

BEITRÄGE ZUR ELEKTRONENOPTIK

*Vorträge von der Physikertagung 1936
sowie ergänzende Beiträge*

HERAUSGEGEBEN VON

H. BUSCH UND E. BRÜCHE

MIT 1 TITELBILD
UND 209 ABBILDUNGEN IM TEXT



1 9 3 7

VERLAG VON JOHANN AMBROSIOUS BARTH / LEIPZIG

Die Herausgeber hoffen so die Mängel, die einer Zusammenstellung unabhängig voneinander entstandener Vorträge naturgemäß immer anhaften, einigermaßen beseitigt zu haben. Die hierdurch entstandene Verzögerung im Erscheinen des Buches wird unserer Ansicht nach durch die erreichte Geschlossenheit der Darstellung mehr als aufgewogen.

Es bleibt uns nur noch übrig, dem Verlag für die auf die Ausstattung verwendete Sorgfalt und seine große Geduld gegenüber vielfachen Änderungswünschen und manchen Verzögerungen zu danken. Möge seine Mühe durch freundliche Aufnahme des Buches belohnt werden!

Darmstadt, Technische Hochschule
und Berlin, AEG-Forschungsinstitut
im Juli 1937

H. Busch

E. Brüche

Inhaltsverzeichnis

	Seite
I. Zur Einführung	
1. H. Busch, Grundlagen und Entwicklung der Elektronenoptik	1
[Vortrag von der Physikertagung, ZS. f. techn. Phys. 17, 584 (1936).]	
2. E. Brüche, Experimentelle Elektronenoptik und ihre Anwendung	6
[Erweiterter Vortrag von der Physikertagung, ZS. f. techn. Phys. 17, 588 (1936).]	
3. O. Scherzer, Die Aufgaben der theoretischen Elektronenoptik	14
[Vortrag von der Physikertagung, ZS. f. techn. Phys. 17, 593 (1936).]	
II. Abbildungssysteme und Abbildungsfehler	
4. K. Diels und G. Wendt, Die 8 Bildfehler dritter Ordnung magnetischer Elektronenlinsen	19
[Durchgesehener Abdruck aus ZS. f. techn. Phys. 18, 65 (1937).]	
5. Walter Glaser, Elektronenbewegung als optisches Problem	24
[Vortrag von der Physikertagung, vgl. auch ZS. f. techn. Phys. 17, 617 (1936).]	
6. O. Scherzer, Berechnung der Bildfehler dritter Ordnung nach der Bahnmethode	33
7. A. Recknagel, Elektronenspiegel und Elektronenlinse	42
[Erweiterter Vortrag von der Physikertagung, ZS. f. techn. Phys. 17, 643 (1936).]	
III. Das Elektronenmikroskop und seine Anwendung	
8. E. Ruska, Elektronenmikroskop und Übermikroskop	49
[Bisher unveröffentlichter Vortrag von der Physikertagung 1936.]	
9. F. Krause, Neuere Untersuchungen mit dem magnetischen Elektronenmikroskop	55
10. R. Suhrmann, Emissionsforschung mittels elektronenoptischer Methoden	61
11. H. Mahl, Das elektronenoptische Strukturbild und seine Anwendung	73
IV. Weitere elektronenoptische Geräte	
12. W. Größler, Elektronenoptik der Braunschen Oszillographenröhre	82
[Bisher unveröffentlichter Vortrag von der Physikertagung.]	
13. H. Rothe und W. Kleen, Die Bedeutung der Elektronenoptik in der Technik der Verstärkeröhren	94
[Vortrag von der Physikertagung, vgl. auch ZS. f. techn. Phys. 17, 635 (1936).]	
14. W. Schaffernicht und H. Katz, Der elektronenoptische Bildwandler	102
[Erweiterter Vortrag von der Physikertagung, ZS. f. techn. Phys. 17, 596 (1936).]	
15. Georg Weiß, Über Sekundärelektronen-Vervielfacher	112
[Vortrag von der Physikertagung, ZS. f. techn. Phys. 17, 623 (1936).]	
V. Fernsehen und Elektronenoptik	
16. Fritz Schröter, Die neuere Entwicklung der Fernsichttechnik	121
17. Max Knoll, Elektronenoptik der Fernseh-Bildfelderleger	129
[Vortrag von der Physikertagung, vgl. auch ZS. f. techn. Phys. 17, 604 (1936).]	
18. W. Heilmann, Über Arbeitsweise und Grenzen elektronenoptischer Bildabtaströhren	142
Literaturverzeichnis	149
Sachverzeichnis	153
Übernommene Abbildungen aus anderen Druckschriften	156

wobei $p(t)$ eine periodische Funktion der Zeit ist. Es tritt also ein ähnlicher Exponentialfaktor auf wie in (3).

