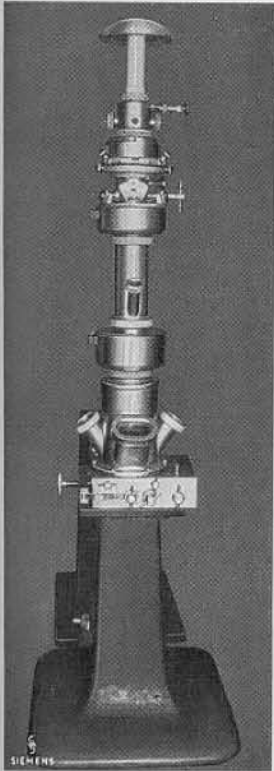
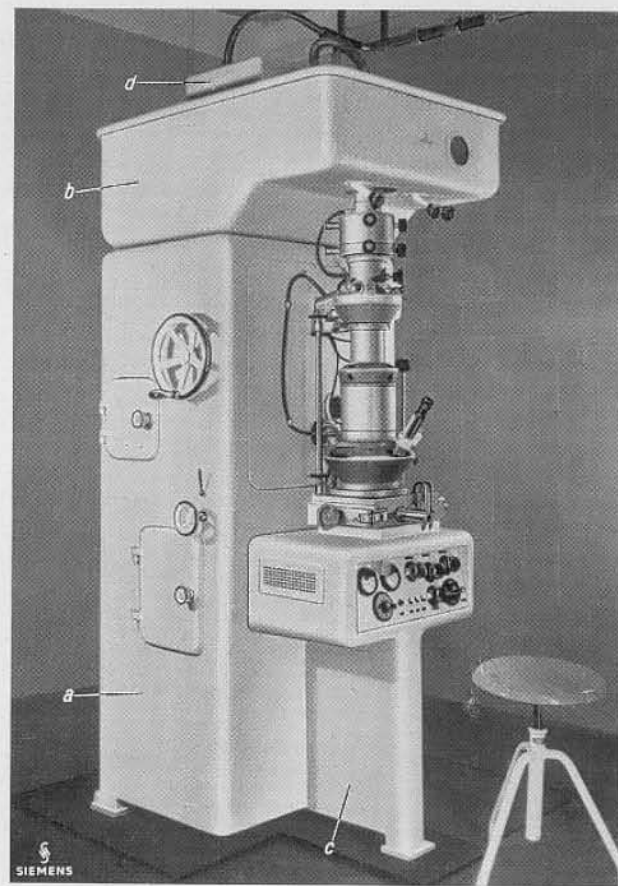


Bild 2.  
Siemens-Übermikroskop  
nach Ruska und v. Borries,  
Versuchsgesamtgerät.

sitzend, in bequemer Haltung ausführen kann, während er durch ein großes Beobachtungsfenster mit beiden Augen das Bild betrachtet. Durch Heben des Kopfes kann er, ohne aufzustehen, über ein in-

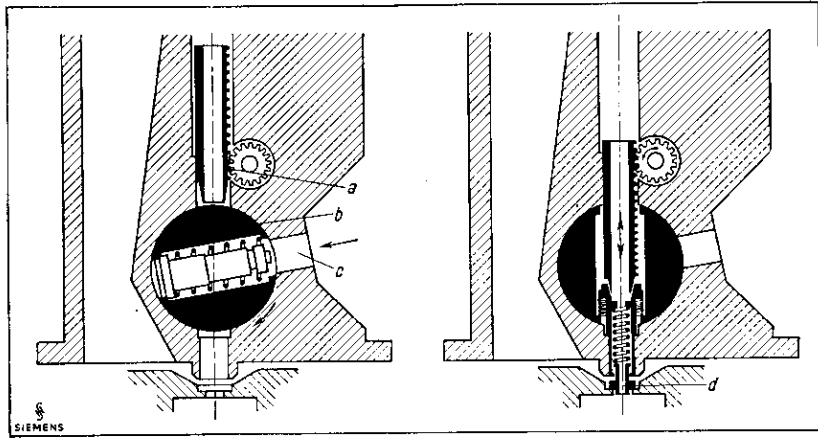


a = Hohlständer, b = Schutzwanne, c = Tischanbau, d = Hochspannungskasten.

Bild 3. Siemens-Übermikroskop nach Ruska und v. Borries.

nerhalb des Übermikroskops angeordnetes Prisma das Zwischenbild beobachten. Auch die Schalt- und Regelknöpfe zur Bedienung und Justierung des Elektronenstrahlrohres sind vom sitzenden Beobachter bequem erreichbar. Endbild und Zwischenbild können gleichzeitig noch von zwei anderen seitlich sitzenden Beobachtern durch gleich große Öffnungen hindurch betrachtet werden.

