

Über den Bau und die Bemessung von Polschuhlinzen für hochauflösende Elektronenmikroskope¹⁾

Von

E. Ruska

(Eingegangen am 8. 5. 1944)

DK 537-533-335

Übersicht. Hochauflösende magnetische Elektronenmikroskope verlangen die Entwicklung von Polschuhlinzen hoher Brechkraft. Der Aufbau der magnetischen Linzen und Polschuhsysteme wird erläutert. Die Zusammenhänge zwischen den geometrischen Abmessungen der Polschuhsysteme und der Brechkraft in einem größeren Bereich der Elektronengeschwindigkeit und der Spulendurchflutung werden gemessen und in zusammenfassenden Schaubildern wiedergegeben. Dabei werden insbesondere die kleinsten erreichbaren Brennweiten der Objektive bzw. Vergrößerungsweiten der Projektive und ihre Abhängigkeit von der Elektronengeschwindigkeit behandelt. Die Ergebnisse werden mit früheren experimentellen und theoretischen Angaben verglichen.

- I. Einleitung.
- II. Eigenschaften und Bauweisen der Polschuhlinzen.
- III. Messung der Brennweiten von Objektiven und der Vergrößerungsweiten von Projektiven.
- IV. Messung des Feldverlaufs auf der Achse und der Sättigung von Polschuhsystemen.
- V. Bemessung der Polschuhsysteme.
- VI. Aufbau und Herstellung der Polschuhsysteme.
- VII. Vergleich mit früheren experimentellen und theoretischen Ergebnissen.
- VIII. Zusammenfassung.

I. Einleitung

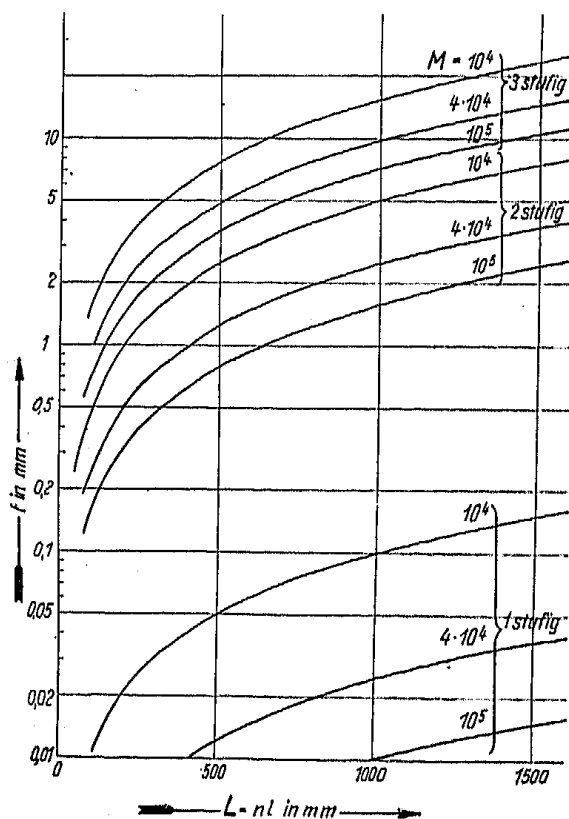


Bild 1. Brennweiten eines Mikroskops als Funktion der Abbildungslänge für verschiedene Abbildungsmaßstäbe und Abbildungsstufen.

Die Mikroskopie mit schnellen Elektronen [1] hat in den 10 Jahren, die seit den ersten Versuchen [2] verstrichen sind, zu einem Auflösungsvermögen der elektronenmikroskopischen Abbildung von fast 2μ geführt und damit die dem Lichtmikroskop gezogene Grenze um den Faktor 100 erweitert. Um Einzelheiten der mikroskopischen Objekte von dieser Größe bequem mit unbewaffnetem Auge erfassen zu können, müssen von den Objekten Vergrößerungen von etwa dem Maßstab 100000:1 hergestellt werden (förderlicher Abbildungsmaßstab M_p). Diese Werte liegen so hoch über den beim Lichtmikroskop gebräuchlichen, daß schon von Beginn des Baues von Übermikroskopen an beim Entwurf dieser Geräte Überlegungen angestellt wurden, wie sie mit erträglichem Aufwand verwirklicht werden können [3]. Man kann eine bestimmte Vergrößerung in einer reellen Abbildungsstufe oder auch zwei- oder mehrstufig erreichen. Zwischen der gesamten Abbildungslänge L , die man vom Objekt bis zum Endbild für die in n gleichen Stufen

¹⁾ Der Fakultät für allgemeine Wissenschaften der Technischen Hochschule Berlin als Habilitationsschrift eingereicht.

der Länge L/n vergrößerte Abbildung im Maßstab M aufwenden muß und der Brennweite f der für alle Abbildungsstufen gleichen Vergrößerungslinsen besteht die Beziehung

$$f = \frac{L}{n \sqrt[3]{M}}. \quad (1)$$

Die erforderlichen Brennweiten sind demnach einerseits der gesamten Abbildungslänge L proportional, sie sind andererseits am kleinsten bei einstufiger Abbildung und wachsen rasch mit der Stufenzahl der Abbildung. Die nach Gl. (1) erforderlichen Brennweiten sind in Bild 1 als Funktion der gesamten Abbildungslänge für drei Stufenzahlen und drei Abbildungsmaßstäbe angegeben. Mit Rücksicht auf einen einfachen Aufbau des Mikroskops und leichte Einstellung wird man mit möglichst wenig Abbildungsstufen auszukommen suchen und in Hinsicht auf ein bequemes Arbeiten wird man eine möglichst kurze Abbildungs- und Gerätelänge anstreben. Ein kurzes Gerät ist zudem weniger anfällig gegen mechanische Schwingungen und gegen magnetische Wechselfelder. Die kürzesten Elektronenmikroskope höchster Auflösung haben heute eine Abbildungslänge von etwa 600 mm, sämtliche Geräte bilden bisher in zwei Stufen ab, da Brennweiten von nur einigen Millimetern bei allen Elektronenlinsen erreichbar sind. Jede erreichte Verkürzung der Brennweiten erlaubt es, entweder die im Mikroskop erzielbare Vergrößerung zu steigern, oder das Mikroskop selbst kürzer zu bauen, oder auch unter Umständen auf die nächst niedrigere Stufenzahl überzugehen. Die kürzesten Brennweiten lassen sich mit magnetischen Linsen erzielen, so daß Mikroskope mit diesen Linsen bei gleicher Länge höher vergrößern oder bei gleicher Vergrößerung kürzer gebaut werden können als solche mit elektrischen Linsen.

Für die Objektive von Elektronenmikroskopen besteht noch ein zweiter Grund, warum eine kleine Brennweite vorteilhaft ist. Beim Lichtmikroskop kann man zur Erzielung höchster Bildauflösung δ das Objekt nach der für fehlerfreie Linsen gültigen, nur die Beugung berücksichtigenden Gleichung

$$\delta = \frac{\lambda}{n \sin \alpha} \quad (2)$$

mit einer Apertur α von annähernd 90° abbilden, weil die Objektive des Lichtmikroskops wie andere Glaslinsen weitgehend fehlerfrei gemacht werden können. Die starken Bildfehler der Elektronenlinsen verursachen jedoch, daß die zur Abbildung nutzbare Apertur einen um etwa 3 Größenordnungen kleineren Wert nicht überschreiten darf. Dieser für das Auflösungsvermögen optimale Aperturwert wird um so größer und damit die noch auflösbare Strecke um so kleiner, je geringer die Bildfehler der Objektivlinse sind. Ebenso wie bei Glaslinsen werden auch bei Elektronenlinsen [4], [5], [6] die Konstanten der geometrischen Abbildungsfehler (Öffnungsfehler, Astigmatismus, Koma, Bildwölbung, Verzeichnung) und des Farbfehlers und damit diese Fehler selbst mit wachsender Brechkraft der Linse kleiner. Bei magnetischen Linsen läßt sich die Brechkraft einerseits durch die Linsenform (Funktion des Feldverlaufs auf der Achse, Halbwertsbreite h der Feldfunktion) andererseits durch die Linsenstärke (Höhe der maximalen Feldstärke \mathfrak{H}_0 [Spulendurchflutung D] und der Elektronengeschwindigkeit [Strahlspannung U]) verändern. Bei elektrischen Linsen kann die Brechkraft ebenfalls einerseits durch die Linsenform (Funktion des Potentialverlaufs auf der Achse, Halbwertsbreite h der Potentialfunktion), andererseits durch die Linsenstärke (Bruchteil der Elektronenvoltgeschwindigkeit, bis zu dem die Elektronen beim Durchgang durch das Potentialminimum der Linse abgebremst werden) variiert werden. Durch Objektive höherer Brechkraft und damit kleinerer Brennweite werden daher noch Elektronenstrahlbündel größerer Apertur genügend fehlerfrei verarbeitet und damit bessere Auflösungen erreicht.

Für eine gegebene Brechkraft sind die Abbildungsfehler für magnetische und elektrische Linsen der bisher in hochauflösenden Mikroskopen gebräuchlichen Feldtypen verschieden groß, und zwar sind sie bei magnetischen Linsen beträchtlich kleiner [6]. Sowohl diese verschiedenen großen Fehlerkonstanten bei gleicher Brechkraft als auch der Umstand, daß man mit magnetischen Linsen größere Brechkraften und damit kleinere Brennweiten zur mikroskopischen Abbildung verwenden kann, dürfte der Grund dafür sein, daß bisher mit magnetischen Linsen die besten Auflösungen erzielt und die kürzesten Geräte bei gleichzeitig höchster Vergrößerung gebaut wurden. Das mit magnetischen Linsen erzielbare Auflösungsvermögen ist daher für die Leistungsgrenze des elektronenmikroskopischen Verfahrens bisher kennzeichnend.

Für die Auflösung des übermikroskopischen Bildes wirkt in erster Linie der Farbfehler

$$\delta_F = C_F \alpha \frac{\Delta U}{U} = h \gamma_F \alpha \frac{\Delta U}{U} \quad (3a)$$

und von den geometrischen Linsenfehlern, da es sich um die Abbildung achsennaher Punkte handelt, der Öffnungsfehler

$$\delta_O = C_O \alpha^3 = h \cdot \gamma_O \cdot \alpha^3 \quad (3b)$$

des Elektronenobjektivs begrenzend (C_F bzw. C_O Farbfehlerkonstante bzw. Öffnungsfehlerkonstante, $\gamma_F = C_F/h$ bzw. $\gamma_O = C_O/h$ Farbfehlerzahl bzw. Öffnungsfehlerzahl). Für eine den praktischen Verhältnissen bei magnetischen Linsen sehr nahe kommende Feldfunktion, deren Linsenfehler sich ausrechnen lassen, ist z. B. die Farbfehlerkonstante C_F der Brennweite proportional, während die Öffnungsfehlerkonstante C_O stärker als proportional mit der Brennweite ansteigt. Bei Projektiven tritt eine Verzeichnung des Endbildes auf, die durch den Öffnungsfehler bedingt und zu C_O/l proportional ist. Diese Verzeichnung kann im allgemeinen nicht mit dem gewöhnlichen Verzeichnungsfehler einer Linse gleichgesetzt werden. Um bei gegebener Abbildungslänge der Projektivstufe noch größere Bildformate verzeichnungsfrei zu erhalten, muß man diesen Fehler klein halten. Wegen des bei magnetischen Linsen beschleunigten Anstiegs der Öffnungsfehlerkonstante mit der Brennweite muß man bei einem gegebenem magnetischen Projektiv mit möglichst hoher Brechkraft arbeiten.

Zur Leistungssteigerung hochauflösender Elektronenmikroskope sind daher von Anfang an bevorzugt magnetische Elektronenlinsen hoher Brechkraft entwickelt worden. Bis in die letzte Zeit konnten hierbei die Brechkraften gesteigert, die Brennweiten verkürzt und insbesondere das Auflösungsvermögen verbessert werden. Im folgenden wird zunächst ein Überblick über die bisher bekannt gewordenen verschiedenen Bauweisen der Polschuhlinzen gegeben. Es werden dann die bei den eigenen Entwicklungsarbeiten zur Schaffung kurzbrennweitiger Magnetlinsen benutzten Meßverfahren beschrieben. Aus Messungen an zahlreichen Polschuhsystemen werden die wesentlichen Zusammenhänge zwischen geometrischen Polschuhabmessungen (insbesondere Bohrung und Abstand der Polschuhe) und den Brennweiten der Objektive bzw. den Vergrößerungsweiten der Projektive bei verschiedenen Elektronengeschwindigkeiten und Spulendurchflutungen dargestellt und einige beim Bau der entwickelten Polschuhsysteme gemachte Erfahrungen mitgeteilt. Die gewonnenen Ergebnisse werden mit früheren experimentellen und theoretischen Angaben verglichen.