Ausgehend von den Lösungen von (5) ist es nun einfach, die Bahnen auch für größere Entfernungen von der Sattelpunktebene zu berechnen. Man kann dies etwa durch eine Störungsrechnung tun, wobei die höheren Glieder in (4) als Störungen aufgefaßt werden, oder durch ein Verfahren der sukzessiven Approximation. So bestimmt man die Bahnen bis zu der bereits erwähnten Stelle z_0 . Dort schließt man sie stetig und mit stetiger Tangente an die in dem folgenden Teil des Feldes nach der „optischen“ Methode berechneten Bahnen an. Die im Gebiet des Sattelpunktes berechnete Bahn enthält drei willkürliche Konstanten, weil eine zur Erfüllung der Grenzbedingung bei $z = 0$ verbraucht ist. Diese Bahnen können bei willkürlicher Wahl der drei Konstanten stetig über die Trennstelle z_0 fortgesetzt werden, denn die „optisch“ berechnete Bahn enthält vier Konstante, die zur Erfüllung der Grenzbedingungen (z, z, r, \dot{r} stetig) ausreichen. Von den drei nun noch willkürlichen Konstanten ist eine durch die Energie festgelegt, eine durch die Richtung der Bahn im Unendlichen (das Elektron soll etwa parallel zur Achse verlaufen), die dritte Konstante bestimmt den zeitlichen Ablauf der Bahn. Damit ist die Grenzbahn eindeutig bestimmt, es ergibt sich im Unendlichen ein bestimmter Achsenabstand, der die durchgelassene Intensität angibt.

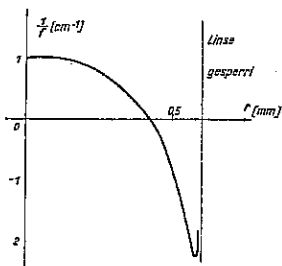


Abb. 55
Brechkraft bei verschiedenen
Achsenabständen

Auf diese Art konnte beispielsweise für das Potential (1) auf einfache Weise die Stromspannungscharakteristik berechnet werden. Doch soll hierauf nicht im einzelnen eingegangen werden.

Interessiert man sich nicht nur summarisch dafür, wieviel Elektronen durchgelassen und wieviel reflektiert werden, sondern verfolgt man die Bahnen der einzelnen Elektronen, so kommt man, elektronenoptisch gesprochen, zu einem Studium der Linsenfehler. Bei einer Spannung, bei der das System als Linse wirkt, führen die achsennahen Strahlen eine endliche Anzahl von Oszillationen in der Linse aus. Je größer der Achsenabstand ist, mit dem das Elektron in die Linse einfällt, um so kleiner wird die Axialgeschwindigkeit und um so öfter schwingt das Elektron hin und her. Im Grenzfall braucht es nach (3) unendlich lange Zeit, um gerade bis in die Linsenmitte zu kommen und führt dabei unendlich viele Schwingungen aus. Entsprechend diesen Überlegungen ergibt sich für die Brechkraft, jetzt betrachtet als Funktion des Achsenabstandes, eine Kurve wie in Abb. 55. Von dem Werte der Gaußschen Näherung ab bei $r = 0$ weicht die Brechkraft allmählich immer mehr ab, sie kann sogar das Vorzeichen wechseln, um schließlich in der Nähe des Grenzdiameter oszillierenden Charakter anzunehmen. Ähnliche Erscheinungen treten auch auf, wenn das System als Spiegel wirkt, doch zeigen sich hier nur endlich viele Schwingungen. Diese groben Abweichungen von der Gaußschen Näherung konnten von Hottenroth bei Versuchen mit Elektronenspiegeln beobachtet werden.