Der Vakuumkörper des Übermikroskops muß wegen der optischen Anforderungen an die gegenseitige Zentrierung der Linsen äußerst genau gearbeitet sein. Seine einzelnen Bestandteile müssen daher auch vor mechanischer Beschädigung geschützt werden. Dabei sind alle Bauteile wegen der Größe des Geräts und der Bedingung der Vakuumdichtigkeit wesentlich weniger leicht und handlich als die entsprechenden Teile eines Lichtmikroskops. Es würde daher unbequem sein, wenn zu einer gelegentlich notwendig werdenden Reinigung oder zum Auswechseln der Leuchtschirme oder Polschuhe alle Einzelteile abgebaut und getrennt aufbewahrt werden müßten. Daher wurde eine Einrichtung getroffen, die die wichtigen Teile ohne Abbau des Geräts zugänglich macht (Bild 4). Ein vom Hohlständer ausgehender Schwenkarm hält den Oberteil



a = Objekttrieb, b = Schleusenküken, c = Einschleusöffnung, d = Objektpatrone.

Bild 9. Schematischer Schnitt durch die Objektschleuse.

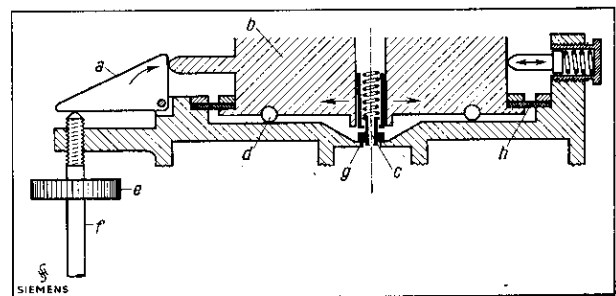
Belag auf der blanken Fläche zeigen, mit je einem besonderen Schlüssel herausgenommen und durch Schwabbeln oder durch Bearbeitung mit feinstem Polierpapier wieder auf Hochglanz gebracht werden. Die Steuerhülse muß dabei auch innen blank gemacht werden.

Die Kondensorspule ist fest zum Elektronenstrahlrohr angeordnet und wird gemeinsam mit dessen Anode von durchlaufendem Wasser gekühlt. Das Innenrohr der Spule ist, wie bei den anderen Spulen, durch einen Ring aus unmagnetischem Werkstoff zum Austritt des magnetischen Flusses unterbrochen. Damit man den Strahl allseitig um kleine Winkel mit dem Objekt als Mittelpunkt schwenken und auch parallel zu sich selbst verschieben kann, ist der Bestrahlungsteil über drei Kugeln auf einem Stahlring gelagert, dessen Oberfläche einen Teil aus einer um das Objekt als Mittelpunkt gelagerten Kugel bildet. Ferner läßt sich dieser Stahlring ebenfalls auf Kugeln gegenüber der Objektschleuse des Mikroskops verschieben. Zum Antrieb beider Bewegungen dienen je zwei Stell-schrauben, die entgegen dem Druck gegenüberliegender Federn wirken (vgl. Bild 7). Den Grad und die Richtung der Verstellung kann man an zwei Ringspalten nicht nur sehen, sondern auch im Dunkeln abfühlen. Am unteren Ringspalt erkennt man dabei die Verschiebung, am oberen die Schwenkung. Während die Abdichtung der einzelnen Teile des Übermikroskops im allgemeinen durch sogenannte Schiffe hergestellt ist, wird sie hier, um eine Bewegung des einen Teils gegen den anderen zu ermöglichen, durch eine besonders geformte Gummihülse (7 k) bewirkt. Die Kondensorkonstruktion erlaubt also bei Hellfeldaufnahmen eine genaue Ausrichtung des Strahls, bei Dunkelfeldaufnahmen die notwendige Schrägstellung des Strahls, derart, daß nur abgebeugte Strahlen in die Objektivblende gelangen.

### c) Die Objektschleuse mit Verschiebevorrichtung.

Bei der Übermikroskopie werden die zu untersuchenden Präparate auf einem Trägerfilm oder auch freitragend<sup>9)</sup> über die feine Bohrung (etwa  $0,1 \dots 0,03 \text{ mm } \varnothing$ ) eines Metallscheibchens gebracht. Die runde Objektträgerblende des Übermikroskops wird dann an einer Patrone befestigt (Bild 9) und mittels eines Schlüssels in die Einschleusöffnung (c) eingeführt. Die Patrone gelangt dadurch in die Bohrung des Schleusenküken (b) und wird durch

eine einfache Drehung in die Mittelachse des Übermikroskops gebracht. Am Küken sind Anschläge vorgesehen, die seine Drehung nach beiden Seiten in der richtigen Stellung begrenzen. Durch einen Objekttrieb, bei dem ein von außen über einen konischen, fettgedichteten Betätigungsschliff angetriebenes Ritzel auf eine Zahnstange wirkt, wird die Patrone aus der Bohrung des Schleusenküken heraus gegen die darunter liegende Objektivspule geschoben. Dabei wird die gegenüber der Patrone federnde Objektivblendenfassung auf den Objektivpol-schuh gedrückt, so daß die Reibung jede ungewollte Querbewegung der Objektivblende zur Objektivachse verhindert. Auf diese Weise wurde ein Schwingen des Bildes auf dem Leuchtschirm bzw. der Platte verhindert, das zu verwackelten Aufnahmen führen könnte. Die Verhinderung der Bewegung zwischen Objekt und Objektiv durch Ausnutzung der Reibung wurde in einer anderen Konstruktion bereits durch v. Ardenne<sup>10)</sup> erfolgreich angewandt. Um das Objekt absuchen zu können, ist eine Anordnung



a = Kniehebel, b = Objektschleuse, c = Patrone, d = Laufkugeln, e = Verstell-schrauben, f = Drehsäule, g = Blendenfassung, h = Gummidichtung.

