

[Aus dem Hochspannungsinstitut Neubabelsberg
der Technischen Hochschule Berlin¹⁾.]

Die Abbildung durchstrahlter Folien im Elektronenmikroskop.

Von Bodo v. Borries und Ernst Ruska in Berlin.

Mit 5 Abbildungen. (Eingegangen am 7. April 1933.)

Die experimentellen Voraussetzungen scharfer Elektronenbilder werden zusammengestellt. Bei der Abbildung von Folien treten hiervon unvermeidliche Abweichungen auf, deren Folgen diskutiert werden. Zuletzt werden an Hand von Leuchtschirmaufnahmen die augenfälligsten Erscheinungen bei solchen Abbildungen beschrieben.

Das Elektronenmikroskop liefert sehr saubere Abbildungen, wenn man drei verschiedene experimentelle Bedingungen einhält:

1. Die zur Abbildung verwandten magnetischen oder elektrischen Elektronenlinsen müssen weitgehend frei von Öffnungsfehlern sein, oder es dürfen nur sehr geringe Linsenöffnungen zur Verwendung gelangen (zonen-scharfe Abbildung).

2. Die Abbildung soll nur durch Strahlen geringer Achsenneigung erfolgen. Damit trotzdem die Lichtstärke groß bleibt, muß die Strahlenquelle ein möglichst starker „Richtstrahler“ sein, d. h. sie soll ihre ganze Energie in einen möglichst kleinen Raumwinkel strahlen (tiefenscharfe Abbildung).

3. Die abbildenden Elektronenstrahlen müssen möglichst „einfarbig“ sein, d. h. die Erzeugungsspannung der Elektronen darf weder zeitlich schwanken, noch dürfen die Elektronen auf ihrer weiteren Bahn verschieden große Geschwindigkeitsverluste erleiden (monochromatische Abbildung).

Hinsichtlich der beiden ersten Bedingungen weist das magnetische Elektronenmikroskop mit kalter Kathode²⁾ grundsätzliche Vorzüge auf, was durch die große Schärfe der auf diese Art erhaltenen Aufnahmen durchstrahlter Netze³⁾ belegt sei.

Die unter 3. geforderte Einfarbigkeit des durchfallenden Elektronenlichtes muß und kann, soweit es sich um die Konstanz der Erzeugungs-

¹⁾ Vorstand: Prof. A. Matthias.

²⁾ M. Knoll u. E. Ruska, ZS. f. Phys. 78, 318, 1932.

³⁾ Vgl. hierzu Anm. 2 a. a. O. S. 333, Fig. Sa u. b sowie die linken Hälften der Fig. 3 und 5 dieser Mitteilung.

spannung handelt, also vor dem Durchgang durch das Mikroskop, durch genügend große Beruhigungskondensatoren in der Gleichrichteranlage und durch Wahl ruhig brennender Entladungsröhren gewährleistet werden.

Ungleich große Geschwindigkeitsverluste der Elektronen lassen sich außerhalb des Objektes durch hinreichend hohes Vakuum stets vermeiden. Auch innerhalb des Objektes treten bei der Untersuchung dickerer durchbrochener Gegenstände, wie sie z. B. in Form feiner Drahtnetze als „Testobjekte“ zur Kontrolle der optischen Qualität von Elektronenlinsen (Freiheit von „Feldgeometrie-Fehlern“, d. h. Öffnungs-, Asymmetrie- und Verzerrungsfehler) dienen, verschieden starke Energieverluste nicht auf. Die Elektronen werden entweder völlig absorbiert oder sie erleiden keinerlei Beeinflussung durch das Objekt.

Schwierigkeiten bei der Erzeugung guter Elektronenbilder im Elektronenmikroskop sind daher erst zu erwarten, wenn man in völliger Analogie zu den Dünnschnittobjekten des gewöhnlichen Mikroskops undurchbrochene dünne Objekte bei durchfallender Strahlung abbilden will. Als solche sind wegen ihrer relativ hohen Wärmebeständigkeit zunächst Metallfolien bequem. Sie lassen infolge ihrer kleinen Dichte- und Dickenunterschiede (verschieden starke Absorption) eine „Struktur“ erkennen.

Solche Untersuchungen können Aufschlüsse geben über Absorption, Geschwindigkeitsverluste und Diffusion der Elektronen, sowie über die orientierenden Schichtdicken und Grenzdicken des Foliennmaterials¹⁾ und die örtliche Struktur der Folien. Sie haben daher, vom wissenschaftlichen Interesse abgesehen, eine gewisse Bedeutung bei technischen Untersuchungen von Lenardfolien für die Fenster von Kathodenstrahloszillographen und Coolidge-Röhren. Auch die Untersuchung von Wollastondrähten und Messerschneiden gehört hierher. Sehr schön lassen sich ferner Schmelzerscheinungen an solchen Objekten verfolgen. Bei Beugungsaufnahmen kann die verwendete Folie laufend auf Lochfreiheit geprüft werden.