III. Das Elektronenmikroskop und seine Anwendung

8. Elektronenmikroskop und Übermikroskop

Von E. Ruska

1. Elektronenmikroskope und Abbildungsverfahren

Da es elektrische und magnetische Felder gibt, die auf Elektronenstrahlen wie Glaslinsen auf Lichtstrahlen wirken, ist es auch möglich, Mikroskope zu bauen, bei denen die Vermittlung des Bildes statt durch Lichtstrahlen mit Elektronenstrahlen vor sich geht. Je nachdem man für die Linsen elektrische oder magnetische Felder verwendet, spricht man vom elektrischen [32, 33] oder vom magnetischen [138] Elektronenmikroskop. Abb. 8 im einführenden Beitrag 2 von Brüche zeigte bereits Strahlengang und Aufbau des elektrischen Mikroskops. Links ist der Elektronen aussendende und zu beobachtende Gegenstand. Dicht davor befinden sich zwei lochscheibenförmige Elektroden, die gegenüber dem Gegenstand solche Potentiale haben, daß unmittelbar vor dem Gegenstand ein Sammelfeld entsteht, während im weiteren Verlauf das Feld zerstreut ist. Bei geeigneter Wahl der Spannungen überwiegt jedoch die Sammelwirkung, weil die Elektronen diese sammelnde Wirkung erfahren, während sie noch langsam, d. h. leicht beeinflussbar sind. Alle von den einzelnen Punkten des Gegenstandes ausgehenden Elektronen werden auf diese Weise wieder in entsprechenden Bildpunkten auf einem Leuchtschirm zusammengeführt.

Abb. 56 zeigt Strahlengang und Aufbau des magnetischen Mikroskops, mit dem wir uns hier vorzugsweise beschäftigen wollen. Dieses Gerät entspricht in seinem Strahlengang dem Projektionsmikroskop der Lichtoptik. Es enthält Strahlenquelle (Mikroskopierlampe), Kondensorenspule (Beleuchtungsapparat), Objektwechselkammer (Objektstisch), Objektivspule (Revolverobjektiv), Zwischenbildschirm, Projektionsspule und Aufnahmekammer (photographischer Aufsatz). Während das Vakuumgefäß der elektrischen Mikroskope aus Glas besteht, sehen wir hier ein Vakuumgerät aus Metall. Das Objekt wird mit der Objektivspule auf die Zwischenbildebene vergrößert abgebildet, die Projektionsspule vergrößert einen Teil dieses vergrößerten Bildes nochmals und bildet ihn auf der Bildebene (Leuchtschirm) ab.

Da die Aufgabe besteht, stark vergrößerte Abbildungen zu gewinnen, ist es notwendig, die Linsen dicht am Objekt und vom Bildschirm entfernt anzuordnen. Man muß deshalb auch sehr kurze Brennweiten erzielen. Beim elektrischen Mikroskop erreicht man diese durch Beeinflussung der Elektronen, solange sie noch langsam sind. Beim magnetischen Mikroskop kann man durch Anwendung starker Magnetfelder auch für schnelle Elektronen noch kleine Brennweiten erzielen. Abb. 57 zeigt das magnetische Objektiv [187] im Schnitt. Die Vakuumwand wird durch das innere Rohr der Spule gebildet. An die Flansche oben und unten schließen sich einerseits die Objektwechselkammer, andererseits der Tubus an. Die stromdurchflossene Windung ist bis auf einen schmalen Spalt des Innenrohres von Eisen umgeben. Es tritt daher die gesamte magnetische Spannung an den Rändern dieses Spaltes auf. Über ein Zwischenstück, welches Bohrungen zur Erleichterung des Auspumpens enthält, wird der magnetische Kraftfluß einem Paar ringförmiger Polschuhe

zugeführt, zwischen deren Enden so ein sehr kurzes Magnetfeld genügender Stärke erzeugt werden kann. Zwischen den Polschublen ist eine unmagnetische Blende angeordnet, um die optisch fehlerhaften Randfeldgebiete von der Mitwirkung bei