Bild 10. Schematischer Schnitt durch die Objektverschiebung.

vorgesehen, die ähnlich wie der Kreuztisch eines Lichtmikroskops arbeitet (Bild 10). Zum Verschieben

<sup>9)</sup> Vgl. die nachfolgende Arbeit von H. R u s k a.

<sup>10)</sup> M. v. A r d e n n e, Naturwiss. 28 (1940), S. 113.

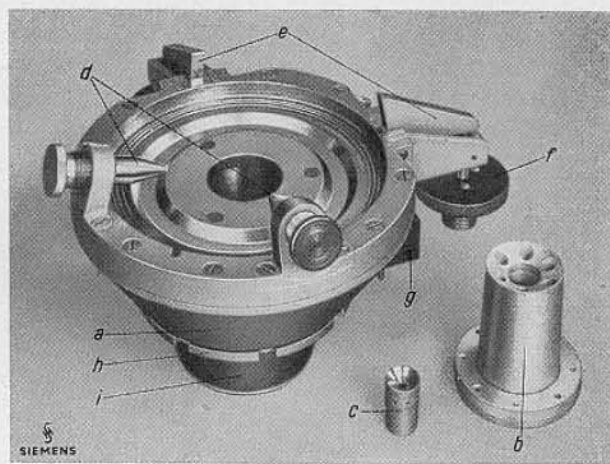
dienen zwei über Drehsäulen (*f*) angetriebene Verstellerschrauben (*e*), die über Kniehebel (*a*) wirken; durch Handräder oberhalb der Plattenschleuse und in Höhe der Objektivspule werden die Drehsäulen betätigt. Dadurch ist erreicht, daß der Beobachter im Sitzen und in bequemer Haltung das Objekt verschieben kann. Das Ausschleusen des Objekts geht in umgekehrter Reihenfolge vor sich. Man dreht mit dem Objekttrieb die Patrone nach oben und kann darauf die Schleusenbohrung wieder aus der Gerätachse herausdrehen. Beim Einschleusen gelangen nur wenige Kubikzentimeter Luft in das Vakuum, die von der Pumpe schnell wieder abgesaugt werden. Insgesamt dauert beim Objektwechsel die Unterbrechung der Bildbeobachtung etwa eine Minute. Die rasche Objektwechsellmöglichkeit gestattet in einfacher Weise ohne jede Zusatz-einrichtung am Mikroskop die Aufnahme von Stereobildern der zu untersuchenden Objekte. Hierzu werden diese lediglich in besondere Stereopatronen eingesetzt, deren Blendenfassungen um wenige Grad gegenüber der gewöhnlichen Lage geneigt sind und in sich um  $180^\circ$  gedreht werden können. Man macht damit hintereinander zwei Aufnahmen der gleichen Objektstelle, wobei man die Blendenfassung bei der zweiten Aufnahme um  $180^\circ$  gegen die erste Aufnahme verdreht.

#### d) Objektivspule mit Objektivtubus.

Die Objektivspule (Bild 11) besteht aus einem wassergekühlten eisernen Spulenkörper (*a*) und dem Spulenkörper, dessen innerer Zylinder eine konische Bohrung zur Aufnahme des Polschuhträgers (*b*) hat und durch einen unmagnetischen Ring zum Übertritt des magnetischen Flusses in den Polschuhträger unterbrochen ist. Der Polschuhträger enthält mehrere Bohrungen, damit die oberen Teile des Übermikroskops durch die unten saugende Pumpe entleert werden können. Die die eigentlichen Linsen bildenden Polschuhe (*c*) können ausgewechselt werden.

Das Objektiv hat derzeit eine Mindestbrennweite von 2 mm bei 60 kV, so daß bei 320 mm Bildweite in erster Stufe ein Abbildungsmaßstab von 160 : 1 erreicht wird. Da bei höheren Strahlspannungen die Mindestbrennweite etwas größer wird, beträgt bei 85 kV-Strahlspannung der Abbildungsmaßstab im Zwischenbild nur 140 : 1. Gewöhnlich wird mit diesen Mindestbrennweiten gearbeitet. Kleinere Abbildungen werden durch besondere Objektblendenfassungen erreicht, die das Objekt nicht so nahe an das Spulenfeld bringen.

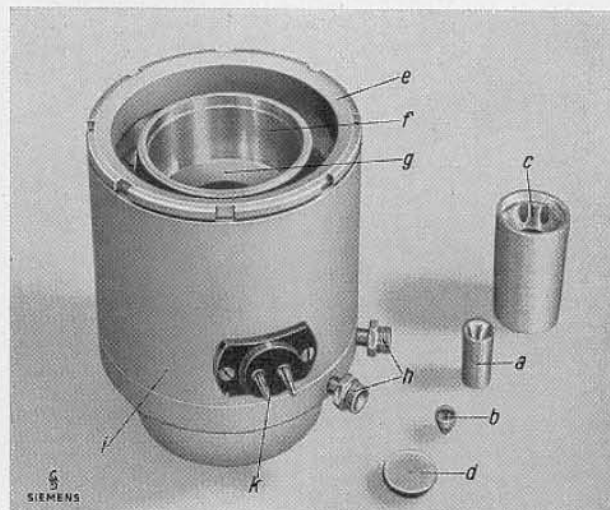
Der Objektivtubus hat insgesamt drei Paare Einblicköffnungen erhalten, so daß bis zu drei am Übermikroskop arbeitende Beschauer stehend oder — über im Inneren des Tubus ange-



*a* = Spulenkörper, *b* = Polschuhträger, *c* = Polschuh, *d* = Gegenfedern der Objektverschiebung, *e* = Kniehebel der Objektverschiebung, *f* = oberes Handrad für Drehsäule, *g* = Stromanschluß, *h* = Abdrückring, *i* = Anschlußschliff.

