

biert Neutronen, wobei ein kurzlebiges, β -strahlendes Am^{242} entsteht (Halbwertszeit 18 Stunden). Dieses liefert so das Cm^{242} . Noch einmal als Reaktionsformel geschrieben: $\text{Am}^{241} (n, \gamma) \text{Am}^{242}$; $\text{Am}^{242} \xrightarrow{\beta^-} \text{Cm}^{242}$. Mit Hilfe dieses Prozesses wurden wägbare Mengen Curium gewonnen.

Die chemischen Studien an den Transuranen legten die Struktur der Elektronenhülle der schwersten Elemente klar. Diese bilden die Reihe der „Actinide“; denn die meisten der Schritt für Schritt neu aufzunehmenden 14 Elektronen der auf das Actinium (OZ 89) folgenden 14 Elemente gehen in die innere 5-f-Schale. Ganz entsprechend wird bei den „Lanthaniden“ (seltene Erden) die noch tiefer liegende 4-f-Schale aufgefüllt, wie man schon lange weiß.

Es ist interessant, daß von 96 bekannten Elementen 94 in Mengen isoliert werden konnten, die

groß genug waren, sie zu sehen und zu wägen. Nur bei Astatin und Francium gelang das nicht, und es ist zweifelhaft, ob es je möglich sein wird.

Jedes künftig neuentdeckte Element muß eine Ordnungszahl haben, die größer ist als 96, d. h. es muß zu den Transuranen gehören. Es ist nicht unwahrscheinlich, daß solche Entdeckungen statthaben werden, doch die Hauptschwierigkeit liegt in der Beschaffung des Ausgangsmaterials. Vermutlich werden die stabilsten, bzw. langlebigsten Isotope der Elemente 97 und 98 die Massenzahl 247 und 248 oder höher haben. Daran sieht man ganz deutlich, daß das Problem im Ausgangsmaterial steckt; denn das schwerste, jetzt bekannte Isotop ist Cm^{242} . Die wirklich detaillierten Kenntnisse vom Aufbau der Atome dieses Bereiches machen einige zutreffende Abschätzungen betreffs der chemischen Eigenschaften derartiger neuer Elemente möglich. Das bedeutet eine beträchtliche Hilfe für ein solches Programm.

Der Weg vom Licht zur Elektronenstrahlung in der Mikroskopie

Von Dr.-Ing. habil. E. Ruska, Berlin

Unser heutiges Wissen und unsere Vorstellungen vom Naturgeschehen sind undenkbar ohne die Hilfsmittel, die der menschliche Geist im Lauf von Jahrhunderten erdacht hat, um trotz der begrenzten Leistungsfähigkeit unserer Sinne den Umfang des für uns Wahrnehmbaren zu erweitern. Wir können uns heute nur schwer ein Bild davon machen, in welchem Maß unsere Naturerkenntnis ohne diese Hilfsmittel zurückgeblieben wäre. Von unseren Sinnen dominiert der Gesichtssinn, mit dem wir uns zunächst die Bilder unserer körperlichen Umwelt verschaffen. Von diesen Bildern her sind dann aber auch viele unserer geistigen Vorstellungen und Begriffsbildungen bestimmt. Größe und Gestalt, Helligkeit und Farbe der Dinge bringt uns das Licht durch das Auge zum Bewußtsein. Die Wissenschaft hat durch verschiedene Arten abbildender optischer Geräte die Qualitäten unserer bildhaften Umweltseindrücke erhöht. So haben Fernrohre und Mikroskope die Schärfe der Bilder fernster und kleinster Gegenstände um Größenordnungen gegenüber der Sehschärfe des unbewaffneten Auges erhöht und uns dadurch um vieles genauere Einblicke in das fernste Weltall, wie in die Geheimnisse der kleinsten Dimensionen unserer nahen Umwelt verschafft. Generationen von Optikern und Instrumentenbauern haben durch ihre Lebensarbeit die Leistungen dieser Geräte so lange gesteigert, bis die innere Struktur des Lichtes, des „Nachrichtenträgers“ für die Abbildung, weitere Erfolge solcher Anstrengungen nicht mehr zuließ. Mit der Ausschöpfung aller uns bekannten Gesetzmäßigkeiten des Lichtes war die erste grundsätzliche Stufe in der Steigerung des Gesichtssinns erreicht.

Das Licht vermag bezüglich des für uns wesentlichsten Bildinhalts, der Angabe von Größe und Form der Körper, nur bis zu einer bestimmten Grenze gehende Aussagen zu machen. Der Grund hierfür liegt darin, daß das Licht nicht unendlich fein unterteilt ist, wie es für eine beliebig genaue Abbildung notwendig wäre, sondern sich als Wellenvorgang mit endlich großer Wellenlänge ausbreitet. Durch die Größe seiner Wellenlänge ist die Fähigkeit des Lichts, Objekteinheiten als solche darzustellen, sie „aufzulösen“, begrenzt. Diese Begrenzung wird umso empfindlicher, je kleiner der Kegelöffnungswinkel des Lichtbündels ist, das von jedem Punkt des beobachteten Gegenstands durch die Pupille unseres Auges auf die Netzhaut oder durch eine künstliche Linse auf einen anderen Bildträger, etwa eine fotografische Platte, fällt. Je kleiner dieser Winkel ist, umso geringer ist der zur Abbildung verwertete Bruchteil der Gesamtstrahlung, die von jedem Objektpunkt aus zumindest in alle Richtungen einer Halbkugel gesandt wird. Daher vermögen wir von sehr weit entfernten Gegenständen auch mit Hilfe von Fernrohren oder Spiegelsystemen, deren Objektive einen gegenüber der Augenpupille um vieles größeren Durchmesser aufweisen, nur noch sehr viel gröbere Einzelheiten wahrzunehmen als von nahen Objekten mit dem unbewaffneten Auge.

Beim Lichtmikroskop kann wegen des geringen Abstands zwischen Objekt und Objektivlinse von allen optischen Geräten das am weitesten geöffnete Strahlenbündel — nahezu 180° , d. h. fast die gesamte Strahlung, die von dem Objekt in alle Richtungen einer Halbkugel ausgeht — zur Erzeugung des Objektbildes benutzt werden. Bei diesem

Gerät ist daher die Fähigkeit, kleine Objekteinzelheiten noch voneinander zu trennen, das „Auflösungsvermögen“, bis auf ein Höchstmaß gesteigert. Selbst bei Verwertung eines so weit geöffneten Strahlenkegels erreicht man jedoch nur die Trennung solcher Objekteinzelheiten, die nicht von wesentlich kleinerer Ausdehnung sind als die Wellenlängen (λ) des zur Abbildung benutzten Lichtes. Sonnenlicht ist aus Licht verschiedener Farben mit Wellenlängen zwischen 0,39 und 0,77 μ ($1 \mu = 1/1000$ mm) zusammengesetzt. Der Grund für die mit der Strahlöffnung gekoppelte Auflösungsgrenze der optischen Instrumente liegt in den seit *Fraunhofer* und *Fresnel* erforschten Interferenzerscheinungen der Lichtwellen und der dadurch bedingten Beugung des Lichtes. Unter Interferenz des Lichtes verstehen wir die durch das örtliche Zusammentreffen (Überlagerung) von Licht gleicher Wellenlänge, aber verschiedener Schwingungsphase zustandekommende Vermehrung, bzw. Verminderung der Lichtintensität. Die für das Zustandekommen des mikroskopischen Bildes wichtigste Interferenzerscheinung ist das Auftreten „abgebeugter“ Strahlen hinter dem durchstrahlten Objekt, sofern dieses lichtabsorbierende (lichtverschluckende) Stellen enthält.