II. Eigenschaften und Bauweisen der Polschuhlinzen

Nach einer mathematischen Untersuchung von H. Busch [7] wird ein Elektronenbündel der Voltgeschwindigkeit U von einem zum Strahl coaxialen, dreh-symmetrischen Magnetfeld wie durch eine optische Linse gebündelt. Die Brennweite f dieser magnetischen Linse beträgt, solange f groß gegenüber der Feldlänge bleibt:

$$f = \frac{2v}{e/m} \cdot \frac{1}{\int_{-\infty}^{+\infty} \mathfrak{H}^2(z) dz}, \quad (4a)$$

wenn $\mathfrak{H}(z)$ den Verlauf der Feldstärke auf der z -Achse (Drehachse der Anordnung) angibt. Andererseits gilt nach den Grundbeziehungen zwischen magnetischer Feldstärke und Strom für das Feld auf der Achse einer Stromspule der Durchflutung $D = I \cdot n$ [A]

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \mathfrak{H}(z) dz = 0,4 \pi D \text{ [Gauß} \cdot \text{cm]}. \quad (4b)$$

Während der Wert des einfachen Integrals über das Feld auf der Achse nur durch die Durchflutung der Spule festgelegt ist, hängt der Wert des quadratischen Integrals zusätzlich noch von der Form der Feldkurve ab. Wird das Feld auf ein kurzes Stück der Achse zusammengedrängt, so daß hohe Feldstärken erreicht werden, so steigt das quadratische Integral wegen des Überwiegens der von den großen Feldstärkenwerten herrührenden Integrationsanteile an, d. h. die Brennweite des Spulenfeldes wird kleiner.

Mit einer gegebenen Spulendurchflutung wird daher eine um so kürzere Brennweite erzielt, je stärker das Feld auf ein kurzes Stück der Achse zusammengedrängt werden kann. Ein kurzes Feld und eine kleine Brennweite läßt sich zunächst durch kleine Spulenabmessungen erzielen. Um den Zusammenhang zwischen der durch den Feldverlauf auf der Achse gegebenen Brennweite und den Abmessungen der Stromspule zu übersehen, betrachten wir die einfachste Form einer Spule, den linearen Kreisleiter, und führen dessen Feldfunktionen in die Brennweitengleichung (4a) ein [8]. Dann ergibt sich das Verhältnis der Brennweite f zum Durchmesser d des linearen Kreisleiters als Funktion der Durchflutung D [kA] und der Elektronengeschwindigkeit U [kV] zu:

$$\frac{f}{d} = 0,0484 \frac{U}{D^2} \left(1 + \frac{U}{1000}\right). \quad (5a)$$

Für die zur Fokussierung der Elektronenstrahlen meist angewandten Spulenformen, bei denen weder die radiale noch die axiale Abmessung des Wickelquerschnitts klein gegen den mittleren Wicklungsdurchmesser \bar{d} ist, gilt:

$$\frac{D^2}{\bar{d}} \approx 0,06 \frac{U}{f} \left(1 + \frac{U}{1000}\right). \quad (5b)$$

Die Brennweite sinkt demnach verhältnismäßig mit dem mittleren Wicklungsdurchmesser. Das aus (5b) folgende Verhältnis der Durchflutung zum mittleren Wicklungsdurchmesser ist aber für die bei Übermikroskopen erforderlichen Strahlspannungen und Brennweiten so groß, daß die Stromdichte und Erwärmung der Spulenwicklung unzulässig hoch würde. Diese Schwierigkeit kann überwunden werden, wenn das Feld der Spule z. B. durch eine Kapselung aus ferromagnetischem Material bis auf die gewünschte kleine Achsenstrecke magnetisch kurzgeschlossen wird [8]. Mit einer solchen Konzentration des Feldes auf ein kurzes Stück der Achse erzielt man mit einer vorgegebenen Durchflutung besonders kleine Brennweiten. Durch die Feldlänge ist aber auch bei beliebig hoher Durchflutung eine untere Grenze für die Brennweite gegeben, so daß man um so mehr auf kürzeste Feldlänge achten muß, je kleinere Brennweiten man erreichen will. Bekanntlich müssen Objekte, die man stark vergrößern will, bis nahe an die objektseitige Brennebene der Linse gebracht werden. Vor der objektseitigen Brennebene soll sich kein wesentlicher Teil des Feldes befinden, um die anzustrebende kleine Bestrahlungsapertur nicht durch eine „Vorlinse“ zu vergrößern. Das Magnetfeld krümmt die Strahlen immer nach der Achse zu. Damit nicht die Strahlen nach dem Durchgang durch den bildseitigen Brennpunkt wieder zur Achse

zurückgekrümmt werden, was sich in einem kleineren Abbildungsmaßstab, d. h. einer scheinbaren Zunahme der Brennweite äußern würde, darf sich das Feld auch nicht zu einem wesentlichen Teil über die bildseitige Brennebene hinaus erstrecken. Der Hauptteil des Feldes muß sich demnach zwischen den beiden Brennebenen befinden, d. h. die Felddausdehnung darf nicht wesentlich größer sein als der zur Brennweite proportionale Brennebenenabstand.

In folgerichtiger Fortführung der Feldkonzentration durch die Eisenkapselung [8] erzeugt man das Linsenfeld zwischen zwei gegenüberstehenden koaxial durchbohrten Polschuhen (Polschuhlinsen) [9], womit man die kleinsten Brennweiten erreicht. Die Polschuhe lassen sich außer durch eine konzentrische Wicklung noch in anderer Weise erregen, so z. B. durch achsenparallel angeordnete Permanentmagnete, die den äußeren Mantel der Spulenkapselung und die Stromspule selbst ersetzen. Man kann auch von der drehsymmetrischen Form der Polschuherrregung abweichend die Polschuhe durch ein oder mehrere seitlich angebrachte, mittels Stromspulen erregte oder durch

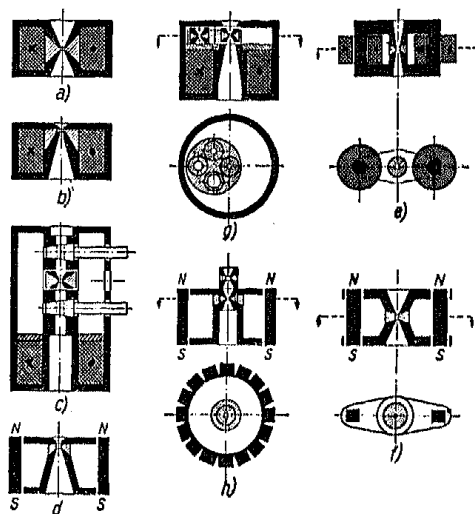


Bild 2. Schematische Darstellung verschiedener Bauweisen von Polschuhlinsen. a) Konzentrische Wicklung liegt symmetrisch zum Spalt. b) Konzentrische Wicklung liegt unsymmetrisch zum Spalt. c) Konzentrische Wicklung liegt weit entfernt vom Spalt. d) Konzentrische Anordnung von Stabmagneten. e) Zwei seitliche Joche werden durch Wicklungen erregt. f) Zwei seitliche Joche werden durch Stabmagnete gebildet. g) Mehrere Polschuhsysteme werden im Spulengehäuse unter Vakuum mittels eines Revolvers ausgetauscht. h) Mehrere Polschuhsysteme werden im Spulengehäuse unter Vakuum durch axiale Verschiebung ausgetauscht.

Permanentmagnete gebildete Joche verbinden. Da die Form des Linsenfeldes durch die Polschuhe bestimmt ist, bezeichnen wir alle diese Anordnungen als Polschuhlinsen [10]. Das Bild 2a bis h zeigt schematisch verschiedene bisher bekannte Bauweisen von Polschuhlinsen für hochauflösende Mikroskope.

Die zuerst angegebene Bauweise, bei der eine konzentrische Wicklung in einer ringförmig geschlossenen Eisenkapselung die Polschuhe umgibt [8], [9], wird heute fast durchweg verwendet. Die Anordnung, von der Bild 2a bis c verschiedene Ausführungsformen zeigt, weist die größte Symmetrie auf, so daß die gewünschten Felder mit dem geringsten Aufwand von Eisen bzw. bei elektromagnetischen Linsen auch von Kupfer sowie von Stromleistung erzielt werden können. Frühere eigene Messungen an solchen Systemen zeigten [11], daß unter sonst gleichen Umständen die kleinsten Brennweiten erzielt werden, wenn die Wicklung möglichst dicht am Spalt zwischen den Polschuhen angeordnet wird. Optimale Verhältnisse erhält man bei völliger Symmetrie, d. h. wenn die mittlere Spaltebene die axiale Wicklungshöhe halbiert (Bild 2a). Die Projektivlinsen lassen sich in dieser völlig symmetrischen Weise bauen, wobei beide Polschuhbohrungen sehr eng gemacht werden können, da auf das Heranbringen des Objekts keine Rücksicht zu nehmen ist. Bei solchen Projektiven lassen sich daher die höchsten Vergrößerungen erreichen.

Die Objektive konnten bisher wegen der Notwendigkeit, das Objekt in das Spulenfeld zu bringen, nicht in dieser günstigsten Art gebaut werden. Bei dem handelsüblichen Siemens-Übermikroskop [1] wird das Objekt durch eine vor dem Objektiv gelegene, aus einem konischen Hahnküken mit Querbohrung bestehende Schleuseneinrichtung in der Elektronenrichtung in das Spulenfeld hineingebracht. Beim

Objektwechsel wird also nur das Objekt selbst durch die Kükenbohrung aus dem Mikroskop entnommen, das Polschuhsystem verbleibt an seinem Ort. Da es Schwierigkeiten macht, das Objekt eine größere Strecke in Richtung auf die Linse zu verschieben und in dieser Lage noch eine Verstellung quer zum Strahl (Kreuztisch) durchzuführen, verlegt man den Feldspat aus der Mitte der Wicklungshöhe heraus gegen die der Objektschleuse zugewandte Seite der Spulenkapselung und erhält so eine unsymmetrische Lage des Spulenquerschnitts zum Feldspat (Bild 2b). Noch stärker ist diese Unsymmetrie bei einer anderen Objektivkonstruktion infolge der dort verwendeten Objektschleusenordnung [12]. Hier ist die Wicklung soweit entfernt vor dem zwischen den Polschuhen liegenden Spalt angeordnet, daß es möglich ist, das Polschuhsystem selbst mit dem Objekt seitlich über der Spulenwicklung aus dem Spulengehäuse herauszunehmen (Bild 2c). Durch je einen vor und hinter dem Polschuhsystem senkrecht zur optischen Achse liegenden konischen Schliff kann der Raum des Polschuhsystems von dem angrenzenden Mikroskopvolumen vakuumdicht abgetrennt werden, so daß beim Auswechseln der Polschuhe das übrige Mikroskop unter Vakuum verbleibt. Die beiden Schlitze besitzen Querbohrungen, die zum Evakuieren des Gerätes und zum Mikroskopieren in die Geräteachse gedreht werden, so daß der Strahl Spule und Polschuhe durchqueren kann. In dieser Weise wurden auch Projektive gebaut, um auch hier das Polschuhsystem seitlich herausnehmen zu können. Bei dieser Bauweise trat in der Höhe der Erregerwicklung trotz der permeablen Kapselung ein Streufeld auf der Achse auf, das wie eine schwächere, von der Hauptlinse getrennte Linse auf den Strahl einwirkt [13]. Da bei der beschriebenen Anordnung die Wicklung nach dem Bild zu liegt, so wirkt die bildseitige Nebenlinse besonders störend, da sie die resultierende Brennweite der Anordnung (Hauptlinse zwischen den Polschuhen und Nebenlinse am Ort der Erregerwicklung) heraufsetzt bzw. die erzielte Vergrößerung herabsetzt. Durch eine besondere Hilfswicklung, die das Streufeld der Hauptwicklung kompensiert, konnte diese Nebenlinse so geschwächt werden, daß im wesentlichen nur noch die durch die Hauptlinse allein gegebene Brennweite die Vergrößerung bestimmt.

In Bild 2d ist eine durch stabförmige Permanentmagnete (vgl. Querschnitt von 2h) erregte drehsymmetrisch aufgebaute Polschuhlinse wiedergegeben, durch die gleichfalls hochauflösende Abbildungen mit schnellen Elektronen erzielt werden [14]. Mit dieser Anordnung konnten bisher noch nicht so kleine Brennweiten erzielt werden wie bei elektromagnetischen Linsen, doch ist sicher eine weitere Brennweitenverkürzung auch hier möglich. Die einzelnen Stäbe können auch durch einen magnetischen Zylinder ersetzt werden. Die zeitliche Konstanz des Spulenfeldes ist bei Permanentssystemen ohne besonderen Aufwand gewährleistet. Eine Regelung der Brennweite kann hier nicht durch die bequeme Stromregelung, sondern muß durch mechanische Änderung eines Weicheisennebenschlusses oder eines Streuspaltens erfolgen.