Die ungleichmäßigen Geschwindigkeitsverluste im Objekt verändert die einfarbige auftreffende Strahlung in der Art, daß ein nach längeren Elektronenwellen hin verbreiteter Spektralbereich von Strahlen die eigentliche Abbildung vermittelt. Es ändert sich aber die Elektronenstrahlung beim Durchgang durch ein solches Objekt noch in anderer Weise. Die Elektronen, die das Objekt praktisch senkrecht (kleine, entfernte Strahlenquelle) und damit achsenparallel treffen, verlassen die Folie je

¹⁾ Vgl. zu diesen Begriffen die Definitionen bei P. Lenard, Quantitatives über Kathodenstrahlen aller Geschwindigkeiten. Heidelberg 1925.

nach deren Dicke verschieden stark diffus, d. h. unter allen möglichen, auch sehr großen Winkeln. Es ist daher die *Apertur* der die Folie verlassenden Strahlung immer mehr oder weniger vergrößert gegenüber der geringen Apertur der einfallenden Strahlung.

Meist will man einen möglichst großen Bruchteil des vom Objekt kommenden Energiestromes für die Abbildung ausnutzen und macht deshalb die freie Linsenöffnung wesentlich größer als sie zur Erfassung aller, den Gegenstand mit der geringen natürlichen (d. h. nicht durch eine Ausblendung bestimmten) Apertur des zur Durchleuchtung verwandten Richtstrahlers verlassenden Strahlen notwendig wäre. Dann machen sich erstens die Öffnungsfehler der Abbildungssysteme im Bild stärker bemerkbar und zweitens werden die Bilder wesentlich weniger tiefscharf¹⁾.

Fig. 1 zeigt einen schematischen Schnitt durch die Versuchsanordnung. Die — dauernd an der Pumpe liegende — Metallapparatur wurde schon früher beschrieben²⁾. Die Bilder wurden durch eine magnetische Spule mit verbesserter Eisenkapselung³⁾ und entsprechend sehr kleiner minimaler Brennweite in einstufiger Vergrößerung auf einem Calciumwolframat-Leuchtschirm bzw. einem versilberten Glasleuchtschirm entworfen, der von außen photographiert wurde. Abgebildet wurden Aluminiumfolien verschiedener Dicke (unterhalb 7μ) auf Molybdändrahtnetz (Maschenweite 142μ , Drahtdurchmesser 30μ) bei Strahlspannungen von 20 bis 80 kV. In diesen Gebieten weisen die Kathodenstrahlen bekanntlich trotz erheblicher Absorption (sie beträgt

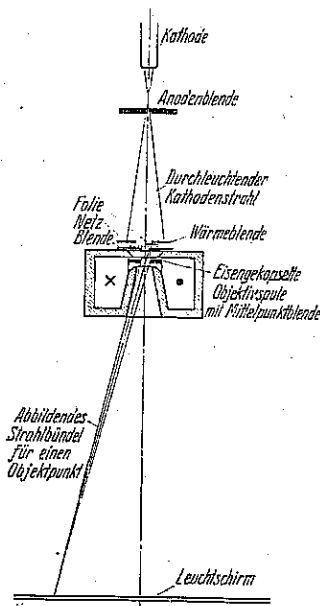


Fig. 1. Schematischer Schnitt durch die Versuchsanordnung.

¹⁾ Bei experimentellen Untersuchungen von Elektronenlinsen kann man diese Erscheinung dazu benutzen, um sehr genaue Bildweiteneinstellungen vorzunehmen.

²⁾ Vgl. Anm. 2 a. a. O. S. 329ff.

³⁾ Vgl. zu der von dem einen von uns angegebenen Eisenkapselung E. Ruska u. M. Knoll, ZS. f. techn. Phys. 12, 448, 1931, sowie Anm. 2 a. a. O. S. 331; ferner Anm. d. Phys. 12, 447, 1932.

bei 60 kV für die 6 μ -Folie etwa 50%, für die 1 μ -Folie etwa 10%) der auftreffenden Stromdichte¹⁾ und Diffusion noch kaum einen merklichen Geschwindigkeitsverlust auf.