Bild 11. Ansicht des Objektivs.

brachte Prismen — auch sitzend den Zwischenbildleuchtschirm beobachten können. Das Profil der Objektivspule und des Objektivtubus ist der Kopfform angepaßt; hierdurch wird eine kurze erste Abbildungsstufe erzielt, ohne den Einblick auf das Zwischenbild zu stören. Die Abschirmung gegen magnetische Störfelder geschieht auf dieser empfindlichsten Strecke zwischen Objekt und Zwischenbild mittels eines aus drei Mumetall-Zylindern bestehenden Abschirmeinsatzes.



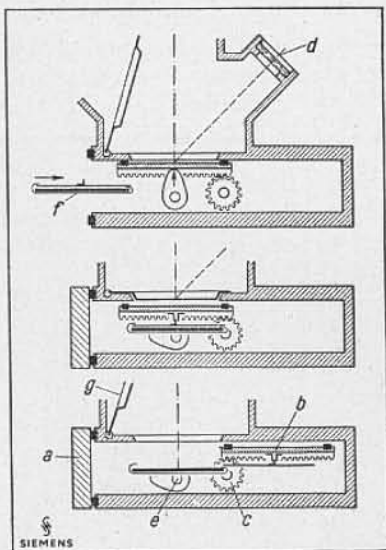
*a* = Polschuhe, *b* = Zwischenbildblende, *c* = Polschuhträger, *d* = Zwischenbild-Leuchtschirm, *e* = Abdrückring, *f* = Anschlußschliff, *g* = Spulenkörper, *h* = Wasseranschlüsse, *i* = Spulenkörper, *k* = Stromanschluß.

Bild 12. Ansicht des Projektivs.

#### e) Projektivspule mit Projektivtubus.

Die Projektionsspule (Bild 12) ist ähnlich wie die Objektivspule aufgebaut, jedoch haben die Polschuhe (*a*) keine Öffnungsblende. In den oberen

Polschuh wird die als konisches Hütchen ausgebildete Zwischenbildblende (b) eingelegt, während der Polschuhträger (c) den mit einem konischen Sitz versehenen Zwischenbildleuchtschirm (d) aufnimmt, auf dem ein Maßstab eingezeichnet ist. Auch hier ist ein Austausch der Polschuhe möglich. Bei einer Strahlspannung von 60 kV erreicht man im Projektiv eine Mindestbrennweite von 1,1 mm, so daß sich bei einer Bildweite von 260 mm in zweiter Stufe ein Abbildungsmaßstab von 250 : 1 ergibt. Die Endabbildung beträgt also 40 000 : 1. Verwendet man einen Projektivpolschuh mit einer zwischen 1,25 und 3,7 mm einstellbaren Brennweite, so beträgt der zweite Abbildungsmaßstab 180 : 1 bis 60 : 1 und die Endabbildung 29 000 : 1 bis 11 000 : 1. Mit den Objektivblendenfassungen für größere Objektivbrennweiten lassen sich entsprechend kleinere Endabbildungen erreichen. Die großen Fenster des Projektivtubus ermöglichen drei Beobachtern gleichzeitig einen Einblick mit beiden Augen. Zur besseren Beobachtung und zum Scharfeinstellen kann ein Lichtmikroskop mit etwa 4facher Vergrößerung in einer besonderen Vorrichtung angesetzt und vor jedes Fenster geschwenkt werden.

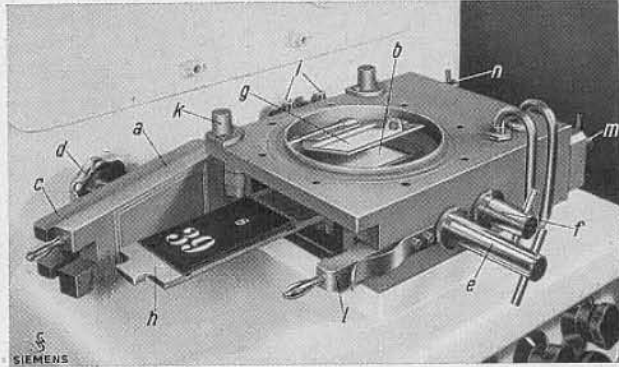


a = äußeres Schleusentor, b = inneres Schleusentor, c = Förderschiff, d = Einblickfenster, e = Knebelschiff, f = Kassette, g = Expositionsschirm.

Bild 13. Schematischer Schnitt durch die Plattenschleuse.