Die weiteren Bilder 2e, f zeigen von der Drehsymmetrie abweichende Formen der Polschuhlinse, wie sie für Oszillographen vorgeschlagen und benutzt [15] und neuerdings auch für ein hochauflösendes Elektronenmikroskop verwendet [15a] wurden. Bei dieser Anordnung ist es möglich, das Objekt von der Seite her zwischen die Polschuhe einzubringen, obwohl die erregenden Wicklungen in Spalthöhe angeordnet sind. Das Objekt wird dann nach dem Einbringen entgegen der Elektronenrichtung durch einen vor der Spule angeordneten Greifer bis in die Betriebslage bewegt und kann in dieser Ebene zur Durchmusterung quer verschoben werden. Um den Einfluß der nicht drehsymmetrischen Polschuherrregung auf die Ausbildung des Linsenfeldes zu verringern, wird der Außendurchmesser der Polschuhe durch die Polschuhe umschließende konzentrische Zylinder so weit vergrößert, daß der von zwei Seiten kommende magnetische Fluß schon in größerer Entfernung von der Achse symmetriert wird und in unmittelbarer Nähe der Polschuhbohrungen einen entsprechend besseren Grad der

Drehsymmetrie erreicht. Mit der Anordnung sind bei größeren Brennweiten (elektronenoptische Vergrößerungen bis etwa 6000:1) Bilder guter Auflösung ($\sim 10 \text{ m}\mu$) erreicht worden. Die Erregung der Polschuhle kann statt durch stromumflossene (2c) auch durch permanentmagnetische (2f) Joche erfolgen. Bilder mit letzterer Anordnung sind bisher nicht bekannt geworden.

Die bisher beschriebenen Linzen enthalten ein einziges Polschuhsystem, das gegen ein anderes nur ausgetauscht werden kann, wenn das Vakuum des Elektronenmikroskops im Polschuhraum unterbrochen wird. Als letztes Beispiel sei daher in Bild 2g noch eine Anordnung (Siemens) gezeigt, bei der mehrere Polschuhsysteme in einer drehbaren Trommel aus unmagnetischem Material so vereinigt sind, daß durch Drehen des „Revolvers“ von außen, z. B. durch einen Schliff, ohne Unterbrechung des Vakuums verschiedene Systeme in den Strahlengang gebracht werden können [16]. Solche Systeme sind besonders für die Projektive bequem, um z. B. durch Polschuhsysteme verschiedener lichter Durchmesser die Vergrößerung in groben Stufen zu regeln oder um für Beugungsaufnahmen des Objekts den Beugungskegel durch eine entsprechend große Öffnung im Projektivrevolver bis auf die Photoschicht durchzulassen. Alle Polschuhsysteme der Trommel können mit Bildfeldblenden versehen werden, die das bei der maximalen Vergrößerung erzeugte Bild auf etwa das Aufnahmeformat begrenzen, wodurch eine einfache Bestimmung des jeweiligen Abbildungsmaßstabes aus der Blendengröße und der Bildbegrenzung möglich ist. Auch hier kann natürlich die Erregung durch ein Permanentmagnetsystem erfolgen (2h) und die Polschuhsysteme können in anderer Art ausgetauscht werden, z. B. in Achsenrichtung verschiebbar¹⁾ angeordnet sein.

Alle Polschuhlinzen zeigen, abgesehen von ihren sehr viel kürzeren Brennweiten, gegenüber eisenfreien Linzen charakteristische Abweichungen, die durch die in den Polschuhen auftretenden Sättigungserscheinungen bedingt sind [11]. So bewirkt die im Sättigungsbereich auftretende Änderung der Feldform mit der Stärke des Feldes (Spulendurchflutung), daß ein innerhalb des Linsenfeldes liegendes Objekt in einem gegebenen Abstand von der Spule bei verschiedenen Elektronengeschwindigkeiten nicht mit der gleichen Vergrößerung abgebildet wird. Der Abbildungsmaßstab sinkt vielmehr bei steigender Elektronengeschwindigkeit, weil die Umgebung der Polschuhbohrungen infolge der notwendigen stärkeren Spulendurchflutung immer mehr gesättigt wird, so daß die Verteilungskurve des Feldes auf der Achse sich abflacht. Das sich in axialer Richtung ausdehnende Feld bedingt, daß die Elektronen erst nach Rücklegung eines längeren axialen Weges unter entsprechend kleinerem Winkel die Achse schneiden, so daß die Brennweite wieder zunimmt.

Da man besonders in den Objektiven geringe Linsenfehler bei hoher Vergrößerung erzielen will, ist von besonderem praktischen Interesse die kleinste Brennweite, die mit einer gegebenen Polschuhform erzielt werden kann, sowie die Abhängigkeit dieser Minimalbrennweite von der Strahlspannung und die zugehörigen Spulendurchflutungen [11]. Bei höheren Strahlspannungen bleibt die Maximalvergrößerung kleiner, d. h. die Minimalbrennweite ist größer. Trägt man die Minimalbrennweiten als Funktion der Elektronengeschwindigkeit auf, so erhält man annähernd Gerade, die nicht durch den Koordinaten-Nullpunkt verlaufen, sondern bei der Geschwindigkeit Null auf der Ordinate eine endliche Brennweite bestimmen [17]. Die Größe dieser Nullbrennweite sowie der Anstieg der Minimalbrennweite mit der Strahlspannung hängt von der Polschuhform ab (vgl. Abschnitt V).

III. Bestimmung der Brennweiten von Objektiven und der Vergrößerungsweiten von Projektiven

Objektiv und Projektiv im Übermikroskop haben die Aufgabe, den Gegenstand bzw. das von diesem entworfene reelle Bild zu vergrößern (vgl. Bild 3). Für das

¹⁾ Nach einem Vorschlag von B. v. Borries.

Objektiv interessiert daher die Brennweite des Feldbereichs, der zwischen dem Objekt und dem Zwischenbild liegt. Die Brechkraft des vor dem Objekt liegenden Feldanteils trägt zur Vergrößerung nichts bei, sondern bewirkt nur eine Steigerung der Bestrahlungsintensität durch Zusammendrängung der einfallenden Strahlen. Aus dem in einem gegen die Felddausdehnung der Linse großen Abstand b_m gemessenen und daher gegen 1 großen Abbildungsmaßstab M_m ergibt sich die Brennweite des Objektivs f_0 zu

$$f_0 = \frac{b_m}{M_m = d_m/d_0} \quad (6a)$$

Zwischen dem Objektivfeld und dem auszumessenden Bild d_m darf sich natürlich kein weiteres brechendes Feld befinden, wenn die Objektivbrennweite allein bestimmt werden soll. Die Scharfstellung des Bildes d_m konnte wegen seiner nur einstufigen und daher geringen Vergrößerung nicht an diesem Bild geprüft, sondern mußte an dem durch das Projektiv weitervergrößerten, zweistufigen Bild auf dem Endschirm beobachtet werden. Der Abbildungsmaßstab M_1 der Objektivstufe des zusammengesetzten Mikroskops ist größer als M_m , da der Meßleuchtschirm aus konstruktiven Gründen nicht genügend nahe vor dem Projektivfeld bzw. am Ort des Zwischenbildes liegen kann. Es ist $M_1 = b_1/f_0$, wobei b_1 die Bildweite der ersten Stufe, das ist der Abstand des Projektivs (Zwischenbildes) vom Objektiv ist.

Um den Abbildungsmaßstab der zweiten Stufe (Projektivvergrößerung) messen zu können, blendet man das in das Projektiv einfallende Bündel durch eine unmittelbar vor dem Projektivfeld liegende (Gesichtsfeld-)Blende vom Durchmesser d_p aus, wodurch sich die Begrenzung d_2 des Endbildes ergibt. Aus der gemessenen Vergrößerung des Endbildes gegenüber diesem Strahlquerschnitt d_p vor dem Projektivfeld folgt als Kenngröße des Projektivs eine Vergrößerungsweite v_p gemäß

$$v_p = \frac{b_2}{M_2 = d_2/d_p} \quad (6b)$$

die wir im folgenden der Beurteilung von Projektiven zugrunde legen, da sie sich unmittelbar aus dieser leicht durchführbaren Vergrößerungsbestimmung ergibt. Die Bestimmung von v_p kann unmittelbar bei der Bildweite b_2 der Projektivstufe vorgenommen werden, da hier der Meßschirm dicht vor der photographischen Platte als dem Ort des Endbildes angeordnet werden kann. Der gesamte Abbildungsmaßstab M des Mikroskops ist demnach

$$M = M_1 \cdot M_2 = \frac{b_1}{f_0} \cdot \frac{b_2}{v_p}$$

Zur Bestimmung der Brennweite des Projektivs f_p müßte die Größe des zum Endbild gehörigen Zwischenbildfelds d_z bekannt sein. Es ist

$$f_p = \frac{b_2}{M'_2 = d_z/d_z} \quad (6c)$$

Ebenso wie das Objekt bei der höchsten Objektivvergrößerung schon innerhalb des Objektivfelds liegt, so muß auch das vom Objektiv erzeugte Zwischenbild d_z zur

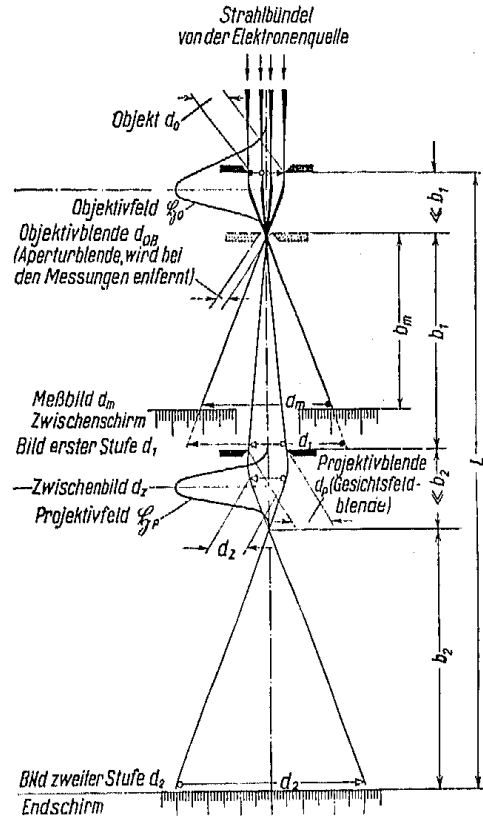


Bild 3. Strahlengang im Elektronenmikroskop.

möglichst starken Weitervergrößerung schon in den Feldbereich des Projektivs verlegt werden. Die Zusammendrängung der einfallenden Strahlen durch das anklingende Projektivfeld bewirkt nun aber eine immer stärkere Abnahme der Vergrößerung des Objekts zum Zwischenbild gegenüber dem unmittelbar vor dem Beginn des Projektivfeldes vorhandenen Strahlquerschnitt d_p . Diese Abnahme der Vergrößerung darf nicht stärker werden als die Zunahme der Vergrößerung des Zwischenbildes zum Endbild infolge der mit dem Hereintrücken in das Feld verbundenen Abnahme der Projektivbrennweite. Die höchste Vergrößerung im Mikroskop entsteht daher auch nicht bei der Minimalbrennweite des Projektivs, sondern bei einer etwas größeren Brennweite bei entsprechend kleinerer Spulendurchflutung. Solange das Zwischenbild nur kurz vor dem Anfang des Projektivfeldes liegt, gilt $d_z = d_p$, $M_2 = M_1$, so daß auch $f_p = v_p$ ist. Liegt d_z dagegen schon im ansteigenden Feld des Projektivs und wird so gegenüber d_p verkleinert, dann ist f_p keine geeignete Kenngröße für den Abbildungsmaßstab der Projektivstufe mehr.

Die Bestimmung der Brennweiten und Vergrößerungsweiten wurde bis zu Strahlspannungen von 100 kV in einem serienmäßigen Siemens-Übermikroskop [18] oberhalb 100 bis zu 220 kV in einem mit zweistufigem Strahlerzeugungsrohr versehenen Versuchsgerät [19] durchgeführt. Die Meßleuchtschirme für d_m und d_2 vor dem Projektiv bzw. vor der photographischen Platte waren mit einer mm-Teilung versehen, die nach Aufbringen der Leuchtmasse in dieselbe eingraviert war. Die feinen von der Leuchtmasse befreiten Striche ließen eine sehr gute Ablesung zu. Als Meßobjekte d_0 bzw. d_p dienten meistens Blenden aus Gold-Platin. An die etwa 0,2 mm lange Meßbohrung von 0,2 mm Durchmesser schloß sich eine Kegelöffnung von 90° an. Bohrungen von dieser Größe lassen sich einerseits noch genügend rund herstellen, so daß es gleich ist, welcher Durchmesser im Elektronen- und Lichtbild ausgemessen wird. Andererseits läßt sich die Größe einer solchen Bohrung unter dem Lichtmikroskop noch bequem auf 2% genau bestimmen.

