

Das Elektronenmikroskop und seine Anwendungen

Von B. von Borries und E. Ruska, Berlin

Aufbau und Wirkungsweise des elektrischen und des magnetischen Elektronenmikroskops werden dargestellt. Bisherige Entwicklung und Ergebnisse werden beschrieben, Möglichkeiten der Weiterentwicklung werden kritisch untersucht.

Grundlagen

Die Gegenstände unserer Umwelt werden uns sichtbar durch die Lichtstrahlen des sichtbaren Wellenbereichs, die von ihnen ausgehen oder zurückgeworfen werden. Die Augenlinse entwirft ein reelles Bild der Objekte auf der Netzhaut, das unserer Empfindung durch den Augennerv vermittelt wird. Die Geräte der gewöhnlichen Lichtoptik, z. B. Lichtbildkammer, Fernrohr, Mikroskop, beruhen auf zwei Eigenschaften des Lichtes:

1. In durchsichtigen, homogenen Mitteln breitet sich das Licht gradlinig aus.
2. An der Grenzfläche zweier verschiedener Mittel wird das Licht gesetzmäßig gebrochen.

Durch geeignet geschliffene Linsen erzielt man Strahlengänge, durch die man Gegenstände vergrößert oder verkleinert wiedergeben kann. Hierbei betrachtet man entweder reelle Bilder durch eine Lupe, wie beim gewöhnlichen Mikroskop, oder man fängt ein reelles Bild auf einem Schirm zur Betrachtung oder auf einer photographischen Schicht zur dauernden Festlegung auf.

Man kann nun auch Gegenstände, die Elektronenstrahlen aussenden, mittels dieser abbilden und sichtbar machen. Dies beruht auf drei Eigenschaften der Elektronen:

1. Sie bewegen sich im luftleeren Raum gradlinig fort.
2. Durch elektrische oder magnetische Felder lassen sie sich gesetzmäßig ablenken; insbesondere gelingt es, mit gegeneinander aufgeladenen Lochscheiben rotationssymmetrische elektrische Felder und mit stromdurchflossenen Ringspulen rotationssymmetrische magnetische Felder zu erzeugen, die die Elektronenstrahlen wie die Sammellinse die Lichtstrahlen beeinflussen¹⁾. Wegen dieses „quasioptischen“ Verhaltens der Elektronen spricht man von geometrischer Elektronenoptik.

3. Wenn Elektronen auf einen Schirm mit geeigneten Fluoreszenzstoffen fallen, leuchtet er entsprechend der Intensität der einfallenden Strahlung auf. Treffen Elektronen auf eine photographische Schicht, so rufen sie eine entsprechende Schwärzung hervor. In beiden Fällen kann man also das Elektronenbild dem Auge sichtbar machen.

¹⁾ Sowohl die elektrischen, als auch die magnetischen Elektronenlinsen sind chromatische Linsen, d. h. ihre Brennweite ist verschieden für Elektronen verschiedener Geschwindigkeit, die der Farbe der sichtbaren Strahlung entspricht. Man hat in der Elektronenoptik aber glücklicherweise praktisch immer einfarbige Strahlung, d. h. Elektronen gleicher Geschwindigkeit, weil die Elektronen alle durch die gleiche Anodenspannung auf ihre Endgeschwindigkeit beschleunigt werden. (Man mißt daher der Einfachheit halber die Geschwindigkeit der Elektronen außer in cm/s auch in V Beschleunigungsspannung und spricht von „Voltgeschwindigkeit“). Es fallen daher die durch den chromatischen Charakter der Linsen gegebenen Beschränkungen im allgemeinen nicht wesentlich ins Gewicht. Die Wellenlänge der Elektronenstrahlung ist mit der Elektronengeschwindigkeit bzw. mit der Beschleunigungsspannung verknüpft durch die Beziehung nach de Broglie:

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{12,3 \cdot 10^{-8}}{\sqrt{U}} \text{ (cm);}$$

darin bedeuten:

- λ = Wellenlänge in cm
- h = Plancksches Wirkungsquantum
- m = Masse
- v = Geschwindigkeit
- U = durchfallende Spannung der Elektronen in V.

Elektronenoptische Geräte, deren Strahlengang dem der Mikroskope entspricht, nennt man gleichermaßen Elektronenmikroskope. Je nachdem die optische Beeinflussung der Strahlen elektrisch oder magnetisch erfolgt, spricht man vom elektrischen²⁾ oder magnetischen³⁾ Elektronenmikroskop.

Das elektrische Elektronenmikroskop, Abb. 1 und 2, besteht aus einer ebenen, Elektronen aussendenden Glüh- oder Photokathode a , zwei Lochblenden b_1 und b_2 , und dem in einiger Entfernung aufgestellten Leuchtschirm c . Die ganze Anordnung befindet sich auf einer optischen Bank in einem Gefäß äußerst niedrigen Gasdrucks (unter 10^{-5} mm AS, Hochvakuum). Die Lochblenden sind gegenüber der Kathode auf bestimmte Potentiale gebracht; sie erzeugen Potentialfelder, die die von einem Punkt der Kathode ausgehenden Strahlen wieder in einem Punkt auf dem Schirm zusammenführen, so daß hier ein umgekehrtes reelles Bild der Kathode entsteht. Die kleinste erzielbare Brennweite solcher Objektivlinsen, die für die erreichbare Vergrößerung maßgebend ist, ist etwa von der Größe des lichten Linsendurchmessers. Der Abstand der Scheiben, zwischen denen die volle Beschleunigungsspannung liegt, ist gleichfalls von dieser Größe. Das Mikroskop wird in der Regel mit Voltgeschwindigkeit der Elektronen von etwa 100 bis 1000 V betrieben¹⁾; das Gerät wurde bisher ausschließlich in Glas ausgeführt.

¹⁾ E. Brüche u. H. Johannson, Naturwiss. Bd. 20 (1932) S. 49 u. 858.
²⁾ M. Knoll u. E. Ruska, Ann. Physik Bd. 12 (1932) S. 607.