## f) Plattenschleuse.

Mit Hilfe der Plattenschleuse (Bild 13 und 14) bringt man die Aufnahmeplatte in das Vakuum hinein und wieder heraus. Sie enthält zu diesem Zweck ein seitlich in Scharnieren gelagertes äußeres Schleusentor (a) und ein quer zur Achse des Übermikroskops liegendes inneres Schleusentor (b). Das äußere, durch das die Plattenkassette (13 f, 14 h)



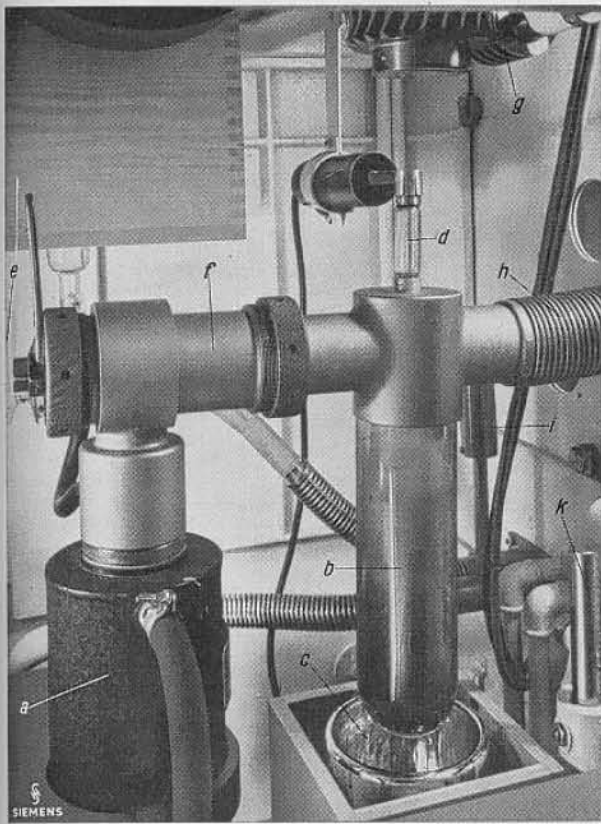
a = äußeres Schleusentor, b = inneres Schleusentor, c = Spannbrücke, d = Druckschraube, e = Knebelschiff, f = Förderschiff, g = Expositionsschirm, h = Kassette, i = Wasseranschlüsse, k = linke Drehsäulenführung, l = Schnapper für Spannbrücke, m = Schalthahn, n = Expositionsschliff.

Bild 14. Ansicht der Plattenschleuse.

eingeführt wird, läßt sich mit einer Spannbrücke (14 c) und einer Druckschraube (14 d) vakuumdicht verschließen. Das innere, das auf seiner Oberseite einen Leuchtschirm trägt, kann mit einem Knebelschiff (e) angehoben und damit ebenfalls vakuumdicht gegen eine rechteckige Aussparung auf der Oberseite der Plattenschleuse gedrückt werden. Bei dem Entknebeln, das nur möglich ist, wenn im Schleusenraum der gleiche Druck wie im Mikropierraum herrscht, fällt dieses innere Tor wenige Millimeter herunter und läßt sich dann mit einem durch den Förderschiff (13 c, 14 f) angetriebenen Ritzel aus dem Strahlengang seitlich herausbewegen, wobei es den Kassettendeckel mitnimmt. Auf dem unmittelbar über dem inneren Schleusentor angebrachten Expositionsschirm (g) beobachtet man das Elektronenbild bis zur Aufnahme. Nach dem Beiseiteschieben des inneren Schleusentors klappt man den Expositionsschirm für die Dauer der Aufnahme hoch. Bei Verwendung normaler Platten (Agfa normal 6,5 x 9 cm) dauert die Belichtung etwa 1 bis 2 Sekunden. Nach dem Zurückschieben des inneren Tors mittels des Förderschiffs und seiner Anknebelung mittels des Knebelschiffs kann mit einem seitlich angebrachten Schalthahn (14 m) in die Plattenschleuse Luft gelassen werden, damit man das äußere Schleusentor öffnen und die Plattenkassette herausnehmen kann. Bei der beträchtlichen Leistung der Pumpanlage ist es möglich, den Plattenwechsel vom Abschalten bis zum neuen Einschalten der Hochspannung in einer Minute durchzuführen.

## g) Die vakuumtechnische Ausrüstung.

Die Pumpanlage hält ein Vakuum von mindestens  $10^{-4}$  Torr aufrecht und saugt die beim Einschleusen von Objekten und Platten eindringenden geringen Luftmengen in kürzester Zeit ab. Das



a = Diffusionspumpe, b = Kühlfalle, c = Kühlgefäß, d = Prüfröhrchen, e = Vorvakuumgefäß mit Absperrhahn, f = Diffusionspumpenhahn, g = Trieb für Schwenkarm, h = Federkörper, i = Manometer, k = Trieb für Kühlgefäß.

Bild 15. Vakuumeinrichtung im Hohlständer.