Bei der Brennweitenbestimmung der Objektivsysteme wurden die Objektblenden in Blendenfassungen eingelegt und diese nach Einschrauben in die Objektpatrone mittels der Objektschleuse in das Mikroskop eingeschleust und mit dem Objekttrieb federnd auf das Objektivpolschuhsystem aufgedrückt. Um den Abstand von den Objektiven verschiedener Form zu variieren, wurden besondere Meßsätze von verschieden hohen Blendenfassungen hergestellt. Die Objektblenden konnten mittels dieser Fassungen innerhalb eines axialen Bereichs von etwa 3 mm in jeweils um 0,2 oder auch nur um 0,1 mm verschiedene Entfernungen von den Objektivspalten gebracht werden.

Um die Scharfstellung des Meßbildes d_m der Objektivstufe und damit die Brennweitenbestimmung einwandfrei durchführen zu können, wurden die Objektblenden mit dem üblichen Kollodiumfilm versehen und auf diesen kolloides Silber aufgebracht. Die Scharfstellung des Objektivmeßbildes d_m wurde dadurch kontrolliert, daß dieses Bild mittels des Projektivs mit mäßiger Vergrößerung auf dem Endbildschirm abgebildet wurde. Die Einstellgenauigkeit des Objektivstroms wurde dadurch gesteigert, daß die Aperturblende im Objektiv herausgenommen wurde und die Abbildung mit gegenüber dem Mikroskopierbetrieb besonders großer Apertur und daher geringerer Tiefenschärfe erfolgte. Die Spulendurchflutung änderte sich dabei gegenüber der Abbildung mit achsennahen Strahlen (Einwirkung des Öffnungsfehlers) nur um innerhalb der Meßgenauigkeit liegende prozentuale Werte.

Bei sehr niedrigen Strahlspannungen lassen sich besonders kleine Brennweiten erreichen, wobei das Meßobjekt besonders tief im Linsenfeld liegt. Die Linse wirkt daher schon vor dem Objekt erheblich auf das Strahlenbündel ein und krümmt die etwa parallel auf das Objekt gerichteten Strahlen nach innen, so daß sie die Objektebene nicht senkrecht, sondern schon unter einem kleineren Winkel treffen. Bei den meist verwendeten aufgebohrten Gold-Platinblenden mit einem Bohrkanal von etwa

0,2 mm Länge wird deshalb der äußerste Rand des Objektfilms nicht mehr von Elektronen getroffen, so daß das beleuchtete Objektfeld nicht mehr mit der Größe der Bohrung in die Gleichungen eingesetzt werden darf. Zur Verminderung dieser Ungenauigkeit wurden für die Messungen bei sehr kleinen Strahlspannungen besondere Meßblenden benutzt, die aus einer dickeren Bronzeblende mit größerer Bohrung als Unterlage und einer nur 0,05 mm dünnen aufgelöteten Bronzefolie mit der Meßbohrung von 0,2 mm Durchmesser bestanden.

Zur Bestimmung der Vergrößerungsweiten der Projektivsysteme wurden in genügender Entfernung vor dem Linsenfeld der Strahlquerschnitt durch eine Meßblende aus Platin mit 0,2 mm Bohrung ausgeblendet. Ausgemessen wurde auf dem

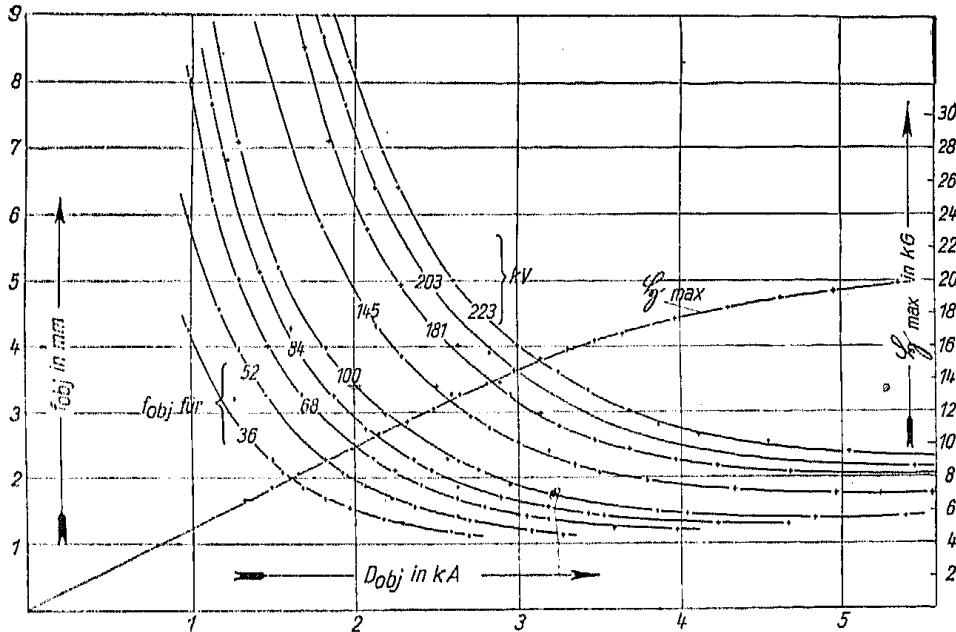


Bild 4. Brennweiten für verschiedene Elektronengeschwindigkeiten und Sättigung eines Objektivs ($d_1 = 2,4$ mm, $d_2 = 1,6$ mm, $s = 2$ mm) als Funktion der Durchflutung.

Endbildleuchtschirm der Durchmesser der Kreisfläche als Funktion der Spulendurchflutung. Die Bestimmung der Vergrößerungsweiten wurde auch bei solchen Versuchsobjektiven vorgenommen, deren Polschuhbohrungen zu klein waren, um die Rüssel der Blendenfassungen bzw. die Blenden selbst durchzulassen, so daß die oben beschriebene Brennweitenbestimmung (optische Einstellung auf das Meßobjekt) nicht durchführbar war. Solange bei ansteigender Durchflutung die dem Meßbild zugeordnete Dingebene noch vor dem Anstieg des Objektivfeldes liegt, ist die zugehörige Brennweite mit der gemessenen Vergrößerungsweite identisch. Rückt bei weiter ansteigender Durchflutung die Dingebene in das Objektivfeld hinein, so werden die zugehörigen Brennweiten kleiner als die gemessenen Vergrößerungsweiten.

Für jedes durchgemessene Polschuhsystem wurde die Bildgröße als Funktion des Spulenstroms gemessen und daraus die Brennweite bzw. die Vergrößerungsweite als Funktion der Spulendurchflutung aufgetragen. Aus den Objektivmessungen folgte zugleich die Objektlage im Polschuhsystem für jede Brennweite. Die Messungen wurden bei verschiedenen Strahlspannungen in einem Bereich von 36 bis 220 kV für eine größere Zahl von Systemen durchgeführt, wie es Bild 4 für ein Objektivsystem zeigt. Für jede Strahlspannung ergibt sich bei einer bestimmten Spulendurchflutung die Minimalbrennweite. Entsprechend wurden die Messungen der Vergrößerungsweiten einer größeren Zahl von Projektiven durchgeführt¹⁾.

¹⁾ Ich danke Fr. G. Hieronymus für die sorgfältige Durchführung der sehr zahlreichen Meßreihen von Brennweiten und Vergrößerungsweiten.

IV. Messung des Feldverlaufs auf der Achse und der Sättigung von Polschuhsystemen

Da Brennweiten (Vergrößerungsweiten) und Bildfehler der Elektronenlinsen durch den Feldverlauf auf der Achse gegeben sind und dieser sich bei magnetischen Linsen wegen der Sättigungserscheinungen in den Polschuhen schwer berechnen läßt, ergab sich bei der Entwicklung der Polschuhsysteme bald auch das Bedürfnis nach einer Ausmessung des magnetischen Feldverlaufs auf der Systemachse. Von J. Dosse wurde daher eine Präzisionsmeßanordnung geschaffen, bei der mittels einer sehr kleinen längs der Achse verschiebbaren Induktionsspule beim Umpolen der Linsenspulen das Magnetfeld ballistisch gemessen wird [20]. Die Auswertung solcher Feldverteilungskurven [6] ergab je nach der Höhe der Spulendurchflutung D und der dadurch besonders in den Polschuhenden bedingten verschiedenen hohen Sättigung mehr oder weniger steile glockenförmige Kurven. Glücklicherweise entsprachen gerade im praktisch wichtigen Sättigungsgebiet die gemessenen Kurven weitgehend derjenigen mathematischen Funktion, für die Glaser [4] Brennweite, Vergrößerungsweite und die Bildfehlerkoeffizienten streng berechnet hatte. Wenn auch die Bestimmung

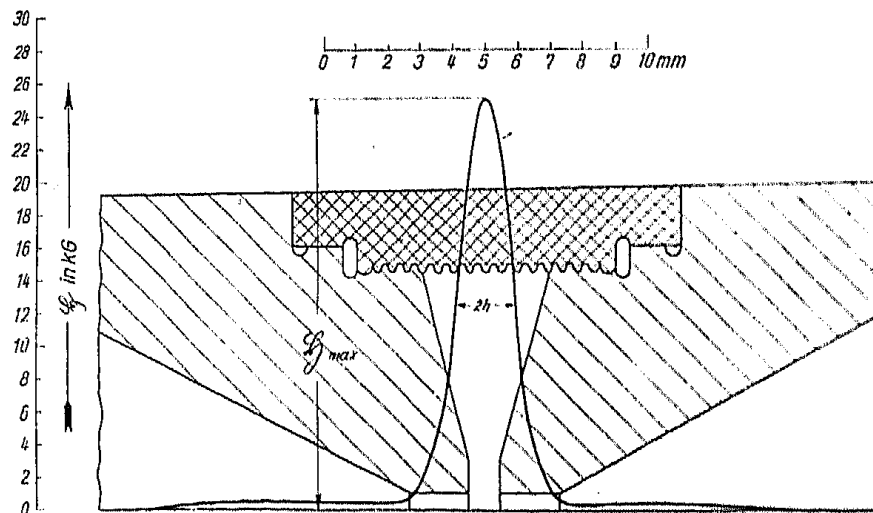


Bild 5. Polschuhquerschnitt eines Projektivs ($d_1 = d_2 = s = 1$ mm) und zugehörige Feldkurve bei 4 kA Durchflutung.

der Brennweiten und Vergrößerungsweiten rascher durch die beschriebene Ausmessung der Bilder im Übermikroskop erfolgt, so lassen sich aus den gemessenen Feldkurven besonders gut die Maßnahmen zur Verbesserung der Polschuhformen ableiten. Durch die Variation der geometrischen Abmessungen der Polschuhsysteme muß eine Feldkurve erzielt werden, die von einem möglichst hohen Maximum möglichst rasch und stetig nach beiden Seiten abfällt, insbesondere aber keine Nebenmaxima aufweist. Feldhöchstwerte lassen sich durch optimale Abmessungen der beiden Polschuhbohrungen (d_1 , d_2) und Spaltweiten (s) erzielen, Nebenmaxima durch genügend große Eisenquerschnitte vermeiden. Durch konstruktive Nebenbedingungen (z. B. Objekteinführung und -verschiebung) wird die Verwendung der feldmäßig günstigsten Abmessungen oft nicht möglich sein, so daß man sich mit günstigen Annäherungen an die theoretisch erreichbaren optimalen Verhältnisse begnügen muß. Feldkurven wurden für eine große Reihe von Objektiv- und Projektivsystemen bei Durchflutungen von 3, 4, 5 und 6 kA aufgenommen und über den Querschnitten der Polschuhsysteme aufgetragen. So zeigt beispielsweise Bild 5 für ein symmetrisches Projektivsystem ($d_1 = d_2 = s = 1$ mm) bei 4 kA Durchflutung den Feldverlauf auf der Achse in Gauß zusammen mit dem Querschnitt der Polschuhsysteme im Achsenmaßstab. Die Umrechnung der unmittelbaren Meßwerte (Skalenteile des zu den Messungen verwendeten Siemens-Supergalvanometers) in Gauß erfolgte für jede einzelne Messung gesondert

durch Berechnung des Flächenintegrals der Meßkurve, das nach Gl. (4b) der Durchflutung D proportional sein muß. Bei diesen Untersuchungen wurden auf der optischen Achse Feldstärken bis über 26000 Gauß gemessen. Um über den Grad der Sättigung in den Polschuhen bei den verschiedenen Durchflutungen einen Überblick zu erhalten, wurde nach den Feldmessungen mit der auf die beschriebene Weise geeichten Induktionsspule die maximale Feldstärke in der Spaltmitte als Funktion der Durchflutung gemessen (Sättigungskurven). Eine solche Sättigungskurve ist für das Objektiv in Bild 4 eingetragen.