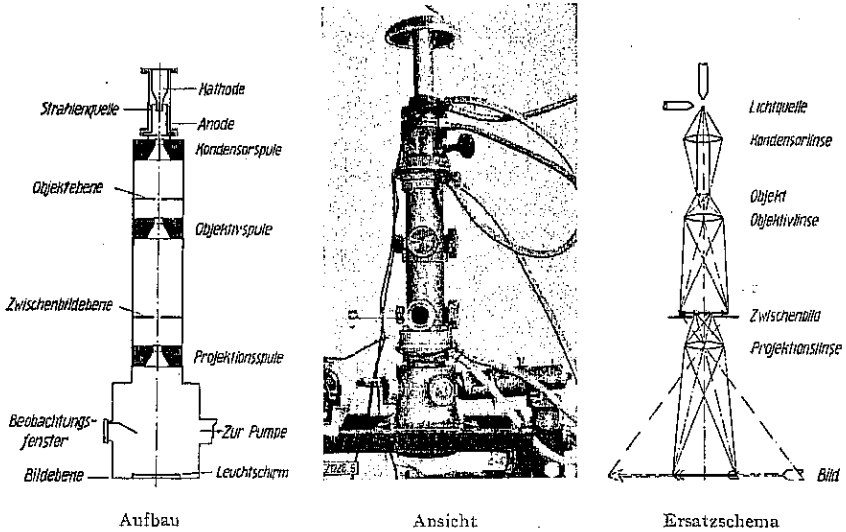


Abb. 56. Magnetisches Elektronenmikroskop

der Abbildung auszuschließen (Ablendung der Objektivapertur). Man erreicht mit diesem Objektiv bei Elektronengeschwindigkeiten von 40 kV Brennweiten von 3 mm,

d. h. ebenso wie beim elektrischen Mikroskop etwa von der Größe des freien Durchmessers der feldbildenden Elektroden bzw. Polschuhe. Dieselbe Linse benutzt man auch als Projektionslinse, da man in der zweiten Stufe ebenso hoch vergrößert als in der ersten.

Es überschreitet den Rahmen dieser Ausführungen, auf die weiteren wesentlichen Einzelteile des magnetischen Mikroskops [186] ausführlicher einzugehen, wie z. B. auf die Hochspannungsstrahlenquelle, Objektwechselkammer, Aufnahme-kammer und den erschütterungsfreien Aufbau des Geräts sowie die Herstellung sehr konstanter elektrischer Verhältnisse. Es ist selbstverständlich, daß ebenso wie in der

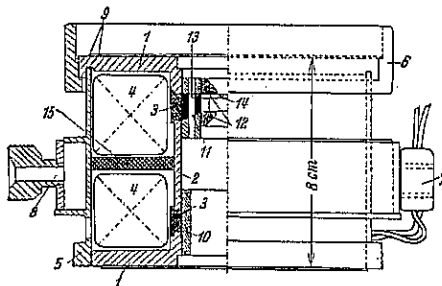


Abb. 57. Magnetisches Objektiv im Schnitt

1 Abschlußsteller aus Eisen. 2 Eisernes Innenrohr. 3 Spaltringe aus Messing. 4 Wicklungen. 5 Eisernes Außenrohr. 6 Anschlußmutter. 7 Anschlußklemme. 8 Wasserführung. 9 Dichtungsrippen. 10 Eiserner Spaltschluß. 11 Polschubträger. 12 Polschuhe. 13 Abstandsring (Messing). 14 Blende (Messing). 15 Trennscheibe (Eisen oder Messing)

Lichtmikroskopie die Güte der Ergebnisse fast ausschließlich von der zweckmäßigen und genauen technischen Durchbildung dieser Teile abhängt.