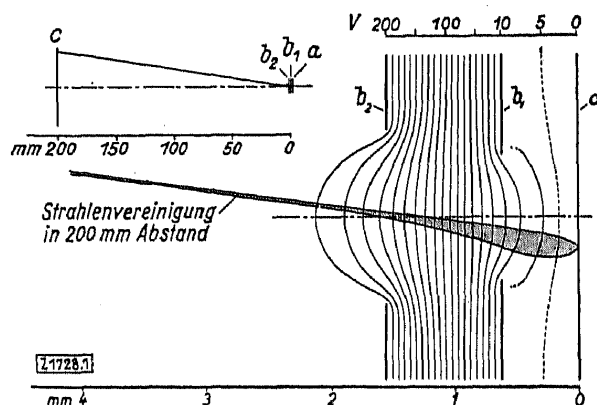


Abb. 1. Strahlenverlauf und Potentialfeld.

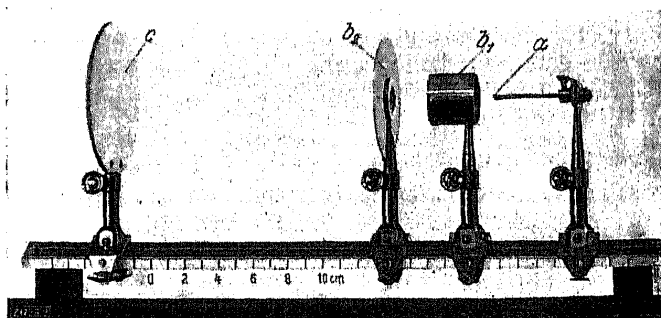


Abb. 2. Aufbau auf der optischen Bank (Glasglocke entfernt).

- a Glühkathode
- b_1, b_2 Lochblenden, die auf bestimmtes Potential gegenüber der Kathode gebracht sind
- c Leuchtschirm

Abb. 1 bis 2. Elektrisches Elektronenmikroskop.

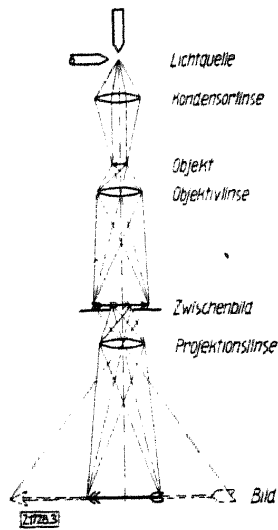


Abb. 3. Strahlengang des Projektionsmikroskops.

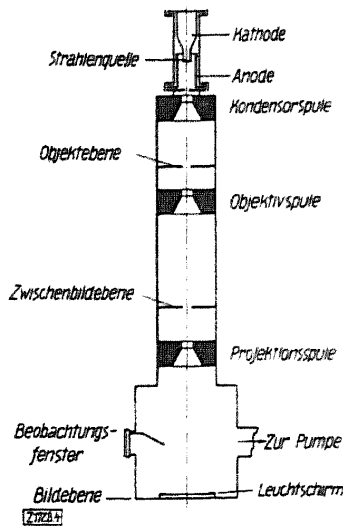


Abb. 4. Schematischer Schnitt des Elektronenmikroskops.

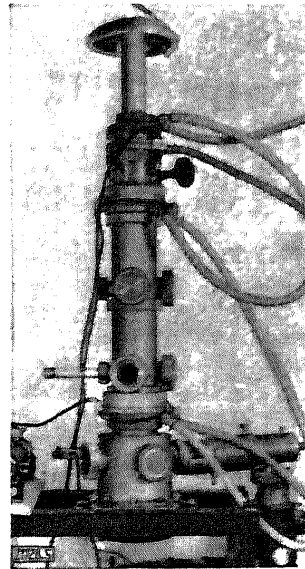


Abb. 5. Ansicht des Elektronenmikroskops.

Das magnetische Elektronenmikroskop, Abb. 4 und 5, entspricht in der Wirkungsweise dem Projektionsmikroskop, Abb. 3. 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.

Abb. 3 bis 5. Magnetisches Elektronenmikroskop mit zweistufiger Vergrößerung verglichen mit dem Projektionsmikroskop.

Das magnetische Elektronenmikroskop, Abb. 3 bis 5, entspricht im Strahlengang dem Projektionsmikroskop mit Kondensorlinse, Objektiv und Projektionslinse. Als Linsen dienen hier Spulen, die bis auf einen kleinen Spalt im Innern vollständig in Eisen gekapselt sind, s. Abb. 4. Die Ränder des Spaltes werden als ringförmige Polschuhe ausgebildet; hier wird das magnetische Feld sehr stark zusammengedrängt und dadurch die erforderliche kurze Brennweite erzielt. Die kleinste Brennweite ist hierbei ebenfalls etwa von gleicher Größe wie der lichte Durchmesser zwischen den Eisenrändern des Spaltes. Beim magnetischen Elektronenmikroskop hat sich bisher die Metallbauweise gut bewährt. Gearbeitet wird mit Voltgeschwindigkeiten der Elektronen von etwa 100 bis 100 000 V. Der beherrschte Geschwindigkeitsbereich ist also größer.

Abbildungsverfahren

Mit beiden Geräten kann man Körper untersuchen, von denen Elektronen ausgehen. Dies kann durch vier grundsätzlich verschiedene Verfahren erreicht werden.

Selbststrahlungsverfahren

Aus dem zu untersuchenden Körper treten Elektronen mäßiger Geschwindigkeit aus unter dem Einfluß von Temperaturerhöhung (Glühkathode), von Einstrahlung mit Licht oder Röntgenstrahlen (Photokathode) oder von Einstrahlung von Korpuskularstrahlen (Sekundärkathode, z. B. kalte Kathode der Gasentladung). Eine Anodenspannung beschleunigt diese Elektronen und bringt sie auf gleiche Geschwindigkeit; der Elektronenstrahl wird schon während der Beschleunigung oder später vom Objektiv optisch beeinflusst. Abb. 6 zeigt ein kennzeichnendes Bild einer Oxydkathode mit eingeritzten Strichen und örtlicher Emissionsverteilung; Abb. 7 ist eine Abbildung mit Hilfe von Photoelektronen⁴⁾.

Fremdstrahlungsverfahren

Der zu untersuchende Körper wird mit einer sehr dünnen Schicht von solchen Stoffen überzogen, die leicht Glüh- oder Photoelektronen aussenden. Auch hier ist eine Beschleunigung der Elektronen notwendig. Als Beispiel einer Abbildung mittels einer aufgedampften Bariumschicht diene Abb. 8, die die Kristallstruktur einer Nickelfläche zeigt⁵⁾.