Bei Objektiv- und Projektivsystemen, die zur rascheren und bequemeren Auffindung der optimalen Spaltabmessungen (s_{opt}) einen durch Verschrauben des inneren Teils eines Polschuhs einstellbaren Spalt aufwiesen, wurde Ort und Wert der maximalen Feldstärke bei verschiedenen Spaltweiten aufgesucht und so der optimale Spalt für eine fest eingestellte Durchflutung bestimmt¹⁾.

V. Bemessung der Polschuhsysteme

Bei der Dimensionierung von Polschuhsystemen fragen wir zunächst nach den Abmessungen, die kleinste Brennweiten ergeben, um zu möglichst kurzen Elektronenmikroskopen hoher Vergrößerung zu gelangen. Die in diesem Abschnitt wiedergegebenen, aus Einzelmessungen nach Bild 4 und 5 gewonnenen Kennlinienblätter zeigen quantitativ, zu wie kleinen Brennweiten bzw. Vergrößerungsweiten man durch Verkleinerung der Polschuhbohrungen bei den verschiedenen Elektronengeschwindigkeiten kommt. Während man für die Projektivlinsen, auf deren Fehlerfreiheit es weniger genau ankommt, sehr kleine Abmessungen zulassen kann, werden die Objektivsysteme, deren optische Fehler die Auflösungsfähigkeit des Mikroskops begrenzen, besser mit größeren Bohrungen gebaut, um eine bessere mechanische Herstellung und eine geringere Einwirkung des magnetisch nicht genügend homogenen Materials auf das Strahlenbündel zu erzielen. Beim Objektiv verlangt die Rücksichtnahme auf die Einbringung des Objekts und seine Verschiebung meist ohnehin die Einhaltung größerer Abmessungen von Polschuhbohrung oder Spaltweite, so daß beide Gesichtspunkte zur gleichen Maßnahme führen. Da das magnetische Material bei hohen Sättigungen homogener ist als in ungesättigtem Zustand, erhält man fehlerfreiere Linsen aus inhomogenem Material, wenn man die Polschuhe sättigt, d. h. in der Nähe der Minimalbrennweite arbeitet. Wegen der Forderung besonders großer Fehlerfreiheit der Objektive sollten besonders diese nach Möglichkeit mit der Minimalbrennweite betrieben werden.

Aber auch bei Projektiven hat die nicht genügende Homogenität des magnetischen Materials zur Folge, daß man die Brennweite eines Polschuhsystems durch Verminderung der Spulendurchflutung nicht sehr stark vergrößern kann, ohne störende, nicht drehsymmetrische Verzeichnungen zu erhalten. Will man daher den Abbildungsmaßstab im Elektronenmikroskop auf wesentlich weniger als die Hälfte, z. B. um eine Zehnerpotenz verringern können, so ist es besser, austauschbare Polschuhsysteme mit abgestuften größeren Bohrungen bzw. minimalen Vergrößerungsweiten zu verwenden, die gegebenenfalls auch unter Vakuum gewechselt werden können.

In besonderen Fällen kann es notwendig werden, Polschuhsysteme hoher optischer Güte bei im Verhältnis zu ihren Bohrungen großen Brennweiten zu betreiben. Um auch dann zur Vermeidung von Inhomogenitätsfehlern mit möglichst gesättigten Polschuhen zu arbeiten, müssen die Polschuhquerschnitte wesentlich kleiner gemacht werden, als bei Polschuhsystemen gleicher Bohrung, die für die kleinste bei dieser Bohrung erreichbare Brennweite ausgebildet sind.

In anderen Fällen wird es sich aber nicht immer vermeiden lassen, mit einer niedrigeren magnetischen Erregung zu arbeiten, als sie zur Erzielung der Minimal-

¹⁾ Ich danke Frau R. Biss für die sorgfältige und schwierige Ausmessung zahlreicher Linsenfelder.

brennweite aufgewandt werden müßte. So ist z. B. bei Elektronenmikroskopen mit magnetostatischen Linsen die erreichbare magnetische Erregung begrenzt, aber auch in elektromagnetischen Kleinmikroskopen wird man Polschuhsysteme im ungesättigten Bereich betreiben, um zu möglichst geringen Spulenleistungen zu kommen. Es wurden daher die Brennweiten und Vergrößerungsweiten von nach Bohrung und Spaltweite variierten Polschuhsystemen auch bei kleineren als den optimalen Durchflutungen gemessen und im folgenden zusammengestellt und ausgewertet.

Projektiventwicklung

Die Beziehungen zwischen der Brechkraft des Feldes und den Querschnitts-abmessungen sind besonders einfach an den symmetrisch ausgebildeten Polschuhsystemen der Projektive zu überschauen. Wenn hier auch nur die Vergrößerungsweiten

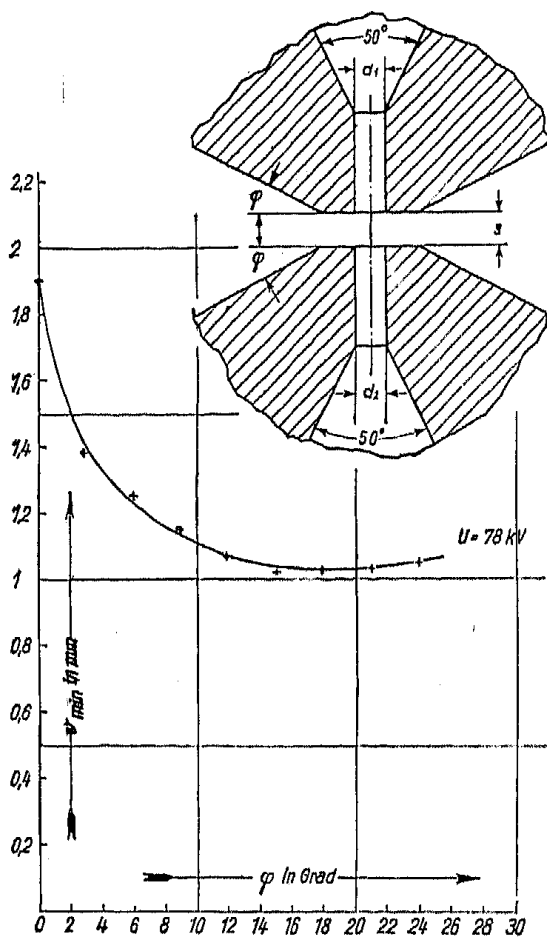


Bild 6. Minimale Vergrößerungsweite eines symmetrischen Projektivs ($d_1 = d_2 = s = 1 \text{ mm}$) als Funktion des Kegelwinkels.

seitigen Polschuh ergibt sich demnach zu $r/\text{tg } \beta$, wenn r der Bohrungsradius und β der halbe Bildwinkel ist.

Man kann sich qualitativ überlegen, daß es nicht gut ist, die flachen, einander gegenüberliegenden Stirnflächen der beiden Polschuhe zu groß zu machen, da dann an den Polschuhenden eine weniger große Kraftliniendichte entsteht, als wenn die Polschuhendflächen kegelig ausgebildet sind, so daß sich die Kraftlinien nach der Systemachse hin zusammendrängen, wo der Luftspaltwiderstand am kleinsten ist. Wenn andererseits der Kegelwinkel und damit die Polschuhquerschnitte zu klein werden, drängen sich die Kraftlinien innerhalb der Polschuhbohrung schon vor dem

gemessen wurden, so geben diese doch auch an, wie kleine Brennweiten sich mit entsprechend dimensionierten Objektivsystemen mindestens erreichen lassen. Im Gegensatz zu den später behandelten unsymmetrischen Objektivsystemen sind bei Projektivsystemen kaum konstruktive Nebenbedingungen vorhanden, welche es erschweren, die zur Erreichung der kleinsten Vergrößerungsweiten optimalen Abmessungen einzuhalten. So kann die zur Endbildbegrenzung dienende Blende genügend weit vor dem Spalt angebracht werden und die Bohrungen beider Polschuhe sowie der zwischen ihnen liegende Spalt können beliebig klein gemacht werden. Lediglich die bildseitige Bohrung muß sich nach dem Bild zu mit mindestens dem Bildwinkel öffnen. Da das Feldmaximum bei gleich großen Bohrungen in beiden Polschuhen in der Spaltmitte liegt und das Feld in den Grenz-ebenen des Spaltes mit den Polschuhen steil abfällt, findet die Strahlenkrümmung praktisch nur im Spalt statt. Daraus ergibt sich, daß im Fall der Abbildung mit der Minimalbrennweite das Objekt etwa in der ersten Grenz-ebene und der bildseitige Brennpunkt in der zweiten Grenz-ebene des Spaltes liegt. Die maximale Länge der zylindrischen Bohrung im bild-

Spalt aus dem Eisenquerschnitt heraus, so daß sie auf der Polschuhachse einen vorzeitigen Anstieg des Feldes verursachen, der die maximale Feldstärke in der Spaltmitte vermindert. Eine Versuchsreihe, bei der an einem symmetrischen Polschuhsystem ($d_1 = d_2 = s = 1 \text{ mm}$) der Polschuhkegel variiert wurde, ergab die kleinsten Vergrößerungsweiten bei einem Winkel φ der Kegelerzeugenden mit der achsensenkrechten Ebene von 15 bis 20° , das ist bei einem vollen Kegelwinkel der Polschuhspitze von 150 bis 140° . Die Kegel waren bei der Versuchsreihe durch Kreisflächen von 3 mm Durchmesser abgeschnitten, in welche die mindestens 3 mm langen zylindrischen

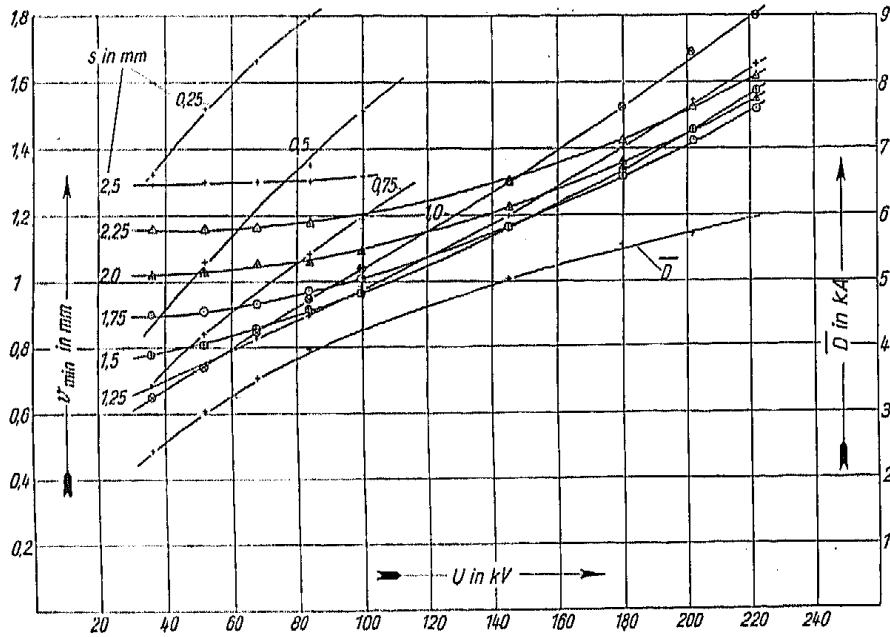


Bild 7. Minimale Vergrößerungsweiten einer Polschuhbohrung ($d = 0,6 \text{ mm}$) als Funktion der Elektronengeschwindigkeit für verschiedene Spaltweiten (Bestimmung der optimalen Spaltweite).

Bohrungen einmündeten. Der an die Bohrungen anschließende innere Öffnungswinkel der Polschuhe betrug 50° . In Bild 6 ist die minimale Vergrößerungsweite dieses Projektivs als Funktion des Winkels φ für 78 kV schnelle Elektronen aufgetragen. Messungen bei Systemen mit noch kleineren Bohrungen und Spalten ($d_1 = d_2 = s = 0,8 \text{ mm}$ und $d_1 = d_2 = s = 0,6 \text{ mm}$) ergaben etwa die gleiche Größe des günstigsten Polschuhwinkels.