Diese Entstehung von Lichtstrahlen außerhalb der Durchstrahlungsrichtung läßt sich besonders einfach an einem gitterförmigen Objekt verstehen, das von einem einfarbigen parallelen Strahlenbündel getroffen wird. Nach einem von *Huygens* aufgestellten allgemeinen Prinzip entstehen aus den ebenen Wellenfronten, welche durch die Gitterebene treten, an allen Punkten der lichtdurchlässigen Gitterlücken Elementarwellen, die sich kugelförmig in den Raum ausbreiten. Blickt man entgegengesetzt zur Bestrahlungsrichtung genau senkrecht auf die Gitterebene, so sind die Entfernungen zwischen Auge und den einzelnen Gitterlücken untereinander gleich. Die von den Gitterlücken ausgehenden Elementarwellen derselben Wellenfront überlagern sich daher in der Beobachtungsrichtung mit gleicher Phase, so daß sich ihre Einzelintensitäten durch die Addition gleichsinniger Lichtamplituden zu einem hellen Strahl verstärken. Blickt man nun unter einem solchen Winkel auf das Gitter, daß die Gitterlücken der Reihe nach eine um je eine halbe Wellenlänge ansteigende Entfernung vom Auge haben, so löschen sich die von je zwei nebeneinanderliegenden Gitterlücken ausgehenden Wellenzüge in der Richtung auf den Beobachter gegenseitig aus, weil sie sich mit entgegengesetzten Amplituden überlagern. Bei einem bestimmten größeren Beobachtungswinkel wiederum unterscheiden sich die Lichtwege vom Beobachter zu den aufeinanderfolgenden Gitterlücken gerade um je eine volle Wellenlänge. In dieser Richtung verstärken sich daher alle von den einzelnen Gitterlücken ausgehenden Wellenzüge zu dem abgebeugten Strahl 1. Ordnung. Bei weiterer Steigerung des Beobachtungswinkels wiederholt sich der Wechsel von Strahlauslöschung durch Interferenz und abgebeugten Strahlen steigender Ordnungs-

zahl z . Für die Beugungswinkel β_z zwischen den abgebeugten Strahlen z -ter Ordnung und der Durchstrahlungsrichtung folgt aus der angestellten Überlegung unmittelbar das bekannte Beugungsgesetz: $\sin \beta_z = \frac{z \lambda}{d}$, wobei d die Gitterteilung, d. h. der Abstand zweier aufeinanderfolgenden Gitterlücken oder Gitterstäbe ist.

Für die vollständig getreue Abbildung eines solchen Gitters im Mikroskop ist es nun notwendig, daß vom Mikroskopobjektiv abgebeugte Strahlen aller Ordnungen erfaßt und zum Bild fokussiert werden. Der mindeste Grad von Ähnlichkeit zwischen Objektgitter und Gitterbild wird erhalten, wenn außer den unabgebeugten Strahlen noch wenigstens die abgebeugten Strahlen erster Ordnung durch das Mikroskopobjektiv zum Bild gelangen. Ein solches Bild gibt lediglich noch den gegenseitigen Abstand der Gitterstäbe richtig wieder. Da die Beugungswinkel aller Ordnungen mit feiner werdendem Gitter (kleiner werdender Gitterteilung d) wachsen, gibt es eine Grenze für die Feinheit eines Gitters, jenseits derer auch diese minimale Abbildungstreue nicht mehr vorhanden ist, weil schon die abgebeugten Strahlen erster Ordnung nicht mehr zum Bild verwertet werden. Es fehlen sozusagen bei der mikroskopischen Abbildung eines zu feinen Gitters der vom Objekt beeinflussten, zur Abbildung verwendeten Strahlung alle die durch die Größe der Gitterteilung beeinflussten Anteile, welche diesen Wert dem Bild vermitteln könnten.

Bei der Bestrahlung mit weißem Licht anstatt der bisher angenommenen einfarbigen Strahlen bilden sich an Stelle der unter diskreten Beugungswinkeln verlaufenden Strahlen vollständige Beugungsspektren der verschiedenen Ordnungen aus. Diese erstrecken sich jeweils über einen Winkelbereich, wobei innerhalb jedes Spektrums die kurzwelligeren blauen Strahlen die kleinsten Winkel mit den nicht abgebeugten Strahlen einschließen. Bei Objekten von komplizierterer, insbesondere auch nicht periodischer Struktur bilden auch die abgebeugten Strahlen kein einfaches Schema mehr, es gilt aber auch dann noch das Gesetz, wonach keine Objekteinzelheiten im Bild wiedergegeben werden, wenn keine der durch sie hervorgerufenen abgebeugten Strahlen mehr zur Bildentstehung beitragen.

Als Auflösungsvermögen δ des Mikroskops bezeichnet man den kleinsten Abstand, den zwei Objekteinzelheiten voneinander haben dürfen, wenn sie im Bild noch getrennt wiedergegeben werden sollen. Da einerseits unser Auge regelmäßig angeordnete Gitterstriche besonders gut als getrennte Einzelheiten erkennen kann (z. B. besser als zwei um die gleiche Entfernung der Gitterteilung auseinanderliegende Punkte) und da andererseits die an einem Gitter abgebeugten Strahlen ein mathematisch besonders einfaches Gesetz befolgen, gibt man das Auflösungsvermögen des Mikroskops für ein gitterförmiges Objekt an. Seine Größe ent-

spricht demnach einer Gitterteilung, bei welcher der Beugungswinkel erster Ordnung β_1 gerade so groß wird wie der durch die optischen Abmessungen des Objektivs (Durchmesser, Brennweite u. a.) bestimmte größte Winkel α zur optischen Achse, innerhalb dessen die von der Objektivfassung umschlossenen Strahlen verlaufen, welche von dem auf der optischen Achse gelegenen Objektpunkt ausgehen und zum Bild gelangen. Da dann $\sin \beta_1 = \sin \alpha$ ist, folgt aus dem Beugungsgesetz für das Auflösungsvermögen: $\delta = \frac{\lambda}{\sin \alpha}$. Zur Erhöhung des Auflösungsvermögens kann man beim Mikroskop zwischen Objekt und Objektiv noch eine sogenannte Immersionsflüssigkeit von starker Lichtbrechung bringen, deren Brechungszahl n zwischen 1,2 und 1,6 liegt, wodurch die Lichtwellenlänge auf dieser Strecke auf den Wert $\frac{\lambda}{n}$ verringert und auch die Beugungswinkel gemäß $\sin \beta_z = \frac{z\lambda}{dn}$ verkleinert werden. Das Auflösungsvermögen eines Mikroskops mit Immersions-Objektiv beträgt entsprechend: $\delta = \frac{\lambda}{n \cdot \sin \alpha}$. In der Sprache der Optiker wird $\sin \alpha$ als Apertur und $n \sin \alpha$ als numerische Apertur des Objektivs bezeichnet. Die Wellenlänge des gelbgrünen Lichts, für das unser Auge am empfindlichsten ist, liegt etwa in der Mitte des sichtbaren Farbenspektrums und beträgt $\lambda = 0,56 \mu$. Für Zedernöl, die übliche Immersionsflüssigkeit für hohe Vergrößerungen, ist die Brechungszahl $n = 1,4$. Der größte Beugungswinkel, den ein weit geöffnetes, für höchste Auflösung bestimmtes Mikroskopobjektiv noch aufnehmen kann, beträgt bei gerader Beleuchtung, d. h. wenn das Objekt in Richtung der Objektivachse bestrahlt wird, annähernd 90° , in diesem Falle ist $\sin \alpha = 1$. Für sichtbares (gelbgrünes) Licht und bei gerader Beleuchtung beträgt daher das Auflösungsvermögen $\delta_g = 0,4 \mu$. Die bei gerader Beleuchtung auflösbare Strecke kann durch sogenannte schiefe Beleuchtung noch etwa halbiert werden, weil in diesem Fall um annähernd 180° abgebeugte Strahlen zusammen mit dem unabgebeugten Licht durch das Objektiv zum Bild gelangen, $\delta_g = 0,2 \mu$.