Man beobachtet nun bei solchen Abbildungen tatsächlich folgende Erscheinungen²⁾:

a) bei *ausgeschaltetem Spulenstrom*: Der Leuchtschirm ist entweder vollkommen gleichmäßig beleuchtet (rein diffuse Strahl Ausbreitung hinter der Folie) oder es zeigen sich (Fig. 2) mehr oder weniger scharf die bekannten

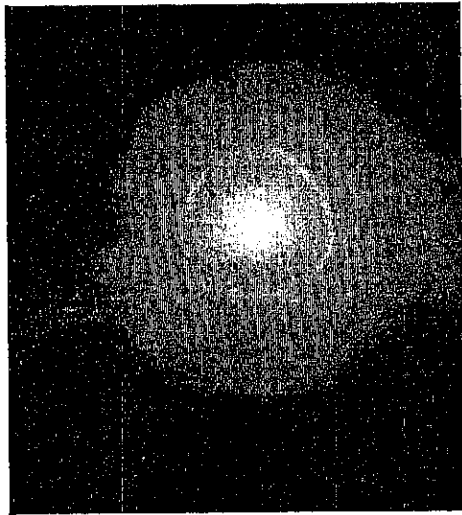


Fig. 2. Beugungsbild einer 1 μ -Al-Folie (Calciumwolframat, Strahlspannung 60 kV; das magnetische Objektiv war ausgeschaltet).

Beugungsbilder mit ihren verschiedenen Ringen, auf denen sich wieder regelmäßige Intensitätsmaxima finden (Richtungsabhängigkeit der Intensität beim Austritt aus der Folie). Die Beugungsbilder waren nicht sehr kontrastreich bei ausgeschaltetem Spulenstrom. Sie wurden kontrastreicher mit wachsendem Strom, aber nur so lange, bis die Spule die Strahlenquelle (kalte Aluminiumkathode) auf dem Schirm abbildete. Eine solche Abbildung erfolgte trotz der Zwischenschaltung der zerstreuen Folie scharf, und zwar durch die Strahlen des ersten (zentralen) Beugungsmaximums.

¹⁾ Vgl. die Tabellen und Kurven von P. Lenard, a. a. O. Tafel III.

²⁾ Leider sind bei der Reproduktion der Leuchtschirmaufnahmen relativ viele Einzelheiten verlorengegangen.

b) bei eingeschaltetem und entsprechend der kleinen Abbildungsbrennweite eingestellten Spulenstrom:

1. Ein Drahtnetz unter der Folie bildet sich durch diese hindurch deutlich ab (Fig. 3). Infolge der großen Unterschiede der durchstrahlten Strecken wird das Netz sichtbar.

2. Die Folienquerschnitte selbst bilden sich ebenfalls ab (Fig. 4). Man sieht auf der Aufnahme kleine Löcher sowie dickere und dünnere Stellen und eine Falte.

Eine geometrisch-optische Abbildung von Folienquerschnitten konnte an sich nicht in Frage gestellt werden durch die Diffusions- und Beugungserscheinungen, da die Bild erzeugung von der Verteilung der von jedem Gegenstandspunkt ausgehenden Strahlungsintensität auf die verschiedenen (innerhalb der Linsenöffnung gelegenen) Richtungen unabhängig ist. Lediglich die

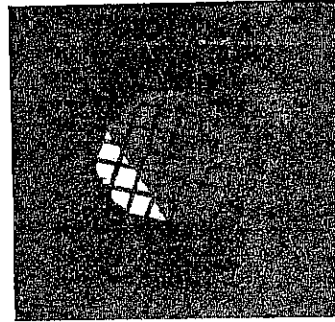


Fig. 3. Geometrisches Bild einer $1\ \mu$ -Al-Folie auf Mo-Drahtnetz (silberbestäubtes Glas, Strahlspannung 60 kV, Vergrößerung 20 fach).

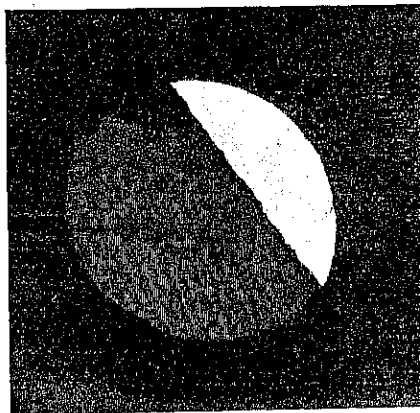


Fig. 4. Geometrisches Bild einer $1\ \mu$ -Al-Folie (silberbestäubtes Glas, Strahlspannung 70 kV, Vergrößerung 20 fach).

Abbildungsgüte kann unter Umständen durch die bei großen Strahlöffnungen stärker hervortretenden Öffnungsfehler der Linsen sehr mangelhaft sein.