Die nachfolgenden Versuche zur Festlegung von Bohrung und Spaltgröße für kleinste Vergrößerungsweiten wurden mit Polschuhsystemen von annähernd dem gefundenen optimalen Kegelwinkel durchgeführt. Dabei wurden von Polschuhen mit $0,4, 0,6, 1,0, 1,4, 2,0, 4,0$ und $7,0 \text{ mm}$ Durchmesser die Vergrößerungsweiten für Elektronen von 36 bis 220 kV gemessen. Die Polschuhsysteme von $0,4, 0,6, 1,0$ und $2,0 \text{ mm}$ Bohrungsdurchmesser waren mit einstellbarem Spalt ausgeführt. Der Spalt wurde bei den Messungen von $0,25$ bis $2,5 \text{ mm}$ variiert. Bild 7 zeigt die minimalen Vergrößerungsweiten einer Polschuhbohrung ($d = 0,6 \text{ mm}$) als Funktion der Elektronengeschwindigkeit U für verschiedene Spaltweiten. Die optimale Spaltweite wächst mit Elektronengeschwindigkeit und Durchflutung. Da sich bei gleicher Elektronengeschwindigkeit die Durchflutungen wenig mit der Spaltweite ändern, wurde auch diese mittlere Durchflutung \bar{D} als Funktion der Elektronengeschwindigkeit aufgetragen. Bild 8 zeigt die minimalen Vergrößerungsweiten als Funktion der Bohrungsdurchmesser für einige Elektronengeschwindigkeiten bei jeweils optimalem Spalt. Spulendurchflutung und optimale Spaltweite, beide weitgehend von der Polschuhbohrung unabhängig, sind an den Kurven für die verschiedenen Elektronengeschwindigkeiten vermerkt. Durch Verkleinerung der Bohrungsdurchmesser läßt sich die Vergrößerungsweite nicht beliebig verkleinern, sondern sie strebt einem Grenzwert zu, durch den eine

praktische untere Grenze für die Polschuhbohrungen gegeben ist. Diese sinkt mit der Elektronengeschwindigkeit, jedoch ebenfalls nicht unbegrenzt. Bohrungen von wesentlich unter 0,6 mm brachten demnach bisher keinen die sonstigen Nachteile so kleiner Bohrungen aufwiegenden Gewinn an Vergrößerung mehr.

In den weiteren Bildern 9, 11 und 12 sind nicht die minimalen, sondern die zu einer festen (gegenüber der optimalen Durchflutung geringeren) Durchflutung gehörenden Vergrößerungsweiten als Funktion der Elektronengeschwindigkeit bzw. der Polschuhbohrung aufgetragen. Bild 9 zeigt für eine gegebene Durchflutung ($D = 2 \text{ kA}$)

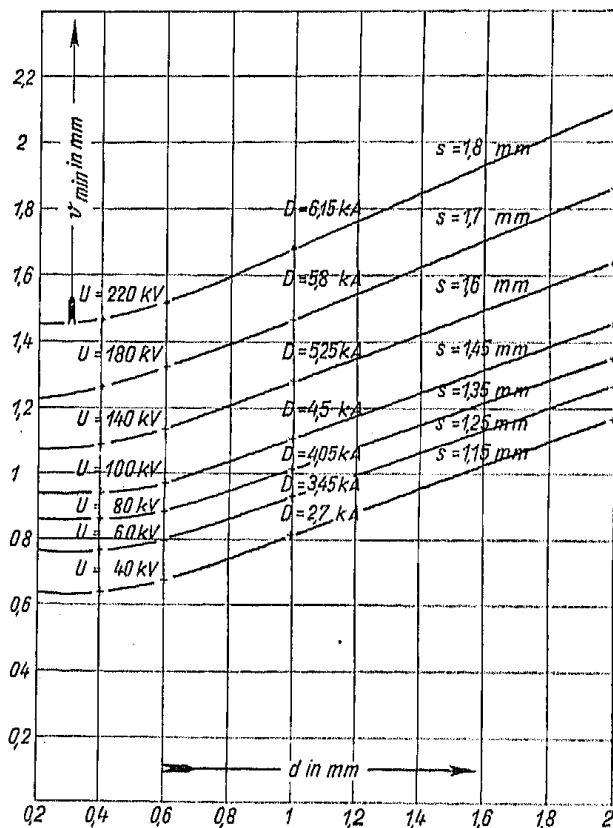


Bild 8.

Bild 8. Minimale Vergrößerungsweiten als Funktion der Polschuhbohrung bei optimalen Spaltweiten für einige Elektronengeschwindigkeiten.

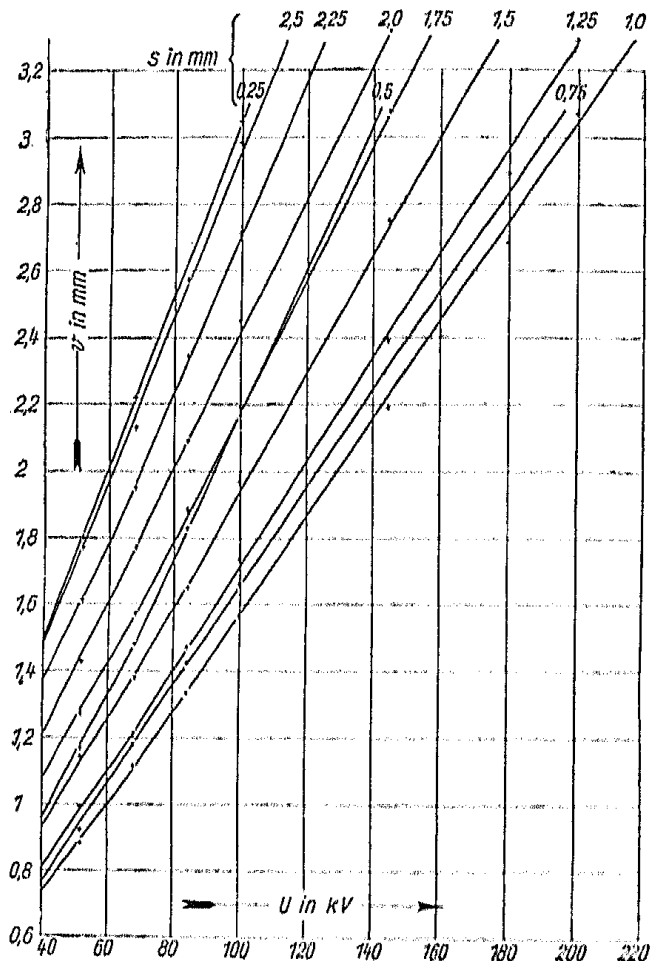


Bild 9.

Bild 9. Vergrößerungsweiten einer Polschuhbohrung ($d = 0,6 \text{ mm}$) bei vorgegebener kleinerer als optimaler Durchflutung ($D = 2 \text{ kA}$) als Funktion der Elektronengeschwindigkeit für verschiedene Spaltweiten (Bestimmung der günstigen Spaltweite).

und eine gegebene Bohrung ($d = 0,6 \text{ mm}$) die Vergrößerungsweiten als Funktion der Elektronengeschwindigkeit für verschiedene Spaltweiten. Die günstigste Spaltweite ist von der Elektronengeschwindigkeit praktisch unabhängig; dagegen ist sie von der Durchflutung abhängig und wird mit sinkender Durchflutung deutlich geringer. Bild 10 gibt diesen Zusammenhang zwischen Durchflutung und günstiger Spaltweite, der jedoch nur im Bereich kleinerer Durchflutungen (unterhalb der Sättigung, das ist bis höchstens $2,5 \text{ kA}$) so weitgehend unabhängig von der Größe der Polschuhbohrung und der Elektronengeschwindigkeit ist. Im Sättigungsgebiet ($D = 2,5 \text{ kA}$) werden die günstigen Spaltweiten immer stärker auch von der Elektronengeschwindigkeit abhängig und steigen mit dieser an. Da die erzielbaren Brechkraften in der Nähe des günstigsten Spaltes nicht allzu stark von der Spaltgröße abhängig sind, kann man

im Sättigungsgebiet die Spalte auch einfach nach der etwa in der Mitte liegenden, für 100 kV schnelle Elektronen gültigen Kennlinie dimensionieren. Bei der weitgehenden Unabhängigkeit des günstigen Spaltes von der Bohrung läßt sich aus der Kurve auch unmittelbar die günstige Spaltweite für Objektive mit verschiedenen großen Bohrungen entnehmen. Bild 11 gibt die Vergrößerungsweite einer gegebenen Bohrung ($d = 1$ mm) als Funktion der Elektronengeschwindigkeit für einige Spulendurchflutungen bei der

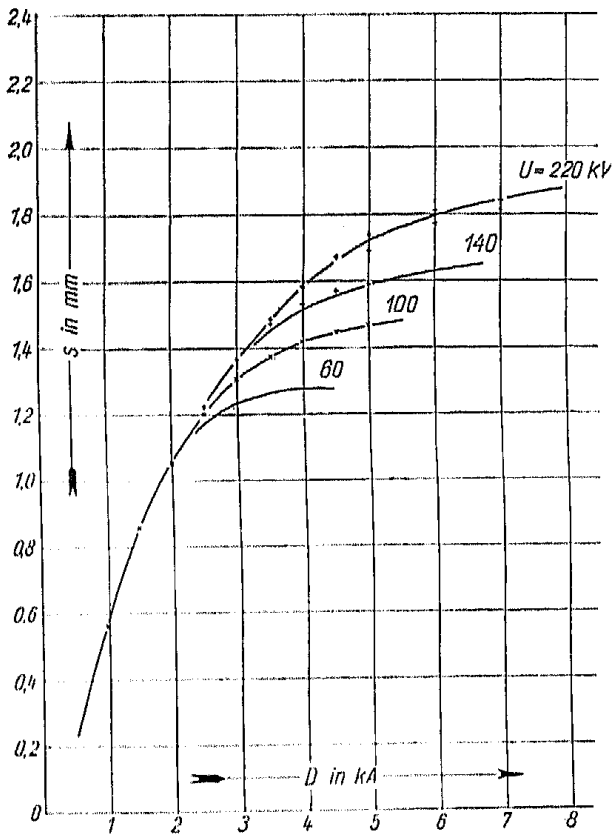


Bild 10.

Bild 10. Günstige Spaltweite als Funktion der Durchflutung.

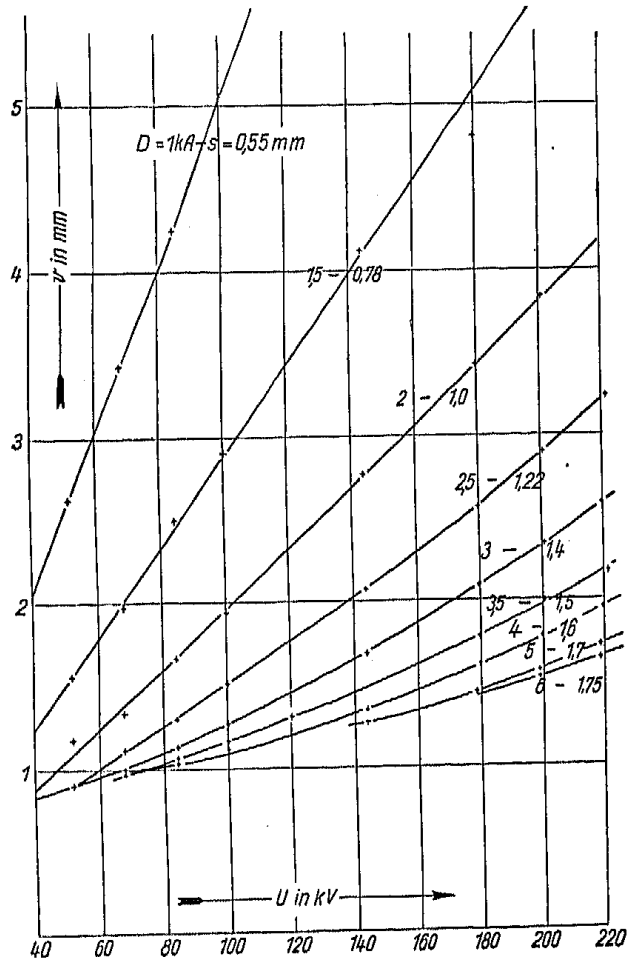


Bild 11.

Bild 11. Vergrößerungsweiten einer Polschuhbohrung ($d = 1$ mm) als Funktion der Elektronengeschwindigkeit für einige Spulendurchflutungen bei jeweils günstigen Spaltweiten.

jeweils zugehörigen günstigen Spaltweite, und endlich zeigt Bild 12 die Vergrößerungsweiten als Funktion der Bohrung bei gegebener Durchflutung ($D = 2$ kA) und der hierfür günstigen Spaltweite ($s = 1$ mm) für einige Elektronengeschwindigkeiten. Auch bei fester Durchflutung sinkt die Vergrößerungsweite durch Übergang zu kleineren Bohrungen nicht beliebig, sondern nähert sich praktisch schon bei 0,4 bis 0,6 mm Bohrung einer unteren Grenze. Aus Kennlinienblättern der hier wiedergegebenen Art, insbesondere aber aus den Bildern 8, 10 und 12, können unmittelbar für die untersuchte Legierung oder ein magnetisch gleichwertiges Material die richtigen Abmessungen von Projektiven entnommen werden, wenn man sich für eine bestimmte Elektronengeschwindigkeit und Spulendurchflutung entschieden hat und damit entweder bestimmte Vergrößerungsweiten erreichen oder mit bestimmten Bohrungen auskommen will. Aber auch für magnetische Materialien mit anderer Sättigung zeigen die Darstellungen mit ziemlicher Annäherung, welche Werte sich hierbei erreichen lassen.