Nachdem diese Erkenntnisse durch die Arbeiten von *Raleigh*, *Helmholtz* und *Abbe* gesichert waren, konnte man eine Steigerung der mikroskopischen Auflösung nur noch durch die Verwendung von Licht kleinerer Wellenlänge erhoffen. Das erste praktische Ergebnis von Untersuchungen in dieser Richtung stellt das 1904 bei Carl Zeiß in Jena von *Köhler* entwickelte Ultraviolett-mikroskop dar, durch welches das Auflösungsvermögen des Mikroskops gegenüber der Verwendung sichtbaren Lichts tatsächlich verdoppelt wurde, da die Wellenlänge der verwendeten ultravioletten Strahlung mit $0,28 \mu$ nur halb so groß ist wie die vom sichtbaren Licht. Da diese mäßige Auflösungssteigerung schon mit einem merklich größeren apparativen Aufwand verbunden ist, wird das Ultra-

violett-mikroskop nur sehr viel seltener als das normale Lichtmikroskop, meistens für spezielle Untersuchungen, benutzt. Über das erhöhte Auflösungsvermögen hinaus liegt ein weiterer Vorteil dieses Mikroskops darin, daß das ultraviolette Licht durch einige Stoffe wesentlich stärker absorbiert (verschluckt) wird als das sichtbare Licht, so daß im Ultraviolett-mikroskop manche Objekteinheiten (z. B. Zellkerne) stärker hervortreten als im normalen Lichtmikroskop. Das Ultraviolett-mikroskop stellt mit seiner Auflösung von annähernd $0,2 \mu$ bei gerader und etwa $0,1 \mu$ bei schiefer Beleuchtung bis heute die Grenzleistung der Lichtmikroskopie dar. Abgesehen von dieser letzten Verfeinerung war jedoch praktisch schon um das Jahr 1880 der heutige Stand der Auflösung durch die Auswirkung von *Abbes* Arbeiten auf den Mikroskopbau bei Carl Zeiß in Jena erreicht.

Durch die Begrenzung der mikroskopischen Auflösung war die Fortbildung unserer räumlichen Vorstellung von den kleineren Bausteinen der Materie und ihren feineren Strukturen über ein halbes Jahrhundert lang empfindlich gehemmt. Diesen Mangel an unmittelbarer Anschauung vermochten auch indirekte Methoden, wie die für die Kenntnis der kolloiden Stoffe bedeutsamen Erfindungen des Ultramikroskops (*Siedentopf* und *Zsigmondy*, 1903) und der Ultrazentrifuge (*The Svedberg*, 1924) nicht zu ersetzen. Beim Ultramikroskop bestrahlt man die zu untersuchenden submikroskopischen Teilchen durch eine sehr starke Lichtquelle senkrecht zur Beobachtungsrichtung. Es fallen daher nur die abgebeugten Strahlen in das Beobachtungsmikroskop, in dem die Teilchen je nach ihrer Größe, Lage und stofflichen Beschaffenheit als mehr oder weniger helle Punkte sich zeigen. In der Ultrazentrifuge erhöht man die auf kleinste, in Flüssigkeiten suspendierte Teilchen wirkende Kraft durch Ausschleudern bei höchsten Umdrehungszahlen auf das 10^5 - bis 10^6 fache ihrer natürlichen Schwerkraft, so daß sie nicht mehr schwebend bleiben, sondern sich absetzen (sedimentieren). Aus der Sedimentationsgeschwindigkeit läßt sich die Teilchengröße ermitteln. Beide Verfahren ermöglichen den Nachweis von Einzelteilchen, deren Form und Größe lichtmikroskopisch nicht mehr erfaßt werden können, und ergeben auch in manchem Anhaltspunkte über die Form und Größe solcher Teilchen, ohne sie jedoch wirklich abzubilden. Eine Abbildung sublichtmikroskopischer Teilchen kann nur mit Strahlen von erheblich kleinerer Wellenlänge als selbst der des ultravioletten Lichts erreicht werden.

Es lag nahe, dabei zuerst an die Röntgenstrahlung zu denken. Sollten diese sehr kurzwelligigen Strahlen, die man schon seit langem mit so großem Erfolg zur Durchleuchtungsabbildung benutzte, nicht auch zur mikroskopischen Abbildung verwendet werden können? Bei solchen Überlegungen und Versuchen traten bald Schwierigkeiten grundsätzlicher Art auf. Röntgenstrahlen sind kurzwelliger als Licht, doch kennen wir bis-

her keine brechenden Stoffe für diese Strahlen, aus denen sich geeignete linsenartige Einrichtungen entwickeln ließen. Es fehlt also die Röntgenlinse, und daran ist bis heute auch das Röntgenmikroskop gescheitert. Aber auch ein weiterer Umstand läßt die Aussichten eines solchen Mikroskops sehr begrenzt erscheinen. Das Durchdringungsvermögen von Röntgenstrahlen ist ungleich viel größer als das des Lichts. Diese Eigenschaft, der die Röntgenstrahlen ihre wertvolle Anwendung verdanken, ist nicht mehr von Vorteil, wenn die Aufgabe gestellt wird, mikroskopische Objekte abzubilden. Diese sind nämlich so dünn, daß die im Objekt von Ort zu Ort vorhandenen entsprechend kleinen absoluten Unterschiede der durchstrahlten Masse praktisch weder eine unterscheidbare verschieden große Absorption, noch Streuung der Strahlung von Objektpunkt zu Objektpunkt bewirken. Damit kann aber vom Objekt kein Bild entworfen werden, selbst wenn geeignete Linsen vorhanden wären, welche die von den einzelnen Objektpunkten ausgehenden Strahlenbündel wieder zu Bildpunkten vereinigen würden.