Rückstrahlungsverfahren

Bestrahlt man die Oberfläche eines Körpers mit Elektronen, so werden diese zum Teil elastisch zurückgewor-



Abb. 6. Bild einer Oxydkathode mit eingeritztem Strichgitter. Aufnahme mit elektrischem Elektronenmikroskop. Vergr. 65 fach, Wiedergabe davon 2/10.

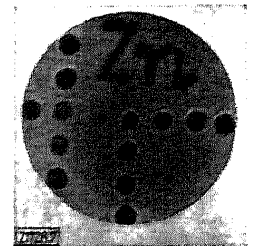


Abb. 7. Bild einer Photokathode. Mit ultraviolettem Licht bestrahltes durchbohrtes Zinkblech mit Fettschrift. Aufnahme mit magnetischem Elektronenmikroskop. Vergr. 6 fach, Wiedergabe davon 1/1.

Abb. 6 und 7 Selbststrahlungsbilder.

fen. Dabei ist die Geschwindigkeit der zurückgeworfenen Strahlen weniger gleichmäßig als die der ursprünglichen; jedoch findet sich ein wesentlicher Teil der Elektronen mit der gleichen Geschwindigkeit. Mittels dieser rückgestrahlten Elektronen gelingt eine Abbildung der bestrahlten Oberfläche, wie Abb. 9 zeigt⁶⁾. Das Verfahren entspricht der lichtoptischen Betrachtung im Auflicht.

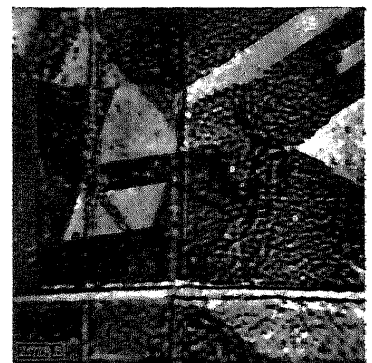


Abb. 8. Fremdstrahlungsbild eines kristallinen Nickelblechs. Aufnahme mit elektrischem Elektronenmikroskop. Vergr. 60 fach, Wiedergabe davon 2/10.

Durchstrahlungsverfahren

Elektronen hinreichender Geschwindigkeit vermögen dünne Masseschichten zu durchdringen. Sie werden dabei, wenn die Schichten genügend dünn sind, nur wenig in ihrer Geschwindigkeit verändert und nur wenig absorbiert. Die durchstrahlten Schichten lassen sich scharf und fehlerfrei abbilden, wie Abb. 10 zeigt⁷⁾.

⁴⁾ E. Brüche, Z. Physik Bd. 86 (1933) S. 448.
⁵⁾ E. Brüche, Arch. Elektrotechn. Bd. 23 (1934) S. 354. Das Verfahren wurde von F. G. Houtermanns angegeben.

⁶⁾ E. Ruska, Z. Physik Bd. 83 (1933) S. 492.
⁷⁾ E. v. Borries u. E. Ruska, Z. Physik Bd. 83 (1933) S. 187.

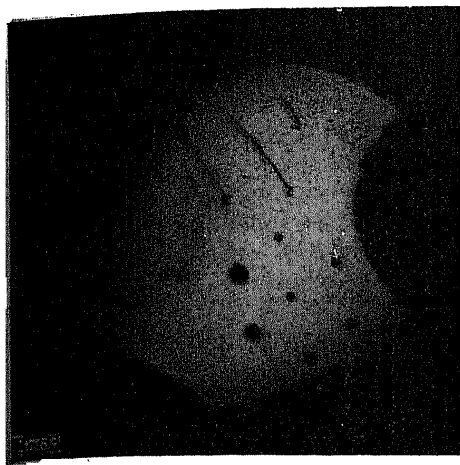


Abb. 9 (links)
Rückstrahlungsbild
eines Gold-
Platin-Blechs.
Aufnahme mit
magnetischem
Elektronen-
mikroskop.
Vergr. 10 fach,
Wiedergabe
davon $\frac{1}{8}$.

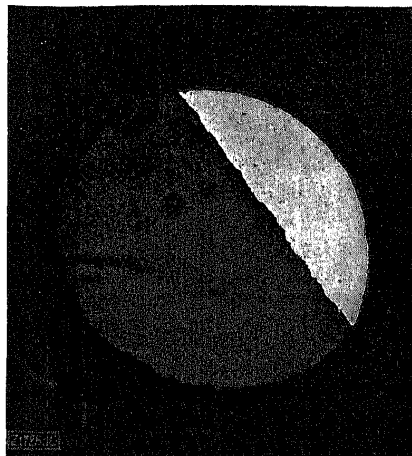


Abb. 10
(rechts)
Durch-
strahlungsbild
von $0,8 \mu$
dickem Blatt-
aluminium.

Aufnahme mit magnetischem Elektronenmikroskop.
Vergr. 20 fach, Wiedergabe davon $\frac{1}{10}$.



Abb. 11. Fremd-
strahlungsbild einer
glühenden kristallinen
Eisenfläche.

Aufnahme mit elek-
trischem Elektronen-
mikroskop.
Vergr. 60 fach,
Wiedergabe davon $\frac{1}{10}$.

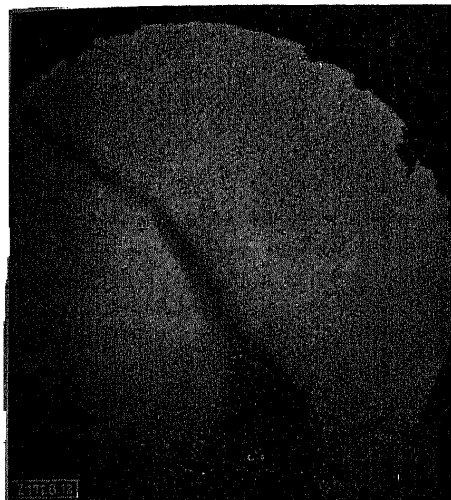


Abb. 12. Verkohlte Baumwollfaser.
Vergr. 12 000 fach, Wiedergabe davon $\frac{1}{8}$.



Abb. 13. Chitinhaut eines Fliegenflügels.
Vergr. 2500 fach, Wiedergabe davon $\frac{1}{8}$.