Objektiventwicklung

Für symmetrisch aufgebaute Objektivsysteme können die Zusammenhänge zwischen den Systemabmessungen und den erreichbaren Brennweiten aus den vorstehend wiedergegebenen Ausführungen und Messungen über die Vergrößerungsweiten symmetrischer Systeme entnommen werden. Die minimalen Brennweiten, mit denen die reellen Objekte in symmetrisch ausgebildeten Objektivsystemen vergrößert werden, sind sogar noch etwas kleiner als die minimalen Vergrößerungsweiten. Die Verkleinerung beträgt bis zu etwa 17%, im allgemeinen wird man mit etwa 10% rechnen. Im folgenden sind unmittelbare Brennweitenmessungen von un-

symmetrischen Objektivsystemen behandelt. Durch die Käken-Objektschleuse des Siemens-Übermikroskops ist, wie schon in II erwähnt, eine un-

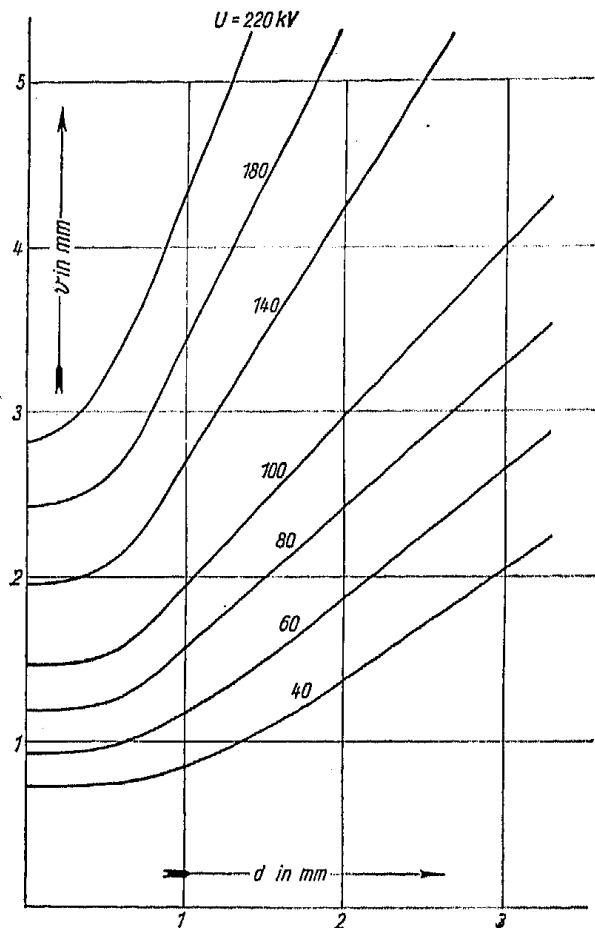


Bild 12.

Bild 12. Vergrößerungsweiten bei einer kleineren als optimalen Durchflutung ($D = 2 \text{ kA}$) als Funktion der Polschuhbohrung bei der hierfür günstigen Spaltweite ($s = 1 \text{ mm}$) für einige Elektronengeschwindigkeiten.

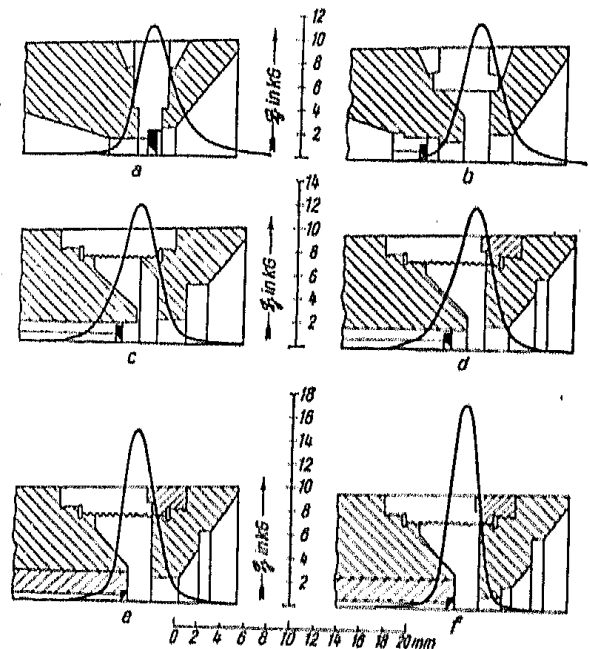


Bild 13.

Bild 13. Bei der Entwicklung erprobte Polschuh-Querschnitte von Objektivlinzen und ihre Feldkurven bei $D = 4 \text{ kA}$.

Spulenwicklung erforderlich. Aber auch in den Polschuhsystemen liegt aus diesem Grund der Spalt nicht in der Systemmitte. Daher ist auch der Querschnitt der beiden Polschuhe im Gegensatz zu den Projektivsystemen verschieden. Der objektseitige Polschuh hat eine flachere, der bildseitige Polschuh eine steilere Kegelform als Begrenzung gegenüber dem Spalt. Ferner sind die Bohrungen in beiden Polschuhen nicht wie bei den Projektiven gleich groß, sondern der objektseitige Polschuh besitzt eine größere, der Objektblendenfassung bzw. der Objektblende angepaßte Bohrung. Die Polschuhbohrung muß genügend weit sein, daß sie eine Querverschiebung des Objekts um den Betrag der Objektblendenbohrung zuläßt, um mittels des Kreuztisches das ganze Objekt absuchen zu können. Ferner soll die Bohrung möglichst auch so weit sein, daß ein Neigen der Objektblende um einige Grad gegen die optische Achse zur Herstellung von Stereoaufnahmen möglich ist. Als Objektblenden dienen beim Siemens-

Übermikroskop mit Rücksicht auf Materialersparnis (Gold-Platin), auf einfache Herstellbarkeit sowie auf eine noch bequeme Handhabung und Reinigung normalerweise Flachblenden von 3 mm Durchmesser. In besonderen Fällen werden auch Flachblenden von 2,4 und 2,0 mm Durchmesser sowie längere Blenden (Rüsselblenden) verwendet.

Bild 13a bis f zeigt einige Querschnittsformen von Objektivsystemen, wie sie im Lauf der Entwicklung ausgebildet wurden, mit ihren Feldkurven bei $D = 4 \text{ kA}$.

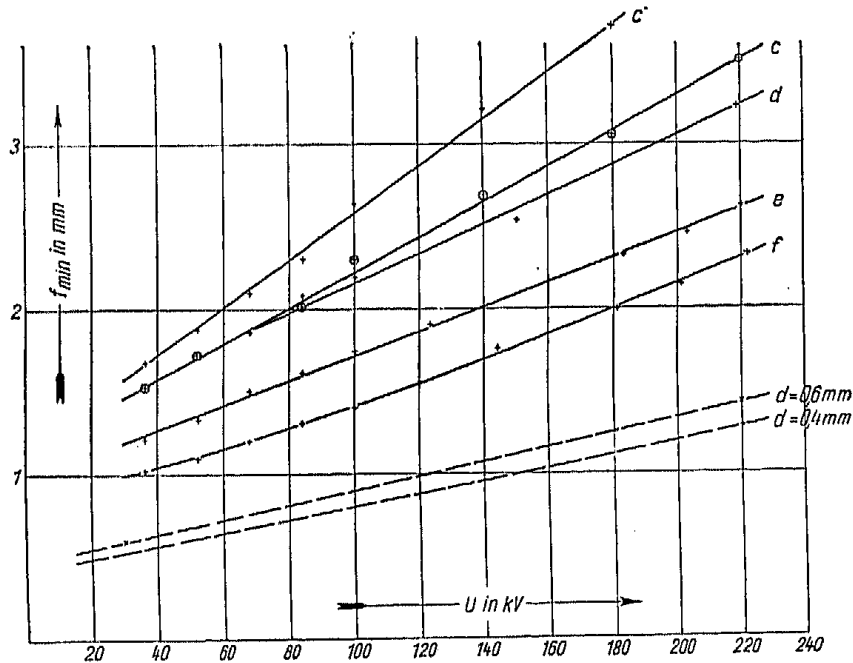


Bild 14. Minimalbrennweiten der verschiedenen Objektivsysteme von Bild 13.

Aus der von Polschuh zu Polschuh wachsenden maximalen Feldstärke läßt sich die fortschreitende Querschnittsverbesserung erkennen. Von den in Bild 13 gezeigten Polschuhformen gibt ferner Bild 14 die Minimalbrennweiten als Funktion der Elektronengeschwindigkeit und Bild 15 die Sättigungskurven wieder. Die Verbesserung der Bauart spiegelt sich, wie man sieht, auch im Steilerwerden der Sättigungskurven sowie in der immer tiefer sinkenden Kennlinie der Minimalbrennweite. In Bild 14 sind als vorläufige praktische untere Grenze die in symmetrischen Polschuhen mit Bohrungen von 0,6 und 0,4 mm erzielbaren minimalen Vergrößerungsweiten angegeben.

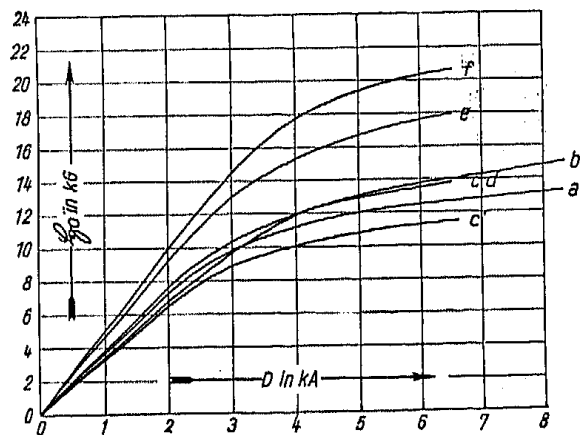


Bild 15. Sättigungskurven der verschiedenen Objektivsysteme von Bild 13.

Bei den ersten Polschuhsystemen (Bild 13a, b) wurden die Objektfassungen durch den Trieb in der Objektschleuse dem Polschuh nur mehr oder weniger genähert, ohne den Polschuh selbst zu berühren. Bei Verwendung sich kegelförmig verjüngender Blendenfassungen erhält man hierbei günstige glatt verlaufende objektseitige Begrenzungen des ersten Polschuhs. Später (Bild 13c, d, e, f) wurde eine inzwischen in etwas anderer Form durch v. Ardenne [12] erprobte Anordnung gewählt, bei der die Objektfassungen auf eine Rutschfläche des Polschuhs, die die Querverschiebung erlaubt, federnd aufgedrückt werden. Dies ist vorteilhaft, weil so auch die geringsten Erschütterungen des Objekts gegenüber dem Objektiv, die bei der Aufnahme zu verwackelten Bildern führen würden, wirksam unterbunden werden. Diese Anordnung

läßt allerdings keine veränderliche Objektivvergrößerung mehr zu und ist mit einer gewissen durch die Rutschfläche bedingten Querschnittsverringering im Polschuh verbunden.

Die Aperturblende lag in Übereinstimmung mit früher untersuchten Anordnungen [11] bei den ersten der hier untersuchten Polschuhsysteme (Bild 13a) in dem unmagnetischen Spaltzwischenstück und wurde durch die objektseitige Polschuhbohrung ausgewechselt. Bald erwies es sich aber als günstiger, die engste Blendenöffnung etwa in die bildseitige Brennebene zu verlegen (Bild 13b), um auch bei sehr kleinen Aperturblenden, wie sie zur Kontrasterhöhung und Öffnungsfehlerverringering notwendig sind, keine unerwünschte Begrenzung des Zwischenbildfeldes zu erhalten. Messungen der Begrenzung des Zwischenbildfeldes bei verschiedener axialer Lage der Aperturblende zeigten, daß der bildseitige Brennpunkt selbst bei der Minimalbrennweite schon außerhalb des Spalts in der Bohrung des bildseitigen Polschuhs liegt. Die Objektive wurde daher später mit einem unmagnetischen einschraubbaren Blendenträger versehen, der in der Bohrung des bildseitigen Polschuhs mit sehr geringer Toleranz geführt wird (Bild 13c, d). Bei dieser Konstruktion konnte die Bohrung des bildseitigen Polschuhs nicht kleiner als der Außendurchmesser der Aperturblende gemacht werden. Um noch Systeme mit kleinerer Brennweite erproben und durchmessen zu können, wurde bei einigen Objektiven der Blendenträger aus dem magnetischen Material des Polschuhs hergestellt und die Blende ebenfalls an dem spaltseitigen Ende dieses magnetischen Blendenträgers angeordnet (Bild 13e, f). Durch Verschrauben des Blendenträgers läßt sich bei diesem Polschuhsystem der magnetische Spalt zwischen den Polschuhenden variieren und durch Messung der Brennweiten bei verschieden eingestelltem Spalt die für eine gegebene Elektronengeschwindigkeit oder Spulendurchflutung günstigste Spaltweite ermitteln.