Nun gelang aber vor fünfzehn Jahren der Forschung in Deutschland, wo sie von jeher über eine gute optische Tradition verfügte, auf einem anderen Weg ein entscheidender Erfolg, indem sie 1931 zeigen konnte, daß man mit Elektronenstrahlen mikroskopieren kann. Diese Strahlen haben im Gegensatz zu den Röntgenstrahlen einerseits ein äußerst geringes Durchdringungsvermögen, so daß sie schon beim Durchstrahlen dünnster Schichten stark beeinflußt werden, andererseits hat man für Elektronenstrahlen aber auch Linsen gefunden, sogar gleich zwei verschiedene Arten. Solche Elektronenlinsen bestehen aus drehsymmetrischen, magnetischen oder elektrischen Feldern, in deren Symmetrieachse das Elektronenstrahlbündel verläuft. Es handelt sich also hier nicht um stoffliche Linsen, sondern um Feldlinsen, die masselos und daher auch für Elektronenstrahlen ohne die geringste Absorption durchdringbar sind. Wie aber verhalten sich Elektronenstrahlen bezüglich der dritten Forderung, wonach eine für Mikroskopie geeignete Strahlung eine sehr kleine Wellenlänge aufweisen muß? Haben Elektronenstrahlen überhaupt Welleneigenschaften oder sind es Korpuskularstrahlen? Wie groß ist ihre Wellenlänge, falls es sich um eine Wellenstrahlung handelt? Die Entwicklung unserer Vorstellungen über die Natur von Strahlungen ist stets besonders eng mit dem Fortschreiten unseres physikalischen Weltbildes verknüpft gewesen. Am sichtbaren Licht, der dem Menschen am längsten vertrauten physikalischen Strahlung, hat er daher auch die beiden wesentlichsten Kennzeichen jeder Strahlung, die Wellennatur und die korpuskularen Eigenschaften, am frühesten und am sorgfältigsten studiert. Der fast zwei Jahrhunderte währende Streit der Anschauungen, ob das Licht die Eigenschaft von Korpuskeln (kleinen Körperchen, Körnchen) habe, wie dies der große englische Naturforscher *Newton* vertrat, oder ob es nach dem

Standpunkt von *Huygens*, seinem berühmten holländischen Widersacher, Wellencharakter habe, endete zunächst mit dem Sieg der Wellenauffassung. Außer den Lichtstrahlen und ihren Nachbarn im Wellenlängenbereich, den ultravioletten, wie den ultraroten und den Wärmestrahlen, haben wir im Laufe der Zeit andere Strahlenarten kennengelernt, die untereinander ebenfalls, wenn auch weniger nahe, verwandt sind. Hierzu gehören als wichtigste die Röntgenstrahlen und die *Hertz*schen Wellen des Rundfunks, die man gleich in die große Familie der elektromagnetischen Schwingungen einordnen konnte. Dagegen schien zunächst das Verhalten der Elektronenstrahlen und der Höhenstrahlung durch korpuskulare Eigenschaften schon hinreichend deutbar. Verschiedene Beobachtungen, so die Gesetzmäßigkeiten der Lichtelektrizität, zwangen aber nun in neuerer Zeit dazu, die schon von *Newton* verfochtene Annahme, daß das Licht eine „Körnchen“-Struktur aufweise, insofern wieder aufzugreifen, als man dem Licht neben seinem Wellencharakter (Wellenlänge λ) auch korpuskulare Elemente (Masse m und Geschwindigkeit v der Korpuskeln) zuerkennen mußte. Auf diesem und auf anderen Wegen ist die theoretische Physik umgekehrt schließlich zu der Anschauung gekommen, daß auch jeder bewegten Masse und damit jeder korpuskularen Strahlung Welleneigenschaften zuzuordnen sind. Im Jahre 1924 hat der französische Physiker *de Broglie* in jener fundamentalen Beziehung $\lambda = \frac{h}{mv}$ die Eigenschaften der Wellenstrahlung mit denen der Korpuskularstrahlen über das *Planck*sche Wirkungsquantum h zusammengefaßt. Die nach dieser Beziehung den Elektronenstrahlen zugeordneten Wellenlängen liegen für den Bereich der heute nach verschiedenen technischen Verfahren erzeugten Strahlen 4 bis 6 Zehnerpotenzen unter dem sichtbaren Licht und sind auch noch kleiner als die Wellenlängen der durch Elektronen beim Aufprall auf Materie ausgelösten Röntgenstrahlen.

Besaßen die Elektronenstrahlen aber Welleneigenschaften, so mußten sich diese auch durch die uns vom Licht und von den Röntgenstrahlen her bekannten verschiedenen Arten von Interferenzwirkungen nachweisen lassen. Und in der Tat hatten schon 1922 die beiden amerikanischen Physiker *Davisson* und *Germer*, als sie Nিকেleinkristalle mit Elektronen bestrahlten, eine zunächst unerklärliche bevorzugte Streuung in bestimmten Richtungen gefunden, welche dann 1927 durch neue Versuche mit Hilfe der Vorstellungen *de Broglie*s über die Wellennatur der Elektronen als Interferenzerscheinung zwischen den durch das Raumgitter der Kristalle beeinflussten Elektronenwellen aufgeklärt werden konnten. Seit dieser Zeit ist die Elektronenbeugung in immer schönerer und vollendetere Form von vielen Forschern gezeigt worden. Heute bildet die Materialuntersuchung mittels Elektronenbeugung ein vielfach benutztes Verfahren zur Vermessung der Atomabstände in Kristallen und der Größe kleinster kristalliner Bausteine.

Die Verfahren und Ergebnisse der Elektronenbeugungsuntersuchungen sind denen der Röntgenbeugung grundsätzlich ähnlich und ergänzen sich wegen des bei benachbartem Wellenlängenbereich stark unterschiedlichen Durchdringungsvermögens in günstiger Weise.

Die gleichen Jahre, in denen wir mit den ersten exakten Beugungsversuchen die experimentelle Bestätigung von der Elektronenwellenlänge und damit den Anfang einer physikalischen Optik für Elektronen erhielten, brachten im wesentlichen in Deutschland neue Impulse für die geometrisch-optische Betrachtung der Elektronenbahnen, die wir heute kürzer *geometrische Elektronenoptik* nennen. Busch zeigte 1926/27 im Zusammenhang mit einer Präzisionsmessung zur Bestimmung des Verhältnisses von Ladung zu Masse der Elektronen, daß der den Physikern schon lange bekannte und vielfach zur Fokussierung in Oszillographenröhren benutzte Effekt der Bündelung eines divergierenden Elektronenstrahls beim Durchgang durch eine stromdurchflossene Spule eine weitgehende mathematische Analogie mit der Wirkung einer Glaslinse auf Lichtstrahlen hat. Der Gedanke eines Elektronenmikroskops wurde jedoch damals noch nicht erörtert, war doch auch die These *de Broglies* erst wenige Jahre zuvor ausgesprochen worden. Erst die experimentellen Ergebnisse mehrjähriger eingehender Abbildungsversuche mittels magnetischer Elektronenlinsen an der Berliner Technischen Hochschule führten 1931 zum Bau des ersten Elektronenmikroskopes, dessen Auflösung und Vergrößerung noch geringer als bei einem Lichtmikroskop waren, und 1933 zum Bau des ersten Übermikroskopes, d. h. eines Elektronenmikroskopes mit einer besseren Auflösung als sie das Lichtmikroskop erreichen kann. Die 1937 bei der Siemens & Halske A. G. weitergeführte technische Entwicklung führte dann schon 1939 zur Lieferung der ersten serienmäßigen Übermikroskope*). Das Auflösungsvermögen dieser zur Zeit leistungsfähigsten Geräte beträgt heute mit etwa $\frac{2}{1000000}$ mm gerade das 100fache von dem des besten Lichtmikroskops und hat damit den Wert erreicht, der bei einer ersten Abschätzung aus Wellenlänge und Strahlapertur der Elektronen im Jahre 1932 als erreichbar angegeben wurde.