Mit den beschriebenen Elektronenmikroskopen lassen sich Gegenstände abbilden, von denen Elektronen ausgehen. Je nach der Art, wie die Elektronen vom Objekt ausgehen, kann man verschiedene Abbildungsverfahren unterscheiden [19a]:

1. Selbststrahlungsverfahren: die Elektronen entstehen im Objekt infolge
 - a) glühelektrischer Auslösung durch Erhitzen,
 - b) lichtelektrischer Auslösung durch sichtbares, ultraviolettes und Röntgen-Licht,
 - c) Auslösung durch Elektronen- und Ionenstrahlung.
2. Fremdschichtverfahren: die Elektronen entstehen in einer auf den zu untersuchenden Gegenstand aufgetragenen dünnen Emissionsschicht infolge
 - a) glühelektrischer Auslösung durch Erhitzen,
 - b) lichtelektrischer Auslösung durch sichtbares, ultraviolettes und Röntgen-Licht,
 - c) Auslösung durch Elektronenstrahlung.
3. Rückstrahlungsverfahren: auf den Gegenstand werden von der Objektivseite her schnelle Elektronenstrahlen gerichtet; elastisch reflektierte Elektronen mit annähernd Primärgeschwindigkeit bilden das Objekt ab.
4. Durchstrahlungsverfahren: das Objekt wird in Form einer dünnen Folie (Dünnschnitt oder Trägerfolie) von schnellen Elektronenstrahlen durchschossen; die mit annähernd Primärgeschwindigkeit das Objekt verlassenden Elektronen führen die Abbildung herbei.

Bei den ersten beiden Verfahren entstehen die abbildenden Elektronen am zu beobachtenden Gegenstand und verlassen diesen als langsame Strahlen. Bei den letzten

beiden Verfahren entstehen die abbildenden Elektronen in einer besonderen Strahlenquelle (Mikroskopierlampe) und treffen das Objekt als schnelle Strahlen. Hiermit können also beliebige nicht-strahlende Objekte durch Zuhilfenahme eines Beleuchtungsapparats beobachtet werden.

Das zunächst bequemste Anwendungsgebiet ist das Selbststrahlungsverfahren, welches jedoch nicht die Beobachtung beliebiger Gegenstände, sondern nur die von verschiedenen Kathodenarten gestattet, d. h. die Beobachtung von Elektronenstrahlern im eigenen Licht. Es ist daher die Frage, ob die zahlreichen auf diesem Gebiet bereits vorliegenden und für die Emissionsforschung wertvollen Untersuchungen, die in dem Beitrag 9 von *Suhrmann* behandelt sind, zur eigentlichen Mikroskopie zu zählen sind. In der Lichtoptik jedenfalls denkt man bei dem Wort Mikroskopie durchaus nicht an die Untersuchung von Lichtquellen, sondern vielmehr an die vergrößerte Abbildung beliebiger Gegenstände mittels Lichtstrahlen. Die letzten drei Verfahren dagegen betreffen tatsächlich die eigentliche Mikroskopie.

Als Fremdschichtverfahren bezeichnet man die Untersuchung von Gegenständen, die mit einer dünnen Elektronen emittierenden Schicht überzogen sind, deren Oberflächen also künstlich zu Kathoden gemacht sind. Als Fremdschicht wird beispielsweise eine dünne Bariumschicht gewählt, die beim Glühen des Objekts Elektronen aussendet. Auf diese Weise wurden geschliffene Nickel- und Eisenschichten bei Temperaturen von $600-800^{\circ}\text{C}$ untersucht. Je nach dem Winkel, unter dem die Kristalle angeschliffen sind, kommen auf diesen Flächen infolge verschiedener Austrittsarbeit mehr oder weniger intensive Emissionen zustande, so daß man unmittelbar die Kristallgrenzen beobachten kann. Besonders lehrreich ist es, zu verfolgen, wie sich beim Über- oder Unterschreiten gewisser Temperaturen das Gefüge verändert. Über diese Anwendungen vergleiche man den Beitrag 10 von *Mahl*.