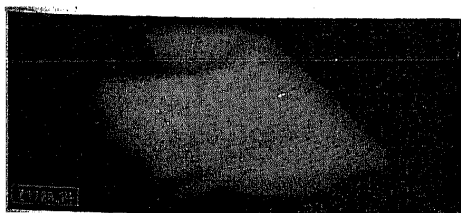


Abb. 14. Rand eines Fliegenbeins.
Elektronenoptische Vergr. 5000 fach, lichtoptisch
weiter vergr. 5 fach, Wiedergabe davon $\frac{1}{10}$ (Gesamtvergrößerung also 25 000 fach).

Abb. 12 bis 14. Durchstrahlungsbilder
mit sehr hoher Vergrößerung.
Aufnahmen mit magnetischem
Elektronenmikroskop.

Zur Ausführung dieser vier Verfahren sind elektrisches und magnetisches Elektronenmikroskop nicht in gleicher Weise geeignet. In den Fällen der Selbst- und Fremdstrahlung, wo die austretenden Elektronen ohnehin beschleunigt werden müssen, wird man mit Vorteil diese Beschleunigungsanordnung als Objektiv ausbilden und damit zum elektrischen Elektronenmikroskop kommen. Das ist jedoch nur möglich, wenn man keine hohen Voltgeschwindigkeiten verwenden will; bei hohen Voltgeschwindigkeiten würden die Schwierigkeiten der Beherrschung so hoher Gleichspannungen auf kleinen Abständen im Vakuum und auch der Aufwand zu ihrer stetigen Regelung erheblich anwachsen.

Für Rückstrahlung und Durchstrahlung benötigt man ohnehin schnelle Elektronen, so daß man das elektrische Elektronenmikroskop schlecht anwenden kann. Im Falle des magnetischen Elektronenmikroskops dagegen kann man mit etwas größerem Aufwand auch für schnelle Elektronen hinreichend fehlerfreie und leicht regelbare Linsen kleiner Brennweite herstellen. Mit dem magnetischen Elektronenmikroskop sind daher bis jetzt auch weitaus die stärksten elektronenoptischen Vergrößerungen (12 000fach) nach dem Durchstrahlungsverfahren erreicht worden.

Bisherige Anwendungen

Das nächstliegende Anwendungsgebiet⁸⁾ ist die Untersuchung von Selbststrahlern. Hier hat man technisch bedeutsame Untersuchungen an Glühkathoden mit dem elektrischen und dem magnetischen Elektronenmikroskop durchgeführt, die die Klärung des Formierungs- und Alterungsvorganges wesentlich gefördert haben. Auch bei kalten Kathoden von Hochspannungs-Ionenröhren ist die Alterung elektronenmikroskopisch verfolgt und festgehalten worden⁹⁾.

Eine besonders wichtige Anwendung hat sich aus den Glühkathodenuntersuchungen entwickelt. Nach längerem Glühen verdampft das auf die Metallunterlage aufgebrachte Alkalioxyd mehr und mehr, bis nur noch äußerst dünne aktive Schichten übrig bleiben. Dabei werden Kristallgrenzen des Trägermetalls sichtbar, weil die aktiven Schichten verschieden stark Elektronen und Wellenstrahlen aussenden, je nachdem die Trägerkristalle von der Oberfläche ange schnitten sind. Nach diesem Verfahren ist die Kristallstruktur des Nickels eingehend untersucht worden. In jüngster Zeit ist es auch gelungen, das Verfahren auf Eisen auszudehnen¹⁰⁾, siehe Abb. 11. Hierbei konnten die am Umwandlungspunkt des Eisens bei rd. 750° auftretenden Umkristallisationen verfolgt werden. Mit diesem Verfahren ist der Forschung und der Werkstoffprüfung ein nützliches Hilfsmittel an die Hand gegeben.

Das Durchstrahlungsverfahren verwendet man häufig in einer besonderen Form, bei der das Objekt nur als Umrissbild ohne wesentliche innere Struktur erscheint. Beispielsweise zeigt Abb. 12 eine Baumwollfaser in sehr starker Vergrößerung¹¹⁾. Bilder mit ausgeprägter Struktur kann man von dünnen Gegenständen erzielen. Hierbei kommen zunächst Untersuchungen von Blattmetallen in Frage. Weiterhin sind auch bereits Durchstrahlungsbilder organischer Objekte gelungen. Durch Tränkung mit Osmiumsalzen konnten Zellgewebe bei 1000facher Vergrößerung untersucht werden¹²⁾. Aber auch unbehandelte biologische Objekte sind der Untersuchung zugänglich. Abb. 13 gibt einen Teil der Chitinhaut eines Fliegenflügels (musca dome-

⁸⁾ Eine ausführliche Übersicht bringt das auch bezüglich der Grundlagen sehr vollständige Buch von E. Brüche u. O. Scherzer, Geometrische Elektronenoptik, Berlin 1934. Hier ist das Schrifttum für das ganze Gebiet zusammengestellt.

⁹⁾ H. Knoblauch, Über eine Hochspannungsröhre hoher Leistung. Diss. T. H. Berlin 1931.

¹⁰⁾ E. Brüche u. W. Knecht, Z. techn. Physik Bd. 15 (1934) S. 461.

¹¹⁾ E. Ruska, Z. Physik Bd. 87 (1934) S. 580.

¹²⁾ L. Marton, Nature, Lond. Bd. 133 (1934) S. 911.

stica) wieder¹³). Die beiderseits der Haut sitzenden Haare werden scharf abgebildet, woran man die große Tiefenschärfe der Abbildung erkennt.

Die Grenze der bisher überhaupt erreichten Vergrößerung¹³) zeigt Abb. 14. Die Aufnahme stellt in 25 000facher Vergrößerung einen Teil eines Fliegenbeins dar. Die rechte Hälfte des Bildes ist ein Haar an dem Bein. Dieses Haar würde in Abb. 14 rd. 5 cm dick sein. Außerdem zeigen sich sehr feine Gebilde, die man ebenfalls als Härchen bezeichnen muß. Deren Stärke beträgt nach der Aufnahme $0,04 \mu = 4 \cdot 10^{-5} \text{ mm}$ (d. i. ungefähr ein Achtel der Wellenlänge des blauen Lichtes).