Der Strahlengang eines Elektronen-Übermikroskops entspricht in der Anordnung der optischen Elemente einem Lichtmikroskop für photographische Aufnahmen. In einem Strahlerzeugungsrohr an dem einen Ende der Mikroskopröhre treten die Elektronen aus einem hocherhitzten Wolframdraht aus und werden zwischen dieser Kathode und einer ihr in kleinem Abstand gegenüberliegenden, für den Strahldurchtritt durchbohrten Anode durch eine zwischen den beiden Elektroden herrschende elektrische Gleichspannung von 50 bis

100 kV auf etwa halbe Lichtgeschwindigkeit beschleunigt. Das so entstehende, nur sehr wenig divergierende Strahlbündel durchläuft ein erstes fokussierendes Magnetfeld. Diese Elektronenlinse wirkt wie der Kondensator des Lichtmikroskops und erzeugt auf dem Objekt die zur stark vergrößerten Abbildung notwendige hohe Strahlstromdichte. Dicht hinter dem Objekt befindet sich eine zweite magnetische Elektronenlinse, das Objektiv, das mit einer sehr kleinen Aperturblende versehen ist. Diese ist so bemessen, daß nur die Strahlen, die ohne stärkere Richtungsänderung das Objekt durchdringen, d. h. also die nur den sehr kleinen Öffnungskegel des bestrahlenden Bündels ausfüllen, durch die Blendenbohrung fallen. Ein Objekt element erscheint daher im Bild umso dunkler, je größer der Anteil der es durchsetzenden Elektronenstrahlen ist, welcher durch Beugung oder durch Streuung in Richtungen außerhalb der Objektivblendenapertur oder auch durch Absorption nicht mehr zum Bild gelangt. Bei nichtkristallinen Objekten werden daher die Bildelemente umso dunkler, je größer die durchstrahlte Masse des Objektelements ist, d. h. je dicker in Richtung der optischen Achse und von je größerem spezifischem Gewicht es ist. Bei kristallinen Objekten herrschen infolge der durch das Kristallgitter des Objekts bewirkten Interferenzerscheinungen zwischen den Strahlelektronen gleicher Wellenlänge abweichende Verhältnisse derart, daß die Objektdurchlässigkeit auch noch von der Orientierung der Kristalle zur Strahlachse abhängt. Das Objekt zeigt also im Bild nicht nur eine Massendicken-, sondern auch eine Lagenstruktur. Das vom Objektiv entworfene erste oder Zwischenbild kann schon für eine Übersichtsbeobachtung auf einem Leuchtschirm aufgefangen werden. Der Mittelteil des Bildes fällt dann durch eine zentrale Bohrung des Schirms und wird von der dritten magnetischen Elektronenlinse des Mikroskops, dem Projektiv, ein zweites Mal vergrößert, so daß das Bild auf dem Endleuchtschirm in einem Maßstab abgebildet wird, der dem Produkt der beiden Teilvergrößerungen entspricht. Zur Aufnahme des Bildes wird der Leuchtschirm aus dem Strahlengang geklappt und durch eine photographische Platte ersetzt.

Die magnetischen Elektronenlinsen bestehen aus zwei sich in kleinem Abstand gegenüberstehenden, für den Strahldurchtritt koaxial durchbohrten Polschuhen. Meistens werden die Polschuhe durch eine sie konzentrisch umgebende, von Gleichstrom durchflossene Wicklung gegenseitig magnetisch erregt, wobei die Stromwicklung durch eine Eisenkapselung zur Aufnahme des magnetischen Flusses und zu seiner Weiterleitung zu den Polschuhen allseitig umschlossen ist (elektromagnetische Polschuhlinse mit Eisenkapselung). Die Polschuhe können aber auch durch eine permanentmagnetische Anordnung erregt werden (magnetostatische Polschuhlinse). Zwischen den durchbohrten Polschuhen entsteht bei magnetischer Erregung ein starkes drehsymmetrisches Magnetfeld, das auf das durchfallende divergente Elektronenbündel wie eine

*) Diese vorwiegend experimentellen elektronenoptischen Arbeiten wurden 1928 begonnen und bis 1932 gemeinsam mit Knoll, von 1932 an meistens gemeinsam mit v. Borries vom Verfasser durchgeführt.

Sammellinse einwirkt und so von einem im Strahlengang befindlichen Gegenstand ein reelles Bild erzeugt. Neben diesen optisch leistungsfähigeren magnetischen Elektronenlinsen werden auch elektrostatische Linsen zum Bau von Elektronenmikroskopen verwendet. Sie bestehen aus drei hintereinander liegenden, coaxial durchbohrten Elektroden, von denen die mittlere mit der Kathode und die beiden miteinander verbundenen äußeren mit der Anode des Strahlrohrs elektrisch verbunden sind. Die Elektronen des divergenten Strahlbündels durchlaufen bei dieser Schaltung beim Durchtritt durch die elektrische Linse erst ein stark verzögerndes, dann wieder ein stark beschleunigendes Feld und werden dabei wie durch eine Sammellinse zur optischen Achse zurückgelenkt.

Die Öffnungsfehler von Elektronenlinsen sind wesentlich größer als die von korrigierten lichtoptischen Linsensystemen und haben zur Folge, daß scharfe elektronenmikroskopische Abbildungen nur zustandekommen, wenn man mit einem Elektronenstrahlbündel von nur sehr kleinem Öffnungswinkel (etwa 1 : 1000) und entsprechend kleiner Aperturblende im Objektiv (wenige μ Blendendurchmesser) arbeitet. Dieses feine Strahlenbündel muß genau die Mitte der Linse durchsetzen, weil dann der Öffnungsfehler der Linse die Bildschärfe am wenigsten vermindert. Aus diesem Grund ist ein sehr genau zentrierter Aufbau des Mikroskops erforderlich. Die von den beiden Abbildungslinsen des Mikroskops bewirkte hohe Vergrößerung von 10 000 bis 50 000 bei einer Auflösung von 10 bis 2 μ verlangt einen gegen Erschütterungen äußerst unempfindlichen Mikroskopaufbau. Besonders ist darauf zu achten, daß während der Plattenbelichtung weder das Objekt, noch der Elektronenstrahl die geringste Querschwingung zur Objektivachse ausführen. Zur Durchmusterung der Objekte ist ein quer zum Strahl verschiebbarer Objektisch vorgesehen. Der Bewegungsmechanismus hierfür muß so ausgebildet sein, daß man geringste Verschiebungen mit größter Gleichförmigkeit bei kleinstem Totgang bewerkstelligen kann. Ähnliches gilt für die Einstellung der zur Erlangung scharfer Bilder erforderlichen genauen Justierung von Strahlquelle und Kondensator zum Objekt und Objektiv.

Beim Zusammentreffen mit den Sauerstoff- und Stickstoffmolekülen der Luft werden die Elektronen bei normalem Druck schon nach wenigen cm völlig diffus zerstreut. Um ein ungestörtes optisches Elektronenstrahlbündel zu erhalten, muß man durch eine laufend arbeitende leistungsfähige Hochvakuumpumpe den Druck in der Mikroskopröhre auf weniger als den millionsten Teil des äußeren Luftdrucks senken. Hierzu müssen die einzelnen Abschnitte der Mikroskopröhre, sowie ihre festen oder beweglichen Verbindungsglieder zuverlässig vakuumdicht sein. Objekt und fotografische Platten müssen zum Mikroskopieren in das Innere der evakuierten Mikroskopröhre hereingebracht und wieder entnommen werden. Hierfür dienen meist besondere Vakuumschleusen, welche Objekt, bzw. Platten in einem möglichst kleinen Schleusenraum

aufnehmen, der gegen das übrige Mikroskopvolumen absperrbar ist, so daß beim Wechsel nur eine geringe Luftmenge in das Gerät strömt, die schnell wieder ausgepumpt werden kann. Bei kleinem Mikroskopvolumen und leistungsfähigen Pumpen ist es auch möglich, ganz auf Schleusen zu verzichten.