3. Das Netzbild durch die Folie ist bei dickeren Folien merklich gegen das Bild der unbedeckten Netzhälfte gedreht¹⁾ und zeigt eine etwas stärkere Vergrößerung (Fig. 5), was am besten aus der Unstetigkeit an der Folienkante hervorgeht²⁾. Die Häufigkeitsverteilung der durchtretenden Elektronen über die Geschwindigkeit hat ja ihr Maximum bei einer etwas

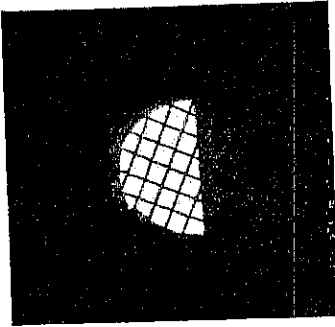


Fig. 5.
Geometrisches Bild einer 6 μ -Al-Folie auf Mo-Drabtnetz (Calciumwolframat, Strahlspannung 70 kV, Vergrößerung 20 fach).

kleineren Geschwindigkeit als der ursprünglichen. Ist der Spulenstrom auf diese kleinere Geschwindigkeit eingestellt, so wird das Bild am deutlichsten. Wegen der großen Strahlöffnungen nach dem Durchsetzen der Folien ist das Bild nur innerhalb eines kleinen Bereiches des Spulenstroms scharf sichtbar. Die Abbildung des unbedeckten Netzes erfolgt dagegen mit der sehr kleinen ursprünglichen Strahlöffnung. Sie bleibt daher scharf auch nach Einstellung des Spulenstromes auf die etwas geringere (häufigste) Geschwindigkeit hinter der Folie. Wegen der Dynamik der magnetischen Abbildung ist das Bild aber etwas gedreht gegen das Folienbild. Diese Erscheinungen stimmen überein mit der bisherigen Kenntnis.

4. Unter gewissen Umständen beobachtet man zwei verschiedene Netzbilder. Außer dem unter 3. beschriebenen Bild zeigt sich ein zweites Bild, das gegen die Abbildung des unbedeckten Netzes nicht verdreht ist und innerhalb des gleichen großen Bereiches des Spulenstromes (der Spulenbrennweite) scharf bleibt wie dieses. In diesen Fällen liegt offenbar ein zweites Häufigkeitsmaximum bei der ursprünglichen Strahlgeschwindigkeit, wobei außer dem Geschwindigkeitsverlust auch die Diffusion dieser Elektronen praktisch Null ist.

Die Erscheinung der Geschwindigkeitsinhomogenisierung beim Durchgang der Elektronenstrahlen durch Folien wirft das Problem der achro-

¹⁾ Im elektrischen Elektronenmikroskop fällt diese Erscheinung natürlich weg. Es dürfte aber überhaupt schwieriger sein, solche Untersuchungen mit dem elektrischen Mikroskop zu machen, wegen der Höhe der Linsenspannungen, die bei den großen zum Durchsetzen der Folien notwendigen Strahlgeschwindigkeiten erforderlich sind.

²⁾ In Fig. 3 ist diese Unstetigkeit wegen zu kleinen mittleren Geschwindigkeitsverlustes unmerklich.

matischen Elektronenlinse auf. Man müßte, um größte Schärfe bei derartigen Abbildungen zu erhalten, eine Linse benutzen, die für zwei nicht allzu verschiedene Elektronengeschwindigkeiten die gleiche Brennweite hat, so daß praktisch der ganze Bereich der die Folie verlassenden Elektronen durch solche Linse zu Bildpunkten fokussiert wird.

Zusammenfassung. Mit magnetischen Linsen geringer Feldgeometrie-Fehler können im Elektronenmikroskop durch Metallfolien hindurch genügend scharfe Bilder unmittelbar darüberliegender Netze und Struktur-bilder der Folien selbst entworfen werden. Bei Ausblendung der nicht genügend achsennahen Strahlen liefern auch „unkorrigierte“ Spulen gute Bilder. Die sich zeigenden Erscheinungen entsprechen den bekannten Vorstellungen über Absorption, Geschwindigkeitsverlust und Diffusion der Kathodenstrahlen beim Durchgang durch Materie.

Die Mittel zur Durchführung der Untersuchung wurden von der Gesellschaft der Freunde der Technischen Hochschule Berlin zur Verfügung gestellt, wofür ihr bestens gedankt sei. Herrn Prof. A. Matthias möchten wir für die Ermöglichung der Arbeit und ihre Förderung ebenfalls unseren besten Dank aussprechen.

Berlin, im März 1933.