Möglichkeiten der Weiterentwicklung

Auflösungsvermögen

Das Auflösungsvermögen eines Mikroskops ist durch die Wellenlänge der verwendeten Strahlung gegeben: zwei Punkte, deren Abstand wesentlich diese Wellenlänge unterschreitet, werden infolge der Beugungerscheinungen nicht mehr getrennt dargestellt. Infolgedessen ist der „förderlichen“ Vergrößerung beim Lichtmikroskop mit 4000 : 1 eine grundsätzliche Grenze gesetzt.

Die Wellenlänge, die den Elektronen nach *de Broglie* zukommt, ist bei den verwendeten Elektronengeschwindigkeiten etwa $1/10^4$ bis $1/10^5$ der des sichtbaren Lichts. Deswegen liegt das theoretisch mögliche Auflösungsvermögen des Elektronenmikroskops bei einer förderlichen Vergrößerung von etwa 40 Millionen : 1, also noch weit über dem bis jetzt erreichten. Um in der Vergrößerung weiterzukommen, müssen einerseits die magnetischen Objektive verbessert werden, und andererseits sind mehrstufige (zunächst dreifache) Vergrößerungen bezüglich ihrer optischen Güte und Handlichkeit zu erproben. Hierzu muß man ferromagnetische Werkstoffe mit hoher Sättigung für die Spulenkapelung und insbesondere für die Ringpolschuhe des magnetischen Objektivs anwenden. Damit wird man den förderlichen Polschuh-Kleinstdurchmesser und außerdem das Verhältnis von Kleinstbrennweite zu Polschuhdurchmesser verkleinern können; die erzielbare Brennweite wird daher aus beiden Gründen kleiner, und damit steigt die je Stufe erreichbare Vergrößerung; die förderliche Stufenzahl für eine bestimmte Vergrößerung muß durch Vergleich der Bildfehler bestimmt werden.

Bildfehler, Bildhelligkeit und Belichtung

Um im Objektiv ein optisch möglichst fehlerfrei abbildendes Magnetfeld zu erzielen, muß man einerseits die günstigste Form der Polschuhe aufsuchen, andererseits kann man das Feld dadurch beeinflussen, daß man die Polschuhe aus Stoffen verschiedener Permeabilität in geeigneter Weise aufbaut. Mit beiden Maßnahmen wird man die erzielbare Kleinstbrennweite und die Ausblendung des abbildenden Strahlenbündels im Objektiv verkleinern und damit die Apertur (Sinus des Öffnungswinkels) des mikroskopischen Systems vergrößern können; dies ist im Hinblick auf die anzustrebende Bildhelligkeit bei möglichst geringer Objektbelastung eine dringliche Notwendigkeit. Bei Innenaufnahme (im Innern des Oszillographen) und 60 kV Strahlspannung ist im endgültigen Bild zur photographischen Aufnahme (Schwärzung = 0,1)¹⁴) eine Ladungsdichte von ungefähr 10^{-12} C/cm^2 , bei 1 s Belichtungszeit also eine Stromdichte von 10^{-12} A/cm^2 erforderlich. Würden alle vom Objekt ausgehenden Strahlen in das Objektiv gelangen, so würde die im Objekt notwendige Stromdichte quadratisch mit der Vergrößerung höher sein. Tatsächlich kann man heute erst mit Aperturen der magnetischen Objekte von 1 : 10 arbeiten, so daß das Verhältnis entsprechend ungünstiger ist.

Eine zu hohe Belastung muß bei allen Objekten wegen ihrer Erwärmung vermieden werden. Die Objekt-

kühlung ist wegen der Feinheit der Gegenstände schwierig, u. U. kann sie aber so wichtig werden, daß man zur flüssigen Luft greifen müssen. Insbesondere gilt das für biologische Objekte. Wenn die Beobachtung von außerhalb des Vakuums liegenden Gegenständen und damit vielleicht auch von Lebendobjekten gelingt (s. unter „Untersuchung biologischer Objekte“), so ist die anzuwendende Bestrahlung außerdem dadurch begrenzt, daß Lebewesen unter dem Einfluß von Elektronen Schaden leiden und schließlich eingehen. Der Belastung ist in vielen Fällen nicht durch die Intensität (W/cm^2), sondern durch die Dosis (Ws/cm^2) eine Grenze gesetzt¹⁵).

Beliebig kurze Belichtungszeiten kann man leicht dadurch erreichen, daß man den Elektronenstrahl im Kondensorraum magnetisch oder elektrisch ablenkt, also eine Strahlsperrung anbringt, wie sie beim Kathodenstrahloszillographen üblich ist. Der Strahl wird dann nur während der Belichtung über das Objekt geleitet. Vereinigt man diese Absperrung mit einer Ablenkeinrichtung, an die eine elektrische Schwingung gelegt wird, so kann man den Elektronenstrahl während der Belichtungszeit mehrfach über das Objekt laufen lassen. Durch Änderung der Schwingungsweite kann man dann sehr bequem die Bestrahlungsintensität im Mittel ändern, ohne daß sich gleichzeitig die Kondensorapertur ändert.

Blindaufnahmen

Durch die Dauerbelastung, die ein Objekt ohne Schaden erträgt, ist bei geforderter Vergrößerung und gegebener Apertur die Bildhelligkeit festgelegt. Reicht sie zur visuellen Beobachtung nicht mehr aus, so kann sie doch bei hinreichender Belichtungszeit noch zur Schwärzung der Platte genügen. Man muß dann aber blind aufnehmen, kann also nicht mehr im endgültigen Bild scharf einstellen, sondern muß nach der Scharfeinstellung des Zwischenbildes eine Reihe von Aufnahmen bei wenig veränderter Projektionsoptik machen. Ähnliche Reihenaufnahmen sind aus der Ultraviolett-mikroskopie als Blindaufnahmen bekannt.