Für die Erzeugung des zur Elektronenbeschleunigung dienenden elektrischen Feldes im Strahlrohr dient ein vom Netz gespeister Gleichrichter für eine im Bereich von 50 bis 100 kV liegende Gleichspannung. Für den Betrieb eines Mikroskops mit Stromspulen für die Erzeugung des Magnetfelds zur Strahlbündelung benötigt man zusätzlich eine Niederspannungsgleichstromquelle, häufig eine Akkumulatorenbatterie von etwa 60 Volt. Diese besondere Stromquelle fällt bei den einfacheren Mikroskopen mit elektrostatischen oder magnetostatischen Linsen fort. Da die Brennweite magnetischer Linsen von der Erzeugungsspannung der Strahlelektronen und von der bündelnden magnetischen Feldstärke abhängt, müssen beide sehr genau konstant gehalten werden, falls nicht die Abbildungsschärfe durch rasche, zum Beispiel periodische Änderung der Brennweite leiden soll. Auch magnetische Wechselfelder, die in das Mikroskopinnere eindringen und den Abbildungsstrahlengang zum Schwingen bringen, verhindern scharfe Aufnahmen. Man hält daher sowohl den Strom in den Abbildungsspulen, als auch durch magnetische Regler und elektrische Siebe die Strahlerzeugungsspannung auf mindestens 10^{-4} des jeweils eingestellten Wertes konstant und schirmt magnetische Wechselfelder durch ein System konzentrischer Röhren aus Material hoher Permeabilität sorgsam ab. Diese Abschirmung muß besonders sorgfältig auf der Strecke vom Objekt zum ersten Elektronenbild erfolgen, da dieses vom Projektiv noch einmal stark vergrößert wird, so daß sich alle Schwingungen des Zwischenbildes im Endbild mit vergrößern.

Die technische Lösung der angedeuteten mechanischen, vakuummäßigen und elektrischen Aufgaben muß so erfolgen, daß die Bedienung des Übermikroskops auch für den elektronenoptisch nicht vorgebildeten Wissenschaftler leicht erlernbar, bequem und sicher ist, um dem Benutzer ein rasches und bequemes Mikroskopieren zu ermöglichen.

Wegen ihrer starken Wechselwirkung mit Materie sind Elektronenstrahlen, verglichen mit Licht- und Röntgenstrahlen, besonders geeignet für die Untersuchung feinsten Häutchen (Folien, Filme) und dünnster Oberflächenschichten. Man erhält elektronenmikroskopische Abbildungen von Filmen in durchfallender Strahlung und von Oberflächen nach *v. Borries* mittels fast streifend auf die Objektfläche einfallender Strahlen, die unter demselben flachen Winkel in das Vergrößerungssystem des Mikroskops reflektiert werden. Die untersuchte Oberfläche liegt also nicht wie der mittels Durchstrahlung untersuchte Film unter rechtem Winkel zur Mikroskopachse, sondern fast parallel zu ihr. Sie wird daher in ihrer einen Ausdehnung im vergrößerten Bild stark verkürzt wiedergegeben, wäh-

rend dafür die Erhebungen aus der Oberfläche in voller Vergrößerung erscheinen. Außer dieser unmittelbaren Oberflächenuntersuchung wurde aber auch das aus der Lichtmikroskopie bekannte Verfahren der Herstellung dünner Abdruckhäutchen, denen das Profil der zu untersuchenden Oberfläche eingepreßt wird, für die Bedürfnisse der Elektronenmikroskopie zuerst von *Mahl* in mannigfacher Weise abgewandelt und damit das bezüglich der Auflösung überlegene Durchstrahlungsverfahren, zunächst insbesondere für die Metallografie, dann aber auch für biologische Objekte nutzbar gemacht.

Während in der zur optischen Achse senkrechten Ebene Größe, Gestalt und Struktur, sowie die örtliche Verteilung der Einzelteilchen des Präparats unmittelbar aus dem mikroskopischen Bild entnommen werden können, muß man zu besonderen Methoden greifen, um dieselben Auskünfte in der dritten Dimension (in Richtung der optischen Achse) zu erhalten. Die Aufgabe der räumlichen Objekterfassung wird im Licht- und Elektronenmikroskop in voneinander verschiedener Weise gelöst; welche durch den sehr unterschiedlichen Öffnungswinkel des Strahlenkegels bedingt ist, den das Mikroskopobjektiv vom Objekt empfängt und zum Bild verarbeitet. Im Lichtmikroskop ist infolge der großen Strahlapertur die Objektschicht, die im Bilde scharf erscheint, sehr dünn. Die von Objektpunkten außerhalb dieser dünnen Schicht ausgehenden und sich daher auch außerhalb der Bildebene vereinigen den Strahlenbündel schneiden sich mit der Bildebene schon bei sehr viel größeren als den Strahlenvereinigungsquerschnitten, so daß kein scharfes Bild dieser außerhalb der eingestellten Objektschicht liegenden Punkte entstehen kann. Beim Lichtmikroskop verschafft man sich daher die räumliche Vorstellung, indem man durch Feinverstellung des Abstands zwischen Objekt und Objektiv nacheinander verschiedene dünne Schichten des Objekts betrachtet (Methode der „optischen Schnitte“). Im Elektronenmikroskop mit seiner sehr kleinen Strahlöffnung sieht man dagegen im Bild einen sehr großen axialen Bereich des Objekts gleichzeitig scharf, weil auch die Strahlenbündel von Objektpunkten außerhalb der eingestellten Objektebene die Bildebene noch mit sehr kleinem Querschnitt durchsetzen. Diese große Tiefenschärfe des Elektronenmikroskops verbietet zwar die erwähnte Abbildung aufeinanderfolgender dünner Objektschichten in unmittelbarer zeitlicher Folge, ermöglicht dafür aber in besonders schöner Weise die stereoskopische Betrachtung. Hierzu kann das Präparat im Strahlengang um kleine Winkel gekippt werden, wobei man entweder das Schirmbild während des Kippens beobachtet oder hintereinander bei zwei verschiedenen Objektneigungen je ein Bild aufnimmt und das so gewonnene Stereobildpaar im Stereoapparat betrachtet, bzw. in einem Stereokomparator ausmißt.

Während im Lichtmikroskop infolge der großen Abbildungsapertur (α fast 90° , $\sin \alpha$ beinahe 1) Strukturen mit einer Gitterkonstanten von etwa