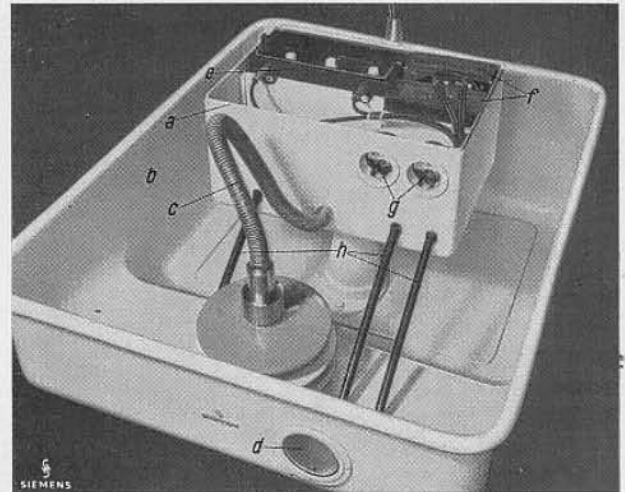
Vakuum wird in zwei Stufen erzeugt. Zum Herstellen des Vorvakuums dient eine umlaufende Ölpumpe, die auf einer Gummiplatte und in einem schalldämpfenden Gehäuse so neben dem Übermikroskop aufgestellt werden kann, daß ihr Geräusch beim Arbeiten nicht stört. Sie ist über einen Absperrhahn mit einem Vorvakuumgefäß verbunden. Zur Überwachung des Vorvakuums dient ein Quecksilbermanometer, das in die von der Ölpumpe nach der Plattenschleuse führende Vorvakuumleitung eingesetzt ist und von außen beobachtet werden kann (Bild 15). Die Vorvakuumpumpe erzeugt ein Vakuum von unter 5 mm Quecksilbersäule, so daß die Hochvakuumpumpe, eine dreistufige Quecksilber-Diffusionspumpe (a) arbeiten kann. Die Arbeitsweise einer solchen Pumpe ist bekanntlich so, daß Quecksilberdampf durch Diffusionspalte strömt und dabei die Luftteilchen mit sich reißt. Der Quecksilberdampf wird durch eine Gasheizung erzeugt. Damit die Quecksilberdämpfe nicht in das zu evakuierende Gehäuse des Übermikroskops eindringen, werden sie in einer sogenannten Kühlfalle (b) kondensiert. Diese wird mit flüssiger Luft beschickt und bewirkt gleichzeitig, daß sich die vom Dichtungsfett und Dichtungsgummi abgegebenen Gase

kondensieren. Das doppelwandige evakuierte Kühlgefäß (c) mit der flüssigen Luft steht in einem Schutzkasten aus Holz, der auf einem Fahrstuhl untergebracht ist. Bei der Inbetriebnahme des Übermikroskop schiebt man diesen Schutzkasten durch eine seitliche Öffnung in den Hohlständer, hebt ihn durch Betätigen eines Handrades in die Endlage und stellt ihn hier fest. Eine Füllung mit flüssiger Luft pflegt im allgemeinen für einen ganzen Arbeitstag auszureichen.

Zum leichten und schnellen Prüfen des Vakuums dient eine Hochfrequenzentladung, die mit einem Druckknopf auf der Schalttafel kurzzeitig einzuschalten ist und deren Entladungsfarbe in einem Prüfröhrchen (d) auf der Pumpleitung durch ein Fenster im Hohlständer den Grad des Vakuums erkennen läßt.

### h) Die elektrische Ausrüstung.

Der Umfang der elektrischen Ausrüstung ergibt sich aus der Arbeitsweise des Geräts. Erforderlich sind nämlich: Eine regelbare Heizspannung von 6 V zum Aufheizen der Glühkathode, eine regelbare negative Vorspannung von maximal 200 V für die Steuerhülse, welche die Glühkathode umgibt, eine zwischen 40 und 85 kV einstellbare Gleichspannung zum Beschleunigen der Elektronen sowie der Strom für die Polschuhspulen in der Größenordnung von 4 bis 5 A bei 60 V. Dazu kommen 220 bzw. 380 V für den Antriebsmotor der Vorvakuumpumpe und



a = Hochspannungskasten, b = geerdete Schutzwanne, c = Schlauchleitung, d = Einblickfenster für Meßgeräte, e = Sammlerbatterie, f = Batterien für Vorspannung, g = Meßgeräte für Heizstrom und Vorspannung, h = Isolierwellen für Schalter und Regler.

Bild 16. Schutzwanne mit Hochspannungskasten.

gegebenenfalls für die Heizung der Hochvakuumpumpe.

Die Kathodenheizspannung wird einem Sammler entnommen, der ebenso wie die Batterien für

die Steuer-Vorspannung in einem auf negativer Spannung befindlichen Hochspannungskasten (a) innerhalb der geerdeten Schutzwanne (b) untergebracht ist (Bild 16). Der Hochspannungskasten hat das gleiche Potential wie die Steuerhülse des Elektronenstrahlrohrs und ist mit dieser durch eine metallische Schlauchleitung (c) verbunden, in deren Innerem die beiden Heizleitungen für die Kathode liegen. Vorspannung und Heizstrom können mittels Isolierwellen (h) und Drehknöpfen, die aus der Schutzwanne herausragen (vgl. auch Bild 6, k, l, m) geschaltet und geregelt werden. Die zugehörigen Meßgeräte (s. Bild 16, g) haben Skalenbeleuchtung und lassen sich durch das Einblickfenster (d) in der Schutzwanne beobachten.