Vertikalilluminator

Bei der praktischen Anwendung des Rückstrahlungs- und des Selbststrahlungsverfahrens bei Auslösung der Elektronen durch Wellenstrahlung (Photoelektronen) ist es schwierig, einerseits das Objektiv der Vorderfläche des Objekts weitgehend zu nähern, wie es zur Erzeugung hoher Vergrößerungen notwendig wird, andererseits das Objekt mit Elektronen- oder Wellenstrahlung stark anzu-leuchten. Man wird sich hier entweder auf streifenden Einfall beschränken müssen oder das dem Vertikalilluminator des Lichtmikroskops entsprechende Verfahren der Bestrahlung durch das Objektiv zur Anwendung bringen. Hierzu muß der bestrahlende und der abbildende Strahlengang getrennt werden¹⁶). Dabei bietet sich die Möglichkeit, das abbildende Elektronenbündel durch elektrische oder magnetische Querfelder aus der geometrischen Achse des Objektivs ohne Störung seiner optischen Struktur abzulenken, während das Lichtbündel das Feld unbeeinflusst durchfällt, Abb. 15. Will man zur Bestrahlung ebenfalls Elektronen verwenden, so ist ein magnetisches Querfeld erforderlich. Durch dieses wird das bestrahlende Bündel in die Achse des Objektivs gelenkt, während das abbildende Bündel infolge der nun umgekehrten Richtung des Elektronenstroms nach der anderen Seite aus der Achse herausgelenkt wird, Abb. 16. Wenn man die Kondensorlinse im bestrahlenden Strahlengang an die entsprechende Stelle bringt, an der sich im abbildenden Strahlengang das Bild oder das erste Zwischenbild befindet, so bildet das Objektiv, weil es für beide Strahlengänge infolge der praktisch gleich großen Elektronen-

¹³) M. Knorr u. H. Ruf, Arch. f. Hygiene u. Bakteriologie Bd. 113 (1934) S. 92.

¹⁴) Beim Lichtmikroskop das bestrahlende vom abbildenden Lichtbündel entweder durch einen halbdurchsichtigen Spiegel im Tubus oder dadurch, daß man durch eine Hälfte des Objektivs beleuchtet, durch die andere abbildet.

¹³) E. Driest u. H. Müller, Z. wiss. Mikroskopie Bd. 52 (1935) Nr. 11 (Juniheft).

¹⁴) Schwärzung = $\log \frac{\text{einfallendes Licht}}{\text{durchfallendes Licht}}$

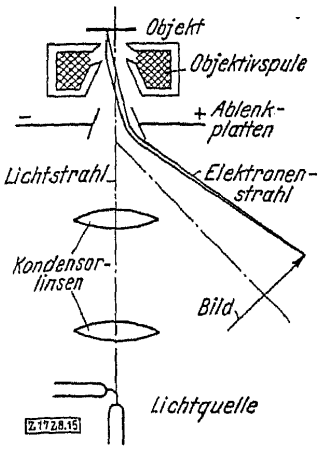


Abb. 15. (links). Für Bestrahlung mit Wellenstrahlung und photoelektrischer Auslösung der Elektronen; elektrische Ablenkung des abbildenden Elektronenbündels.

Abb. 15 und 16 Schema eines Vertikalilluminators.

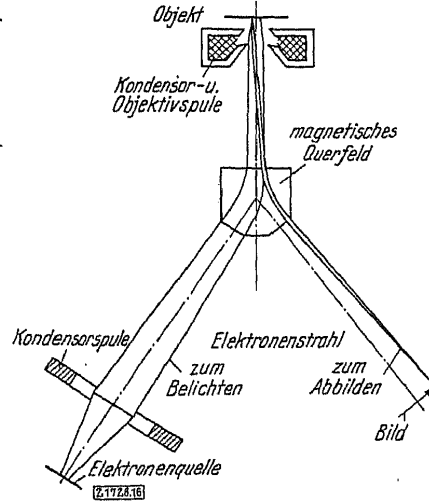


Abb. 16. Für das Rückstrahlungsverfahren mit magnetischer Ablenkung beider Bündel.

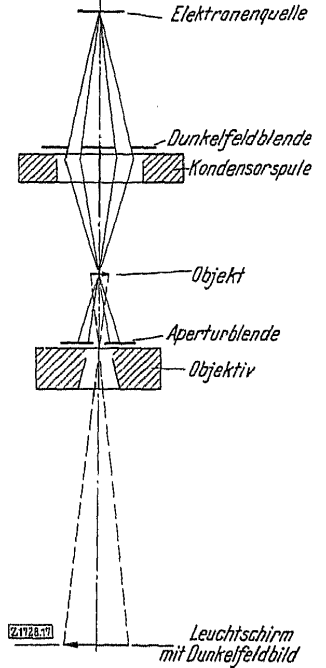


Abb. 17. Schema der Dunkelfeldbeleuchtung am Elektronenmikroskop.

geschwindigkeit die gleiche Brennweite hat, den in der Kondensorlinse vorhandenen Strahlquerschnitt auf ein sehr kleines Gebiet des Objekts ab, so daß hier die erwünschte sehr hohe Strahlungsintensität entsteht.

Wie weit die Vergrößerung beim Rückstrahlungsverfahren wegen der Verbreiterung des Geschwindigkeitsspektrums im abbildenden Bündel getrieben werden kann, wie weit es also gelingt, achromatische Objektive und achromatische Ablenkanordnungen zu verwirklichen, müssen erst eingehende Forschungsarbeiten zeigen.

Dunkelfeldbeleuchtung

Aus der Lichtmikroskopie kann noch ein weiteres Beleuchtungsverfahren übernommen werden: die Abbildung im Dunkelfeld bei Durchstrahlung des Objekts. Hierbei wird das Objekt nur mit solchen Strahlen beleuchtet, die größere Winkel gegen die Achse haben als die Objektivapertur. Dabei können keine ungebrochenen Strahlen durch das Objektiv und damit ins Bild kommen, sondern das Bild wird nur durch die vom Objekt in das Objektiv abgelenkten Strahlen abgebildet. Beim Elektronenmikroskop wird man die Anordnung nach Abb. 17 verwenden. Der der Objektivapertur entsprechende Winkel des Bestrahlungsbündels wird durch eine Mittelpunktsblende in der Kondensorlinse ausgeblendet.