Das Rückstrahlungsverfahren entspricht in gewisser Weise der Auflichtmikroskopie. Abb. 58 zeigt das Schema des Strahlengangs. Ein Strahl schneller Elektronen

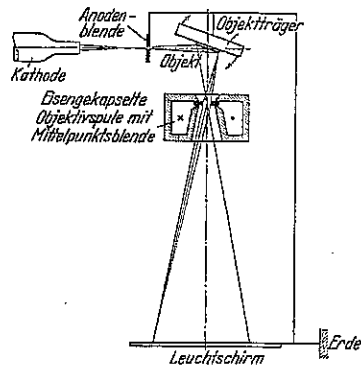


Abb. 58. Rückstrahlungsverfahren (Auflichtmikroskopie)

wird von links auf das Objekt geschossen. Die Abbildung kommt zustande mittels der elastisch reflektierten Elektronen, soweit sie in die Objektivöffnung gelangen. Das Verfahren ist daher lichtschwächer und leidet unter der Tatsache, daß die reflektierten Elektronen in ihrer Geschwindigkeit nicht mehr genügend einheitlich sind. Es erlaubt aber die Untersuchung dicker Objekte, ohne daß diese gegläht oder photoempfindlich bzw. sekundäremittierend sein oder gemacht werden müssen.

Das bisher und wahrscheinlich auch in Zukunft wichtigste Verfahren der eigentlichen Elektronenmikroskopie, d. h. für die Untersuchung beliebiger Gegenstände mittels Elektronenstrahlen, ist jedoch ebenso wie in der Lichtmikroskopie das Durchstrahlungsverfahren. Hier erhält man aus verschiedenen

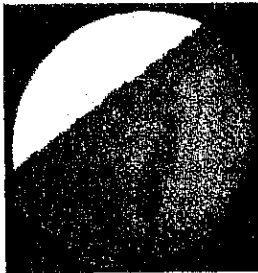


Abb. 59. Durchstrahlungsbild einer 1μ Al-Folie bei 60 kV Strahlspannung

Gründen die besten Verhältnisse mit schnellen Elektronen. Als Linse kleiner Brennweite kommt für diese Elektronen nur das magnetische Objektiv in Frage. Abb. 59 zeigt das erste Strukturbild, das nach diesem Verfahren erhalten wurde [19], eine mit 60 kV schnellen Elektronen durchstrahlte, 1μ starke Aluminiumfolie. Die schon recht gute Abbildung kann man besonders aus dem scharf gezackten Rand der über einer Lochblende ausgespannten Folie erkennen. Mit dem Durchstrahlungsverfahren kann man sowohl sehr genaue Umrissbilder erhalten (vgl. Folienkante, Abb. 59), als auch Strukturbilder. Die Einzelheiten der Strukturen kommen dabei nicht, wie man zuerst annehmen sollte, durch verschieden starke Absorption zustande, sondern vielmehr durch verschieden starke Streuung der Elektronen an Stellen verschiedener Dicke oder an solchen verschiedener Materialdichte. In beiden Fällen gelangen in die enge Öffnung des Objektivs verschieden viele Elektronen und ergeben so im Bild Helligkeitsunterschiede.

2. Möglichkeiten des Elektronenmikroskops

Nach der Aufzählung der grundsätzlichen Abbildungsverfahren und ihrer Wertung soll noch zu der ebenso grundsätzlichen Frage Stellung genommen werden, weshalb man überhaupt Elektronenmikroskopie betreiben soll. Es sind im wesentlichen drei Punkte, weshalb man hier Ergebnisse erwarten kann, die über die der Lichtmikroskopie hinausgehen.

Zunächst einmal „sieht man die Dinge in einem anderen Licht“. Das ist für die umfassende und objektive Betrachtung der Dinge immer ein Vorteil. Beim Lichtmikroskop entstehen bekanntlich die Konturen im Bild des durchstrahlten Objekts durch Brechung und Beugung des Lichtes an den Stellen des betrachteten Gegenstandes, an welchen Gebiete von verschiedenem Brechungsindex zusammenstoßen. Beim Elektronenmikroskop dagegen ist bei hinreichend großer Elektronengeschwindigkeit maßgebend das Produkt aus durchstrahltem Weg mal spezifischem Gewicht, die durchstrahlte Massendicke. Hierdurch treten andere Einzelheiten hervor, die das Lichtmikroskop überhaupt nicht oder nur unvollkommen wiedergibt.