Die Hochspannung wird in einer getrennt aufgestellten Anlage in der Weise erzeugt, daß die durch Spannungskonstanthalter beruhigte Netzspannung über einen Stufentransformator auf die hohe Spannung umgespannt, dann in Ventilröhren gleichgerichtet und mittels einer Kondensator-Widerstandskette geglättet wird. Dabei befinden sich Hochspannungsumformer, Glühventile mit zugehörigen Heizwandlern und ein erster Glättungskondensator in einem ölgefüllten Gehäuse. Der Spulenstrom wird einer Sammlerbatterie entnommen, für die ein netzanschlußfähiger Ladesatz vorhanden ist. Da die Brennweite der Linsen und damit der optische Zustand des Bildes von der Strahlspannung und dem Spulenstrom abhängen, müssen beide genau konstant gehalten werden<sup>11)</sup>. Bei der Hochspannung dient dazu der zwischen Netz und Hochspannungstransformator liegende zweistufige Magnetregler; der dem Sammler entnommene Spulenstrom ist ohnehin genügend konstant. Während man beim Lichtmikroskop bekanntlich dadurch scharf einstellt, daß man den Abstand des Objektivs vom Objekt ändert, bietet die Elektronenoptik die Möglichkeit, die Brennweite der Linsen zu ändern, indem man die Beschleunigungspannung oder den Linsenstrom ändert. Eine Erhöhung der Beschleunigungsspannung wirkt sich in einer Vergrößerung der Brennweite aus, während eine Vergrößerung des Spulenstroms die Brennweite verkürzt.

Die für die Bedienung des Übermikroskops notwendigen Schalter und Spulenstromregler sind auf einer Schalttafel unterhalb des Übermikroskops (Bild 17) angebracht. Der links unten sichtbare Schalter hat drei Aufgaben zu erfüllen: Er hebt zunächst die Erdung der Hochspannungsleitung auf, indem er den Motorantrieb einer Erdungstange einschaltet. Weiterhin schaltet er die Heizung der Ventilröhren des Hochspannungserzeugers ein und endlich schaltet er die Hochspannung ein. Von den beiden Instrumenten zeigt das linke die Größe des Strahlstroms an, die je nach Bedarf mit dem linken der aus der Schutzwanne herausgeführten Drehknöpfe einzustellen ist, während das rechte die Primärspannung des Hochspannungstransformators anzeigt und daraus einen Rückschluß auf die gerade eingestellte Hochspannung zuläßt. Der rechts befindliche Schalter schaltet sämtliche Spulenströme ein, zu deren Regelung die Drehknöpfe dienen. Durch die Stromänderung in der Kondensatorspule (linker Drehknopf) wird die Bildhelligkeit geändert. Mit den beiden mittleren Drehknöpfen wird der Strom in der Objektivspule geändert und dadurch die Scharfeinstellung grob und fein bewirkt. Der rechte Drehknopf ändert den Strom in der Projektivspule und stellt dadurch die zweite Vergrößerungsstufe ein.

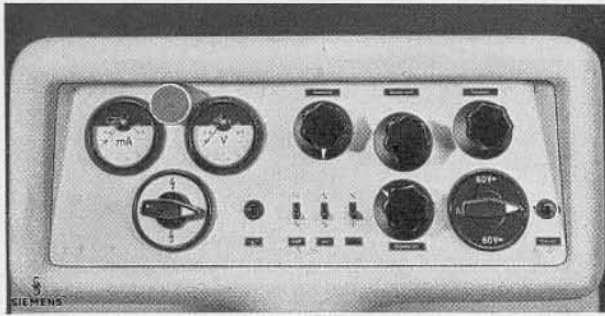


Bild 17 Schalttafel.

Bei der Bedienung des Übermikroskops sind verschiedene Gruppen von Handgriffen zu unterscheiden, die verschieden häufig und bei verschiedenen Anlässen erforderlich sind. Es handelt sich um

3. Das Arbeiten mit dem Übermikroskop.

a) Herstellen der Betriebsbereitschaft,  
 b) Einstellen des Elektronenstrahls,  
 c) Scharfstellen des Bildes, Absuchen des Objekts und Aufnahme,  
 d) Wechsel von Objekt und Platte.

Die Betriebsbereitschaft muß bei Beginn jedes Arbeitstages neu hergestellt werden, während die Einstellung des Elektronenstrahls nach dem Wechsel der Glühkathode oder der Vergrößerungsbereiche neu durchzuführen ist. Diese Arbeiten treten daher nur in größeren Abständen auf. Die unter c und d genannten Handgriffe sind bei der Benutzung des Geräts dauernd notwendig.

<sup>11)</sup> E. R u s k a, ETZ 61 (1940), 889.



#### a) Herstellen der Betriebsbereitschaft.

Kühlwasser, Vorvakuumpumpe und Diffusionspumpenheizung sind anzustellen und die Kühlfalle ist mit flüssiger Luft zu beschicken. Dazwischen sind in der Reihenfolge der am Mikroskop angebrachten Vorschrift die Vakuümhähne zu betätigen und das Vakuum zu überprüfen. Außerdem ist die für die Untersuchungen gewählte Strahlspannung einzustellen. Schließlich gehört hierher die nach einer Betriebszeit von einigen Tagen durchzuführende Auswechslung des Heiz-Sammlers im Hochspannungskasten.