einem Drittel der Lichtwellenlänge noch aufgelöst werden, lassen die starken Linsenfehler der Elektronenlinse nur die Verwertung eines sehr engen Strahlkegels ($\alpha \sim 1/1000$) zum Bild zu, so daß dort nur Strukturen von etwa dem 300fachen der Elektronenwellenlänge mikroskopisch aufgelöst werden. Man kann aber noch Auskünfte über wesentlich kleinere periodische Strukturen erhalten, wenn man die in einen sehr viel größeren Kegel abgelenkten Strahlen im sogenannten Beugungsbild beobachtet. Man erhält diese Beugungsbilder im Elektronenmikroskop leicht, wenn man die abgelenkten Strahlen hinter dem Objekt ohne Zwischenschaltung von Vergrößerungslinsen auf den Leuchtschirm fallen läßt. Man kann hierzu das Objekt beispielsweise hinter der letzten (Projektiv-)Linse in das Elektronenmikroskop einbringen und das Beugungsbild auf dem Endbildeuchtschirm beobachten. Man kann aber auch die Aperturblende des Objektivs und den inneren Teil der zweiten Abbildungslinse aus dem Strahlengang herausnehmen und dadurch hinter dem Objekt einen genügend großen freien Kegelraum schaffen, so daß die vom durchstrahlten Objekt ausgehenden abgelenkten Strahlen bei ausgeschalteten Spulenströmen auf der fotografischen Platte aufgenommen werden können. Durch Einschaltung der Spulenströme entsteht dann ein etwa 1000fach vergrößertes Übersichtsbild des ganzen beugenden Objektbereichs. Bei polykristallinen Objekten entsteht als Beugungsbild ein konzentrisches Ringsystem, bei einem Einkristall-Objekt ein regelmäßiges Punktsystem, aus denen Beugungswinkel, Ringschärfe und andere Werte ausgemessen und dadurch die Gitterkonstanten von Kristallen, die Kristallitgrößen und andere Eigenschaften des Präparats bestimmt werden. Bei manchen elektronenmikroskopischen Arbeiten hat sich die zusätzliche Untersuchung der durchstrahlten Objekte mittels Elektronenbeugungsaufnahmen sehr bewährt. Die Auswertung der Beugungsdiagramme ergänzt und erweitert in vielen Fällen in wertvoller Weise die aus dem mikroskopischen Bild gewonnene Anschauung. So sind heute die beiden wichtigsten Wege, mittels schneller Elektronen die feinsten Einzelheiten der Materie zu untersuchen, in einem Gerät kombiniert.

Eine erfolgreiche übermikroskopische Forschung auf einem Gebiet der medizinischen oder naturwissenschaftlichen Grundlagenforschung, sowie eine gute Lösung chemischer oder technischer Aufgaben erfordert meist die Ausarbeitung besonderer, der Art des zu untersuchenden Präparats angepaßter Verfahren. Bei der heute schon sehr großen Zahl von Anwendungsgebieten würde ein Eingehen auf die entwickelten Präparationsverfahren zu weit führen. Nur die wichtigsten grundsätzlichen Möglichkeiten seien aufgeführt.

Als Präparatträger dienen feinmaschige Drahtnetze oder noch häufiger kleine, runde, aus einer Gold-Platin-Legierung bestehende Scheibchen, die mit einer feinen zentralen Bohrung versehen sind (Objektblenden). Zur Aufnahme der

Objekte werden diese Netze und Blenden mit einem dünnen, meist aus Kollodium bestehenden Häutchen überzogen, dessen Dicke mit Rücksicht auf die geringe Durchdringungsfähigkeit selbst schnellster Elektronen nur wenige hundertstel μ betragen darf und das völlig strukturlos sein muß (Objektträgerfilm). Für die Herstellung solcher Filme und ihre Aufbringung auf den Präparatträgern dienen verschiedenartige, meist recht einfache Verfahren.

Am häufigsten werden die Untersuchungsobjekte zum Aufbringen auf den Objektträger in einer leicht verdunstenden Flüssigkeit suspendiert, die den Film nicht chemisch angreifen darf. Ein Tropfen dieser Suspension wird über die befilmte Blendenbohrung oder auf das befilmte Drahtnetz gebracht, so daß die Teilchen nach Verdunsten des Tropfens dem Film anhaften. Manche Objekte können auch ohne Trägerfilm auf den Objektblenden aufgebracht werden. Rauchteilchen werden z. B. am Blenden- oder Drahttrand niedergeschlagen, Fasern, Schuppen und ähnliche ausgedehntere Objekte können über die Blendenbohrung oder die Maschen des feinen Drahtnetzes gebracht werden (Mikromanipulator, Kontrolle unter dem Lichtmikroskop).

Alle Objekte, bei denen man nicht nur äußere Umrisse, sondern auch Struktureinheiten im Innern erkennen möchte, dürfen höchstens Abmessungen von wenigen Zehnteln μ in der Strahlrichtung aufweisen. Der erste Vorgang der Objektpräparation ist daher meist eine weitgehende Zerkleinerung. Bei harten Körpern (z. B. Steinen und Erden) erfolgt sie durch normale Feinmühlen und Schwingmühlen (Kugelmühlen). Natürliche und künstliche Fasern können durch Behandlung mit Chemikalien, durch trockenes oder nasses Zerzupfen und Quetschen der Zupfprodukte in kleinere Elemente (Fibrillen) zerlegt werden. Für Objekte der Gewebeforschung wurde die lichtmikroskopische Schneidetechnik weiterentwickelt. Mittels der üblichen Mikrotome konnten bisher Schnitte bis herunter zu 2 bis 3 μ Stärke hergestellt werden, die für das Lichtmikroskop vollauf genügten. Da für das Elektronenmikroskop erst Schnitte von unter 1 μ Dicke brauchbar sind, wurden verschiedene Versuche zur Lösung dieser schwierigen Aufgabe unternommen. So verwendete man die auslaufenden Enden von flachen keilförmigen Schnitten und konstruierte schnell rotierende oder mit Ultraschall erregte Messer. Diese Entwicklungen sind noch in vollem Gang. In der letzten Stufe kann eine Feinstzerteilung von in Flüssigkeiten suspendierten kleinen Einzelteilchen noch durch Beschallung der Proben mit Ultraschall erfolgen. Insbesondere die Gewebeforschung hat sich zur Zerlegung von Fasern in ihre Elemente mit Vorteil der Präparatbeschallung mittels magnetostriktiver und piezoelektrischer Ultraschallsender bedient.

Eine große Gruppe von mikroskopisch interessierenden Objekten ist schon von Natur aus für die elektronenmikroskopische Untersuchung genügend fein unterteilt (z. B. Staube und Rauche, in Lösung befindliche Kolloide, Krankheitserreger).

Bei diesen Objekten tritt aber oft noch die Aufgabe auf, die Einzelteilchen aus Flüssigkeiten oder Gasen abzuscheiden und eine Größensortierung vorzunehmen. Hierzu dienen bekannte Verfahren wie Sedimentation und Zentrifugierung, bei kleinsten Teilchen (Makromolekülen, Viren) mittels Ultrazentrifugen, ferner die Dialyse und die Filtrierung von Flüssigkeiten mit Ultrafiltern. Das Filtrat enthält nur noch Elemente unterhalb einer durch die Feinheit des Ultrafilters gegebenen Größe. Können die mikroskopisch gesuchten Objekte zunächst nur in kleinen Mengen und zusammen mit Begleitstoffen von wesentlich größerer Masse gewonnen werden, wie es z. B. bei tier- und pflanzenpathogenen Viren der Fall ist, so müssen je nach Art des Vorpräparats besondere Reinigungsmethoden (z. B. die Befreiung von Eiweißen oder Zellbestandteilen) und Verfahren zur Anreicherung der gesuchten Bestandteile entwickelt und angewandt werden.