Einschleusen von Gegenständen

In einem sehr wesentlichen Punkt bringt das Elektronenmikroskop gegenüber dem Lichtmikroskop eine Erschwerung in der Handhabung und in der Wahl der Objekte: Der zu untersuchende Gegenstand muß ins Vakuum gebracht werden, und zwar bei laufenden Untersuchungen ohne Störung des Vakuums im Gerät. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit einer Objektschleuse. Bei der Kleinheit der einzuschleusenden Gegenstände kann man die Querbohrung eines Hahnkükens verwenden; beim Durchstrahlungsverfahren durchsetzt dann der Elektronenstrahl diese Bohrung, Abb. 18. Das eigentliche Objekt lagert man in einer zylindrischen Patrone, die man bei quergestelltem Hahn von der Seite einführt. Die Anordnung läßt sich leicht so ausbilden, daß man das Objekt innerhalb einer Längsbohrung des Hahnes in beiden zur Strahlachse senkrechten Richtungen bewegen kann (Kreuztisch).

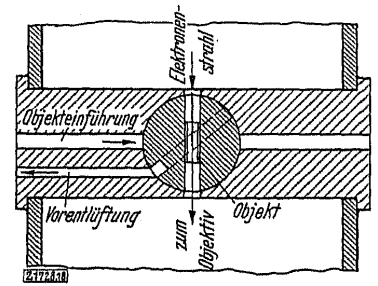
Will man vom Objekt stereoskopische Aufnahmen erhalten, so muß man von diesem nacheinander zwei Bilder unter voneinander etwas verschiedenen Winkeln aufnehmen. Solche Aufnahmen können mit der Anordnung, Abb. 18, leicht gemacht werden, wenn der Gegenstand sich genau in der Achse des Hahnkükens befindet. Durch geringe Drehung des Schliffs wird dann nur die Winkel-lage des Objekts geändert, ohne daß es dabei seitlich verschoben wird.

Untersuchung biologischer Objekte

Die biologischen Objekte fallen bislang für das Elektronenmikroskop fast ganz aus, weil sie in natürlichem Zustand nicht vakuumbeständig sind. Jedoch konnte

Abb. 18 (rechts). Objektschleuse.

Bei waagerechter Lage der Bohrung im Hahnkükens wird das Objekt eingeführt. Durch Drehen des Hahnes nach links wird die Bohrung an die Luftpumpe angeschlossen und vorentlüftet, so daß beim Drehen in die senkrechte Stellung zur Aufnahme (wie gezeichnet) das Vakuum im Gerät nicht gestört wird.



Marton mit seinem Skelettierungsverfahren mit Osmiumsalzen bereits elektronenoptische Abbildungen von Zellgeweben gewinnen¹²⁾. Es ist zu hoffen, daß man durch Übernehmen und Abwandeln der biologischen und medizinischen Präpariertechnik noch Erfolge erzielen wird.

Es kann aber auch gelingen, Objekte zu untersuchen, die in freier Luft liegen, wenn man sie vom Objektiv durch ein Lenard-Fenster¹⁷⁾ abschließt und durch ein zweites Lenard-Fenster bestrahlt¹⁸⁾. Bei diesem Mikroskop wird elektronenoptisch jeder Punkt des Objekts im Bild nicht als ein einzelner Punkt, sondern als sein Beugungsbild infolge der zwischengeschalteten Metallschichten erscheinen.

Wenn es nun gelingt, das Objektivfenster sehr dünn zu halten (etwa $0,01 \mu$), so ist der zentrale Höchstwert der Intensität groß gegenüber den Beugungsringen höherer Ordnungszahl; bildet man das Fenster selbst als Objektivträger (z. B. bei Bakterienuntersuchungen) aus, so nähern sich die höheren Ringe dem zentralen Höchstwert. Beide Maßnahmen wirken bildverbessernd, so daß eine deutliche Abbildung immerhin erhofft werden kann.

Untersuchung von Metallen

Auch für die Metallkunde lassen sich durch das hohe Auflösungsvermögen des Elektronenmikroskops Fortschritte erhoffen. Hier kommt noch ein anderer Vorteil des Geräts zur Geltung: Gegenstände hoher Temperatur, bei denen man im Lichtmikroskop wegen ihres Leuchtens keine Einzelheiten mehr sieht, lassen sich nach dem Selbst- und nach dem Fremdstrahlungsverfahren beobachten. Es dürften die Oberflächen flüssiger Schmelzen

¹⁷⁾ Ein Lenard-Fenster ist eine dünne elektronendurchlässige gasdichte Metallhaut.

¹⁸⁾ Österr. Pat. 137 611 (R. Rüdberg).

der Untersuchung zugänglich werden, wobei zu hoffen ist, daß auf diese Weise das Wachsen der Kristalle und die kritischen Punkte von Metalllegierungen sichtbar werden. Mit durchfallender Strahlung könnte man versuchen, die wichtigen Fragen der Duralumin-Ausscheidungs Vorgänge anzugreifen. Mit dem Rückstrahlungsverfahren kann man vielleicht die wichtige Frage anschnitten, wie eben die Oberfläche eines Schliffes, die im Lichtmikroskop auch bei stärkster Vergrößerung noch gleichmäßig erscheint, wirklich ist.

Weitere Anwendungsgebiete ergeben sich in der Technik der Steine und Erden und der Keramik, gegebenenfalls auch der Staube¹⁰⁾, sowie in der Faserstofftechnik, wenn es gilt, feine Strukturen zu untersuchen. Das Sichtbarmachen von Kolloidteilchen ist zu erhoffen.

Diese Beispiele sollen nur zeigen, in welcher Richtung Forschungsarbeiten unseres Erachtens mit Aussicht auf Erfolg gelenkt werden können.

¹⁰⁾ Vgl. hierzu *E. Stach*, Z. VDI Bd. 79 (1935) Nr. 17 S. 513 (dieses Heft).

Zusammenfassung

Das Auflösungsvermögen des Lichtmikroskops ist nach weit über hundertjähriger Entwicklungsarbeit an die theoretische Grenze gekommen. Durch Einführung des kurzwelligen ultravioletten Lichts ist die Grenze noch einmal auf das Doppelte hinausgeschoben worden. Mit diesem großen Aufwand aber sind die Möglichkeiten erschöpft. Mit Hilfe der Wellenstrahlung noch weiter vorzudringen würde nur gelingen, wenn man mit Röntgenstrahlen arbeiten könnte; das scheidert aber daran, daß eine optische oder quasisoptische Beeinflussbarkeit der Röntgenstrahlung nicht bekannt und nach dem heutigen Stand der Erkenntnis auch nicht zu erwarten ist. Das Elektronenmikroskop hat nach nur dreijähriger Entwicklungszeit schon das Auflösungsvermögen des Lichtmikroskops übertroffen, ist aber noch sehr weit von seiner theoretischen Grenze entfernt. Es wird auch hier erheblicher Arbeit bedürfen, um Schritt für Schritt dieser Grenze näherzukommen.