Ein weiterer Grund zur Verfolgung der Elektronenmikroskopie ist die Möglichkeit der Beobachtung bei hohen Temperaturen. Wie die zahlreichen Aufnahmen nach dem Selbststrahlungs- und Fremdschichtverfahren mit glühelektrischem Elektronenaustritt¹⁾ gezeigt haben, treten hierbei sehr klare Einzelheiten hervor, während lichtmikroskopische Aufnahmen glühender Flächen diese Einzelheiten nicht zeigen, da die Lichtausstrahlung der einzelnen Objektgebiete wegen der gleichen Temperatur ebenfalls gleichmäßig erfolgt.

¹⁾ Einzelheiten sind aber auch zu erwarten bei der Beobachtung glühender Objekte mittels Rück- und Durchstrahlung.

Der entscheidende Fortschritt aber, den die Elektronenmikroskopie ermöglicht, ist die Steigerung der Auflösung kleinster Einzelheiten. Die kleinste, durch jedes Mikroskop noch auflösbare Strecke d ist nach Abbe bekanntlich der Wellenlänge λ der abbildenden Wellenstrahlung proportional. Es gilt $d = \lambda/A$, wobei A die numerische Apertur des abbildenden Objektivs bedeutet. Nun entspricht den Elektronen des verwendeten Geschwindigkeitsbereichs nach de Broglie eine Wellenlänge, die um 4—5 Größenordnungen kleiner ist als die des sichtbaren Lichts. Selbst wenn man beim Elektronenmikroskop zur möglichsten Verringerung von Abbildungsfehlern der verwendeten Elektronenlinsen die Winkelöffnung des abbildenden Strahls um 1—2 Größenordnungen kleiner hält als bei den Grenzleistungsobjektiven der



60 kV; 0,3 mA; 0,017 Sek.

a) Elektronenbild



b) Lichtbild

Abb. 60

Mikrophotogramme, aufgenommen mit Elektronenmikroskop und Lichtmikroskop.
Wurzel der Vogelnestwurz (*Neottia nidus avis*)

Lichtmikroskopie, so kann man immer noch allermindestens ein um 2 Größenordnungen besseres Auflösungsvermögen erwarten. Es braucht kaum betont zu werden, daß bei den heute gesicherten Vorstellungen ein solches Vordringen in diese Bereiche, insbesondere für die Medizin und Biologie, aber auch für fast alle anderen Zweige der Naturerkenntnis von entscheidender Bedeutung ist. Das Lichtmikroskop ist nun aber in der Tat schon bis an seine natürliche Leistungsgrenze entwickelt worden. Da die Wellenlänge des sichtbaren und des ultravioletten Lichts festliegt, so hat man seit Abbe während vieler Jahrzehnte in mühevoller Arbeit die Aperturen der Objektive zu steigern versucht und hierdurch sowie durch besondere Beleuchtungsverfahren und durch Anwendung ultravioletten Lichts die Auflösungsfähigkeit noch um einiges verbessert. Die so endgültig erreichte kleinste aufgelöste Strecke beträgt etwa $0,08 \mu$. Das Erreichen solcher Mikrogramme ist jedoch schon mit erheblichem Aufwand an Mitteln und Zeit verbunden. So findet man in Büchern über mikroskopische Technik oder über in dieser Richtung besonders interessierende Gebiete, wie beispielsweise Gewebelehre, meistens nur Abbildungen mit höchstens $0,5 \mu$ großen aufgelösten Einzelheiten.

Durch die Begrenzung des Lichtauflösungsvermögens sind aber der Erkenntnis empfindliche Schranken gezogen. Beispielsweise ist die Gewebelehre, die seit den 70er Jahren des vorigen Jahrhunderts durch das Mikroskop eine glanzvolle Entwicklung zu verzeichnen hatte, heute zu einem gewissen Stillstand gekommen, der zum Teil mit der Unmöglichkeit höherer Auflösungen zusammenhängt. Hier wie in anderen Gebieten eröffnen sich durch das Elektronenmikroskop neue Möglichkeiten. Daß bereits Erfolge mit der Durchstrahlungsbeobachtung von Geweben erzielt worden sind, zeigt Abb. 60a. Es ist die Aufnahme einer Wurzelzelle der Vogelnestwurz, die Marton-Brüssel [1960a] mit dem magnetischen Mikroskop gemacht hat. Marton hat bisher hauptsächlich „Färbungsverfahren“ untersucht und bevorzugte dabei die Tränkung der Präparate mit Osmiumsalzen. Bei solchen Tränkungsverfahren