Hat man durch einen oder einige der bisher angedeuteten präparativen Schritte ein genügend feines, gereinigtes und angereichertes Präparat gewonnen, so muß noch für eine gleichmäßige Verteilung auf dem Präparatträger gesorgt werden, um einerseits Zusammenlagerungen von kleinen zu größeren Gebilden und ungleichmäßige Haufenbildungen zu vermeiden und um andererseits zu erreichen, daß über der befilmten Bohrung der Objektblende auch genügend viele Einheiten zu liegen kommen. Die Zusammenlagerung (Aggregation) kleinster kolloider Elementarteilchen zu sekundären Teilchen läßt sich durch Beigabe von Schutzkolloiden verhindern. Ferner können die Objekte (z. B. Bakterien) in die Flüssigkeit gebracht werden, aus der man den Trägerfilm herstellt, so daß jedes einzelne Individuum völlig vom Filmmaterial eingehüllt ist und dadurch im Präparat getrennt bleibt. Zur Verhinderung der Haufenbildung von Teilchen unter der Wirkung der Oberflächenspannungen wird der Präparatträger mit dem Flüssigkeitstropfen während dessen Verdunstung in Schwingungen versetzt (elektromagnetischer Schwingtisch, Stimmgabelvibrator). In besonders wirksamer Weise ermöglicht die Vakuumgefrierkammer die Vermeidung ungleichmäßiger Anhäufung (z. B. auch von Bakterien) beim Auftrocknen der Präparate. In ihr wird der die Objekte enthaltende Tropfen auf dem Präparatträger erst gefroren und in diesem Zustand dem Vakuum ausgesetzt. Beim Verdunsten des Tropfens setzen sich die in ihm enthaltenen Objektteilchen gleichmäßig auf dem Trägerfilm ab. Aerosole und Schwebeteilchen aus der Luft oder einem Gasstrom können unmittelbar oder nach Überführung in eine flüssige Phase, die dann zerstäubt (vernebelt) wird, auf dem Objektträger niedergeschlagen werden. Man läßt hierzu den die festen Bestandteile enthaltenden Gas- oder Nebentröpfchenstrom in sogenannten Kernfällern ein elektrisches oder auch ein thermisches Feld durchlaufen, von dem die Teilchen, bzw. Tröpfchen auf Präparatträger niedergeschlagen werden. Dieses Verfahren ist auch für quan-

titative Zwecke ausgebaut worden. Es ermöglicht dann die Zählung von Einheiten in einem bestimmten Flüssigkeits- oder Gasvolumen. Der Erfolg aller dieser Verteilungsmaßnahmen kann, wenn es sich um gröbere Gebilde handelt, unter dem Lichtmikroskop kontrolliert werden.

Objektteilchen, welche infolge ihrer zu kleinen Abmessungen oder ihrer zu geringen Dichte bei der Elektronendurchstrahlung gegen den Trägerfilm keinen merklichen Kontrast mehr liefern, werden dadurch sichtbar gemacht, daß der Trägerfilm auf der Seite des anhaftenden Objekts durch sehr flach einfallende Bedampfung mit einem geeigneten Metall „beschattet“ wird, wobei sich auf dem Trägerfilm hinter jedem Teilchen ein Schlagschatten bildet, der gut durchstrahlbar bleibt, während der übrige Film mit dem aufgedampften Metall weniger gut durchstrahlt wird. Die Länge der Schlagschatten entspricht der Teilchenabmessung senkrecht zum Trägerfilm, d. h. in der optischen Achse, gibt also gleichzeitig Auskunft über die dritte Dimension. Dieses Verfahren der Sichtbarmachung kleiner Unebenheiten durch Kontrasterhöhung mittels Schrägbedampfung eignet sich nicht nur für Originalpräparate, sondern auch für die Abdruckfilme, mittels derer die Reliefs von ungeätzten Metalloberflächen, aber auch die von vielen anderen Oberflächen, z. B. biologischer Objekte, im Durchstrahlungsmikroskop dargestellt werden können.

Die Herstellung von Oberflächenabdrucken selbst ist in den letzten Jahren so intensiv bearbeitet worden, daß eine nur annähernde Übersicht an dieser Stelle nicht gegeben werden kann.

Für einige Objektbehandlungen sind am Mikroskop selbst besondere Einrichtungen notwendig und angebracht worden. So werden durch besondere heizbare Fassungen für Objektträger die Präparate während der mikroskopischen Beobachtung auf gewünschte hohe Temperaturen erhitzt, so daß z. B. Umkristallisationen, wie sie bei Sintervorgängen vorkommen, beobachtet werden können. Es lassen sich ferner chemische Reaktionen mit Gasen, die während der Beobachtung am Objekt vorbeiströmen, verfolgen. Derartige Anordnungen, bei denen hinter dem Objekt auf einer kurzen Strecke ein stark erhöhter Gasdruck herrscht, können auch zur Hintanhaltung der sonst sehr rasch einsetzenden Vakuumtrocknung dienen.

Übermikroskopische Untersuchungen sind seit 1938 in steigendem Maß auf dem Gebiet der Medizin in der Bakteriologie und Virusforschung, bei Blutuntersuchungen und neuerdings auch in der Histologie und der Vererbungsforschung zur Lö-

sung spezieller Fragestellungen herangezogen worden. Auf chemischem Gebiet sind es vor allem die mit Grundlagen- und angewandter Forschung auf dem weiten Feld der organischen und anorganischen Kolloide befaßten Forscher, welche mit Vorteil von der neuen Methode Gebrauch machen, erstreckt sich doch die Erweiterung des Auflösungsvermögens durch das neue Gerät gerade über den gesamten als „kolloid“ definierten Bereich von Teilchengrößen. Genannt seien Untersuchungen über den Aufbau von hochmolekularen Stoffen, von natürlichen und künstlichen Fasern, Isoliermassen und Kunststoffen, von Füll- und Farbstoffen, von Stauben, Schwebstoffen, Rauchen und Rußen, ferner von Hölzern und Kohlen, von Gummi und Treibstoffen und von Katalysatoren, aber auch solche über Bestandteile von Tonen, Zementen und anderen keramischen Massen. In vielen Fällen konnte über den Aufbau hinaus auch der Zusammenhang zwischen Größe, Gestalt und technischen Eigenschaften dieser Stoffe aufgeklärt werden.

Während von 1939, in welchem Jahr durch Siemens & Halske die Lieferung und Aufstellung serienmäßiger Übermikroskope begann, bis 1944 in Deutschland etwa 40 Übermikroskope in Betrieb genommen wurden, dürften innerhalb der Vereinigten Staaten von Amerika, in denen seit 1941 ebenfalls Seriengeräte herausgebracht werden, bis Ende 1945 über 100 Geräte gebaut worden sein, von denen etwa 6 in England aufgestellt wurden. In Schweden, der Schweiz, Holland, England und Rußland sind bis 1945 einzelne Versuchsinstrumente gebaut worden, während man in neuester Zeit in einigen dieser Länder ebenfalls zu einer regulären Fertigung übergegangen ist. Die Zahl der auf allen Arbeitsgebieten erschienenen Veröffentlichungen ist seit 1938 in Deutschland rasch angestiegen und betrug dort Ende 1944 etwa 400. In den Vereinigten Staaten und der übrigen Welt zusammen wurden bis Ende 1945 etwa 250 Arbeiten veröffentlicht. Durch die wirtschaftlichen Kriegsfolgen und durch die Überführung des größten Teils der deutschen Übermikroskope in andere Länder wird die wissenschaftliche Arbeit im Ursprungsland der Übermikroskopie auch dann nur noch in beschränktem Maß möglich sein, wenn es gelingt, in Deutschland den Bau von Übermikroskopen wieder in Gang zu bringen. Außerhalb Deutschlands ist die Entwicklung und Herstellung von Elektronenmikroskopen, sowie die Verwendung dieser universellen Forschungsgeräte auf vielen Arbeitsgebieten in raschem Fortschreiten begriffen. Ein Blick insbesondere auf die immer stärker anwachsende amerikanische elektronenmikroskopische Literatur vermittelt hiervon einen überzeugenden Eindruck.