B 1728

Aus der Ingenieurarbeit

Elektrische Fernmessung mit rückwirkungsfreien Wechselstrom-Ferngebern

Bei den Fernmeßeinrichtungen, bei denen ein induktiver Wechselstrom-Ferngeber benutzt wird, tritt eine elektrodynamische Rückwirkung auf das Geberinstrument auf, die die Messung störend beeinflusst, sobald in der Drehspule dieses Ferngebers ein Induktionsstrom fließt. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn der Drehspule eine verhältnismäßig große Energie (etwa 0,1 bis 0,2 W) entnommen werden muß, z. B. für einen Tintenschreiber. Aber auch bei sehr geringer Energieentnahme können unangenehme Rückwirkungserscheinungen auftreten, wenn das Drehmoment des die Drehspule steuernden Gebergerätes klein ist und beispielsweise nur etwa 0,1 bis 0,5 gem beträgt.

Nach einem Vorschlag von *W. Geyger* kann man diese Rückwirkung grundsätzlich dadurch beseitigen, daß man einen Kondensator in den Meßstromkreis einfügt¹⁾.

Schaltungsaufbau

Mit solchen „rückwirkungsfreien“ Wechselstrom-Ferngebern kann man besonders einfache Fernmeßeinrichtungen schaffen, die fortlaufend (d. h. ohne Fallbügel oder dergl.) arbeiten und in Verbindung mit Gebergeräten aller Art verwendbar sind, insbesondere auch zur Fernübertragung von

¹⁾ *W. Geyger*, Arch. Elektrotechn. Bd. 28 (1934) S. 689.

Starkstrom-Meßwerten in Einfach- und Summenschaltungen. Der grundsätzliche Aufbau dieser Einrichtungen sei an Hand eines der Praxis entnommenen Beispiels erläutert.

Bei der in Abb. 1 schematisch dargestellten Fernmeßeinrichtung, Bauart Siemens & Halske, handelt es sich um die Aufgabe, die Zeigerstellung eines als Geber wirkenden elektrischen oder wärmetechnischen Meßgerätes *a* (z. B. Wechselstrom-Leistungsmesser oder Manometer) über zwei gleichstromdurchflossene Fernleitungen *f* auf Drehspulengeräte (z. B. auf einen Tintenschreiber *i*) und auf ein Anzeigergerät *h* zu übertragen. Das bewegliche Glied des Gebergerätes *a* ist mit der Drehspule *c* des als Induktionsdynamometer ausgebildeten Wechselstrom-Ferngebers *b* mechanisch gekuppelt; die feststehende Erregerwicklung *e* ist über einen Spannungsgleichhalter *k* — Schaltung nach *G. Keinath*²⁾ — mit der Netzspannung *U* verbunden; die induzierte Spannung U_D ist dem Ablenkungswinkel α proportional ($\alpha = \pm 45^\circ$) und unabhängig von den Spannungsschwankungen des Netzes.

Um den gesamten, 90° betragenden Ausschlag β der Drehspule voll ausnutzen zu können, ist mit der Drehspulenspannung U_D (deren Vorzeichen entsprechend dem Vorzeichen von *a* wechselt) die mit U_D phasengleiche Ausgleichspannung U_K in Reihe geschaltet, die gleichbleibt und in der Wicklung *d* induziert wird. Die Spannungen U_K und U_D werden so bemessen, daß sich der Vorgang nach Abb. 2 ergibt: Die Gesamtspannung ($U_K + U_D$) und somit auch der im Meßstromkreis fließende Induktionsstrom *I* haben ihre Kleinstwerte („min“), wenn $\alpha = +45^\circ$ ist (Zeigerausschlag von $\alpha 0^\circ$), und haben andererseits ihre Höchstwerte („max“), wenn $\alpha = -45^\circ$ ist (Zeigerausschlag von $\alpha 90^\circ$).

Durch die Ausgleichsspannung U_K wird erreicht, daß Zeigerausschlag des Gebergerätes und Gleichstrom I_G stets eindeutig voneinander abhängen; ohne die Spannung U_K hätte der Gleichstrom I_G sowohl bei $\alpha = +45^\circ$ als auch bei $\alpha = -45^\circ$

²⁾ *G. Keinath*, Die Technik elektrischer Meßgeräte, 3. Aufl. München und Berlin 1928, Bd. 2 S. 137.

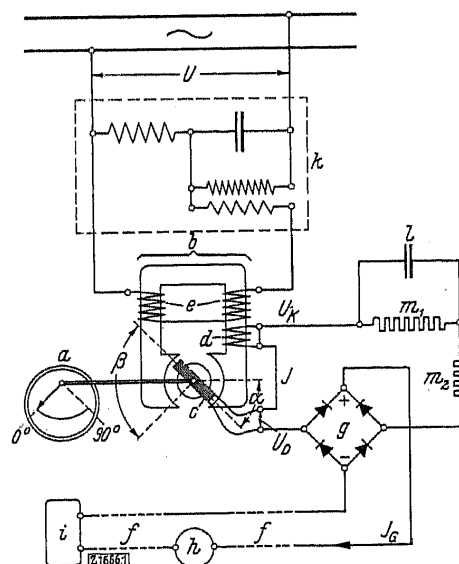


Abb. 1. Aufbauschema.

- a Meßgerät
- b Wechselstrom-Ferngeber
- c Drehspule
- d Ausgleichspule
- e Erregerwicklung
- f Fernleitung
- g Gleichrichter
- h Anzeigergerät
- i Tintenschreiber
- k Spannungsgleichhalter nach Keinath
- l Kondensator
- m₁, m₂ Widerstände

Abb. 1 und 2. Fernmeßeinrichtung mit rückwirkungsfreiem Wechselstrom-Ferngeber.

- U Netzspannung
- U_D Drehspulenspannung
- U_K Ausgleichsspannung
- I Induktionsstrom
- I_G Gleichstrom

Abb. 2 Spannungsverlauf des Gerätes, Abb. 1, in Abhängigkeit vom Ausschlag des Gebergeräts.