#### b) Einstellen des Elektronenstrahls.

Nach Auswechslung der Glühkathode ist zunächst wieder der vorgeschriebene Heizstrom von 2,3 bis 2,5 A und der übliche Strahlstrom von 0,02 bis 0,1 mA einzustellen. Sodann muß der Strahl durch Schwenken und Verschieben des Bestrahlungsteils so eingestellt werden, daß er bei ausgeschaltetem Spulenstrom mit maximaler Intensität durch die Objektiv- und Zwischenblende hindurch auf den Endbildschirm fällt. Dabei wählt man als Ausgangstellung zweckmäßigerweise die mechanisch zentrierte (vgl. auch die Ausführungen am Ende des Abschnitts 2 b). Nunmehr schleust man ein Objekt ein und beobachtet bei eingeschaltetem Spulenstrom Zwischen- und Endbild. Die Kondensordurchflutung selbst steigert man dabei allmählich schrittweise bis zur gewünschten Helligkeit; dabei sucht man jeweils das Höchstmaß der Helligkeit für eine bestimmte Kondensordurchflutung durch Querverschiebung des Bestrahlungsteils auf.

#### c) Scharfstellen des Bildes, Absuchen des Objekts und Aufnahme.

Um das Bild scharfzustellen, wird zunächst der Grobregler für das Objektiv und dann der Feinregelwiderstand betätigt. Sehr schnell hat man denjenigen Grad von Bildscharfe erreicht, der zur Beobachtung ausreicht, so daß man das Objekt durch Verschieben mittels der Drehsäulen absuchen kann. Hat man sich einen Überblick über das Präparat verschafft und die zur Aufnahme geeigneten Objektteile ausgesucht, kann eine Aufnahme gemacht werden. Das Wiederfinden der interessierenden Einzelheiten im Endbild wird dadurch erleichtert, daß man sich im Zwischenbild die Lage der Teilchen merken kann. Kurz vor der Aufnahme wird man noch eine genaue Fokuseinstellung vornehmen; dabei bedient man sich des schwenkbaren Lichtmikroskops. Meist stellt man auf die Kantenschärfe markanter Objekte ein, häufig ist es aber auch besser, den Gesamtkontrast eines Bildes zur Beurteilung der Schärfe heranzuziehen.

Das Vorgehen bei der Aufnahme selbst wurde oben anlässlich der Beschreibung der Plattenkassette dargestellt. Um die Vergrößerung des gewonnenen Bildes zu bestimmen, muß aus einer lichtmikroskopischen Messung der Bohrungsdurchmesser der Objektblende genau bekannt sein. Das Bild der Bohrung erscheint im Zwischenbild als helleuchtende Scheibe und kann mittels der auf dem Zwischenbildschirm angebrachten Millimeterteilung, gegebenenfalls unter Zuhilfenahme des Mikroskops, gemessen werden. Aus dem Verhältnis beider Werte ergibt sich die erste Vergrößerungsstufe, die noch um etwa 10 % zu erhöhen ist, weil sich der Zwischenbildschirm etwas oberhalb der Zwischenbildebene befindet. In entsprechender Weise erhält man das Maß der zweiten Vergrößerungsstufe: Etwa in der Zwischenbildebene kurz vor der Projektivlinse befindet sich die Zwischenbildblende, deren Durchmesser das auf der Lichtbildplatte ausgeleuchtete Kreisfeld bestimmt. Das Verhältnis beider Durchmesser ergibt den Abbildungsmaßstab der zweiten Stufe. Das Produkt beider Abbildungsmaßstäbe ergibt die Gesamtvergrößerung.

#### d) Wechsel von Objekt und Platte.

Beim Wechsel von Objekt und Platte soll die Hochspannung und die Kathodenheizung ausgeschaltet werden. Die einzelnen Handgriffe sind in der vorgeschriebenen Reihenfolge zu betätigen. Sie folgen aus der oben schon beschriebenen Wirkungsweise beider Schleusen und bedingen für jeden Schleusakt nur eine Beobachtungsunterbrechung von einer Minute.

Die Bedienung des Übermikroskops ist so leicht erlernbar, daß ein Sachbearbeiter schon nach kurzer Anlernzeit die wissenschaftlichen Arbeiten an dem Gerät aufnehmen kann.

Mit erst wenigen Siemens-Übermikroskopen sind in den beiden letzten Jahren rund 10 000 Aufnahmen auf den verschiedensten Arbeitsgebieten gemacht worden. Diese Arbeit wurde zum überwiegenden Teil von den der Elektronenoptik und der Vakuumtechnik meist fernstehenden Fachleuten der bearbeiteten Gebiete geleistet. Die Zahl der gewonnenen Bilder möge einen Maßstab dafür abgeben, wie weit das gesteckte Ziel heute erreicht ist, ein zuverlässiges neues Werkzeug der mikroskopischen Forschung zu schaffen.

Wir danken allen, die durch ihre konstruktive, experimentelle und fabrikatorische Mitarbeit die Entwicklung des Siemens-Übermikroskops gefördert haben; besonders wertvolle Vorschläge stammen von den Herren H. O. Müller, Dr. H. Ruska und H. Schuchmann.