muß man natürlich erst das Bild deuten lernen, um auf die gesuchten Objekteigenschaften sicher schließen zu können. Mancher mag auch einwenden, daß eine solche Vorbehandlung das Mikroskopieren erschwert. Dagegen ist jedoch zu sagen, daß gerade in der Lichtmikroskopie Fixierungs- und Färbungsverfahren, und zwar solche schwierigster Art, die zum Teil durch Jahre für einzelne Objektarten mühevoll entwickelt wurden, erst zum vollen Erfolg der mikroskopischen Forschungen geführt haben und deshalb auch jederzeit in Kauf genommen worden sind. Abb. 61 zeigt das lichtmikroskopische Bild desselben Unterhautgewebes der Ratte, in dem durch verschiedenartige Färbung ganz verschiedene Einzelheiten sichtbar werden. Ein vollständigeres Bild des Gewebes würde man durch Übereinanderkopieren der vier Einzelbilder erhalten. Derartige Färbungsbilder mußten selbstverständlich auch in der Lichtmikroskopie durch immer wiederholten genauen Vergleich ihre endgültige Deutung erfahren. Ungefärbt würde dieses Gewebe ebenso wie auch z. B. das der menschlichen Haut keine Einzelheiten ergeben; erst die Färbung mit speziellen

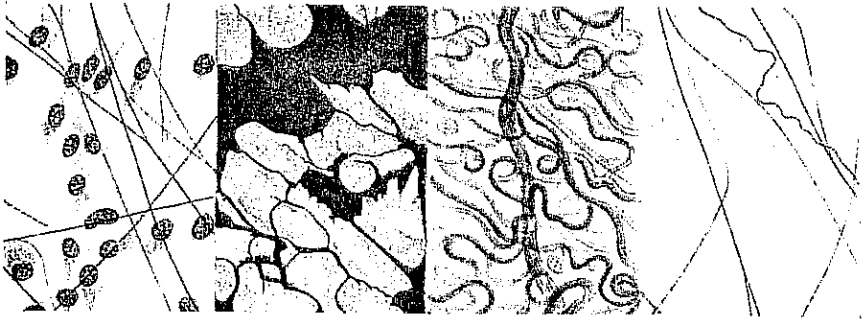


Abb. 61. Lichtmikroskopische Aufnahmen des Unterhautgewebes der Ratte bei verschiedener Färbung

Stoffen, die von den einzelnen Zellarten besonders angelagert werden, lassen eben diese Zellen im Bild erkennen.

Beim Elektronenmikroskop treten Strukturen auch schon deshalb hervor, weil die Materie in verschiedener Dichte oder in verschiedener Dicke gelagert ist. Wie weit man heute schon mit der Abbildung von Zellen und Diatomeen gekommen ist, zeigen Aufnahmen von Krause [142] mit der Neubabelsberger Apparatur. Diatomeen sind einzellige Kieselalgen, deren Panzer so feine Strukturen aufweist, daß man sie seit langem in der Lichtmikroskopie zur Prüfung des Auflösungsvermögens von Objektiven benutzt. Bei diesen Aufnahmen wurden neuerdings Gitterstrukturen bis herunter zu $0,123 \mu$ Gitterabstand noch aufgelöst. Vgl. den nachfolgenden Bericht von Krause.

Bedenkt man, daß diese Aufnahmen immer noch mit den ersten, besonders für Mikroskopierzwecke gebauten magnetischen Objektiven (vgl. Abb. 57) gemacht wurden, und berücksichtigt man, welche Verbesserungsmöglichkeiten sich in allen Teilen des magnetischen Mikroskops noch bieten bezüglich der Fehlerfreiheit der Objektive, der Vermehrung der Abbildungsstufen und der Vereinfachung der Handhabung des Gerätes, aber auch bei den Präparierverfahren, und vergegenwärtigt man sich schließlich die Fülle der vorliegenden Probleme, so kann man als sicher aussprechen, daß das magnetische Mikroskop als Übermikroskop erst am Anfang einer sehr bedeutenden Entwicklung steht.