VII. Aufbau und Herstellung der Polschuhsysteme

Da der Beugungs- und der Öffnungsfehler, aus deren Überlagerung die erreichbare Auflösung resultiert, sich mit der Objektivapertur entgegengesetzt verändernd, gibt es eine günstigste Größe für diese Apertur, bei der die Auflösung optimal ist. Diese günstigste Objektivapertur beträgt nur etwa $5 \cdot 10^{-4}$. Bei kleineren Aperturen verschlechtert sich das Auflösungsvermögen infolge des Beugungsfehlers, bei größeren Aperturen verursacht selbst bei der Abbildung von Achsenpunkten in einem axial völlig einwandfrei zentrierten mikroskopischen System der Öffnungsfehler bereits wieder eine Verschlechterung der Auflösung. Je weiter die abgebildeten Objektpunkte außerhalb der Achse liegen, um so mehr verschlechtern auch noch die übrigen regulären Linsenfehler, Astigmatismus und Koma, die nach Rechnungen von Glaser und Lammel [5] (vgl. auch Dosse [6]) von gleicher Größenordnung wie der Öffnungsfehler sind, die Auflösung. Man muß also das abgebildete Objektfeld auf die unmittelbarste Nachbarschaft der Achse beschränken. Hierzu ist es notwendig, Objektiv und Projektiv genauesten coaxial zueinander auszurichten, was eine absolute Drehsymmetrie der Einzelsysteme voraussetzt. Selbst bei zum Projektiv völlig coaxialem Objektiv werden Objektpunkte, die am Rande der Projektivblende bzw. des Endbildes liegen, durch Strahlenbündel abgebildet, die gegenüber der Objektivachse den Winkel β (Apertur der Projektivblende gegenüber dem Objektiv) aufweisen. Ist die Objektivachse aber um einen kleinen Fehlwinkel γ zur Projektivachse geneigt, werden die Randpunkte des Endbildes mit Strahlenbündeln gezeichnet, die im ungünstigsten Fall um den Winkel $\beta + \gamma$ gegen die Objektivachse geneigt sind. Selbst bei höchster Vergrößerung in der Projektivstufe beträgt z. B. im Siemens-Übermikroskop $\beta = 5 \cdot 10^{-4}$, ist also schon ebenso groß wie die günstigste Objektivapertur, mit der jeder Objektpunkt, also auch ein Achsenpunkt, abgebildet wird. Ebenso kann der Winkel γ bei nicht sehr genauer Herstellung der Mikroskopteile

Werte dieser Größenordnung erreichen. Schließlich wird die Auflösung weiter verschlechtert, wenn das Linsenfeld, insbesondere des Objektivsystems, nicht mehr dreh-symmetrisch, sondern z. B. durch kleine Winkelabweichungen zwischen den Achsen der beiden Polschuhe deformiert ist. Der Aufbau der Polschuhe selbst, sowie die gegenseitige Zentrierung der beiden Vergrößerungssysteme im Mikroskop mußten daher immer mehr nach dem Gesichtspunkt genauester mechanischer Herstellbarkeit durchgebildet werden.

Zu Beginn der Entwicklungsarbeiten wurde eine frühere [11] Anordnung übernommen, bei der die Polschuhe einzeln in ein durchgehendes Gewinde des Polschuh-trägers geschraubt waren. Der Polschuhträger dient dazu, die Vakuumräume zu beiden Seiten der Linsenspulen miteinander zu verbinden, um das Auspumpen des ganzen Mikroskops durch die am Projektivtubus saugende Hochvakuum-pumpe zu ermöglichen. Er hat die Form eines Hohlzylinders mit mehreren am Umfang ver-teilten Längsbohrungen. Das Einsetzen der Polschuhe mittels Gewinde in den Pol-schuhträger hat für Versuchszwecke den Vorteil, daß der Polschuhabstand leicht variiert werden kann, ist aber für höhere Genauigkeitsansprüche wegen des Gewinde-spiels nicht besonders gut geeignet. Nach den ersten orientierenden Dimensionierungs-versuchen wurden daher überwiegend feste Einheiten, bestehend aus den beiden Pol-schuhen und einem unmagnetischen Zwischenstück gebaut, die einen sehr schlanken Konus als äußere Paßfläche zum Einbau in den Polschuhträger erhielten. Der Pol-schuhträger selbst besitzt innen eine konische Paßfläche zur Aufnahme des Polschuh-systems und eine dazu genau konzentrische äußere konische Paßfläche zum Einsetzen in die Spulenkapselfung.

Die Verbindung der beiden Polschuhe mit dem gemeinsamen Zwischenstück aus Messing zum „Polschuhsystem“ erfolgte zunächst durch Weichlötung (Bild 13a, b), wobei die Zentrierung durch axial kurze Zentrierbunde erfolgte. Bei dieser Verbindung kann man besonders gut die erforderliche Rücksicht auf eine günstige Ausbildung der Eisenquerschnitte in den Polschuhen nehmen. Die Temperaturen der Weichlötung gefährden noch nicht die durch die thermische Behandlung der Polschuhe erreichten günstigen magnetischen Eigenschaften (hohe Sättigung, gute Homogenität). Die Weichlötungen erwiesen sich jedoch als zu empfindlich gegen Stöße und zeigten ein gewisses Arbeiten des Lots, so daß keine genügend genaue mechanische Stabilität gewährleistet war. Der Verbindungsring zwischen beiden Polschuhen wurde daher später (Bild 13c, d, e, f) auf jeder Seite mit einem Feingewinde und einer sehr genau gearbeiteten zylindrischen Paßfläche von 1 bis 2 mm axialer Länge versehen und mit den entsprechend ausgebildeten Polschuhen verschraubt. Die äußere konische Paß-fläche wurde erst an dem verschraubten System auf Fertigmaß bearbeitet, ebenso wurde für genauesten Lauf der inneren Polschuhbohrungen gesorgt. Die Gleich-achsigkeit der Polschuhbohrungen zum äußeren Paßkonus wurde bei allen Stücken auf dem großen Werkstattmikroskop von Carl Zeiß, Jena geprüft. Der Schlag (die doppelte Exzentrizität) der Polschuhbohrungen gegeneinander und gegenüber der konischen Paßfläche des Einsatzes betrug meist weniger als 8μ . Bei der zuletzt beschriebenen Fertigungsart wird der Querschnitt der Polschuhe quer zur Kraftlinienrichtung im Eisen durch die Paßverschraubung in unerwünschter Weise geschwächt, so daß unter sonst gleichen Umständen keine ganz so kurzen Brennweiten mehr erzielt wurden als bei den weichgelöteten Systemen. Hier wurde dadurch Abhilfe geschaffen, daß die Zwischenringe selbst aus einem unmagnetischen und einem oder zwei magnetischen Teilen hart verlötet wurden (Bild 13d, e, f). In die magnetischen Teile wurden die Gewinde und die Paßfläche verlegt, so daß jetzt relativ glatt verlaufende Begrenzungslinien der Eisenquerschnitte erzielt werden. Durch die Hartlötung kann die Wärme-behandlung der magnetischen Teile des Zwischenrings unter Umständen rückgängig gemacht werden; immerhin liegen diese Eisenquerschnitte von der Achse schon ent-fernter, und es werden die Polschuhe selbst nicht mehr von dem Temperaturgang

der Hartlötung betroffen. Diese Herstellungsart hatte besonders bei größeren Elektronengeschwindigkeiten (höheren Durchflutungen) eine Verkürzung der Minimalbrennweiten zum Ergebnis. Der verbesserte Eisenquerschnitt liegt schon etwas weiter

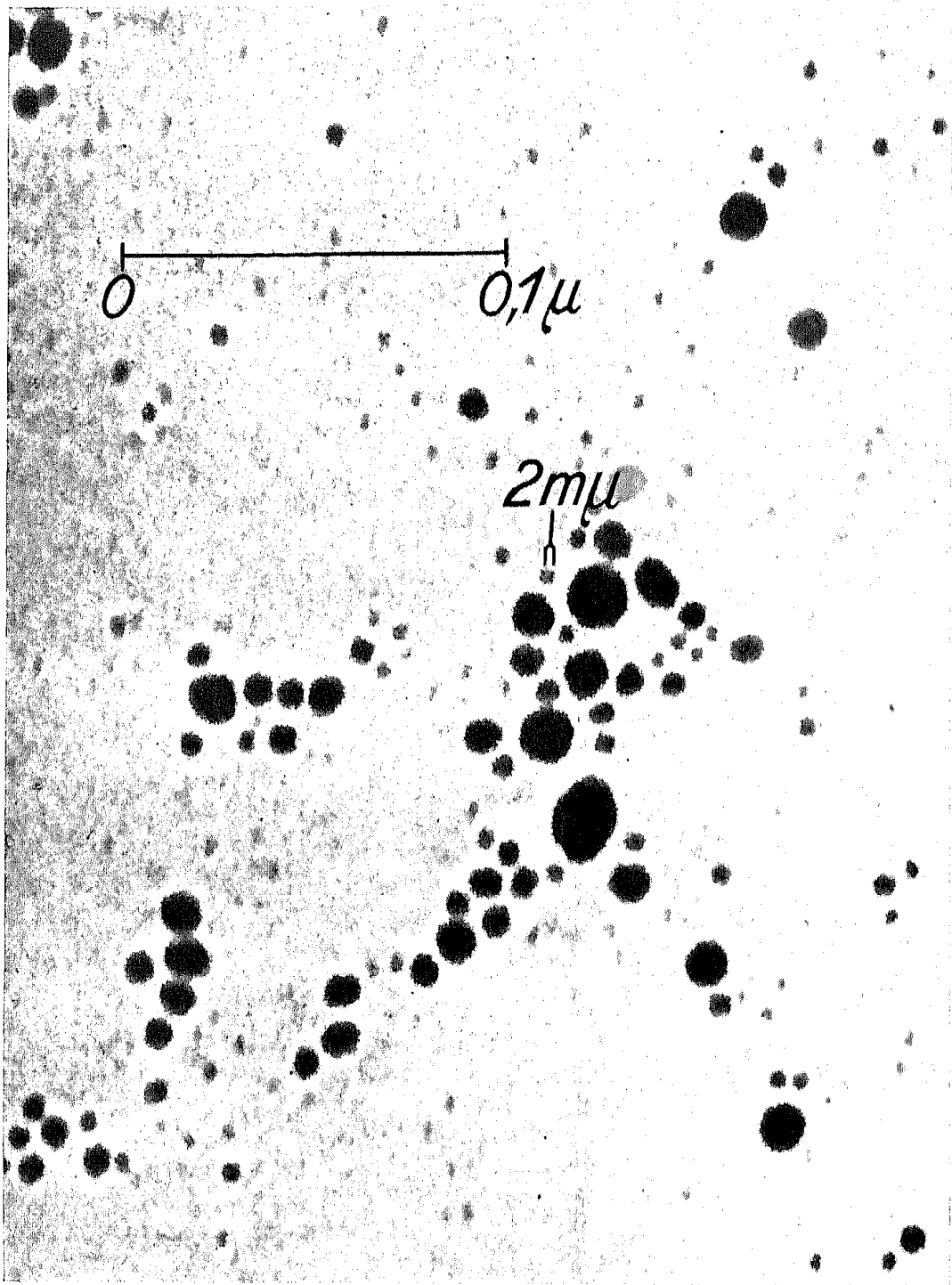


Bild 16. Hochauflösende Aufnahme von kolloidem Silber mit serienmäßigem Siemens-Übermikroskop. Elektronenoptischer Abbildungsmaßstab 44000 : 1; Wiedergabe 500000 : 1. Elektronengeschwindigkeit 75 kV; Auflösung 2 m μ , Agfaplatte Spektral blau rapid, A Nr. 5579/43.

von der Polschuhbohrung entfernt und ist größer, so daß sich die Brennweitenverkürzung erst bei größeren magnetischen Flüssen bemerkbar macht. Bild 16 zeigt an einem elektronenoptisch im Maßstab 44000 : 1 aufgenommenen Präparat von kolloidem Silber bei einer Elektronengeschwindigkeit von 75 kV die mit dem entwickelten

Objektiven und Projektiven im Siemens-Übermikroskop bisher erzielbaren Auflösungen und Vergrößerungen.

VII. Vergleich mit früheren experimentellen und theoretischen Ergebnissen

In Bild 17 sind aus in der Bildunterschrift aufgeführten älteren Arbeiten [1] bis [11] bekannt gewordene Werte von Brennweiten (O) und Vergrößerungsweiten (P) zusammen mit den entsprechenden Werten der besten im Lauf der vorliegenden Arbeit [12] entwickelten Polschuhsysteme zusammengestellt. Es ist daraus ersichtlich,

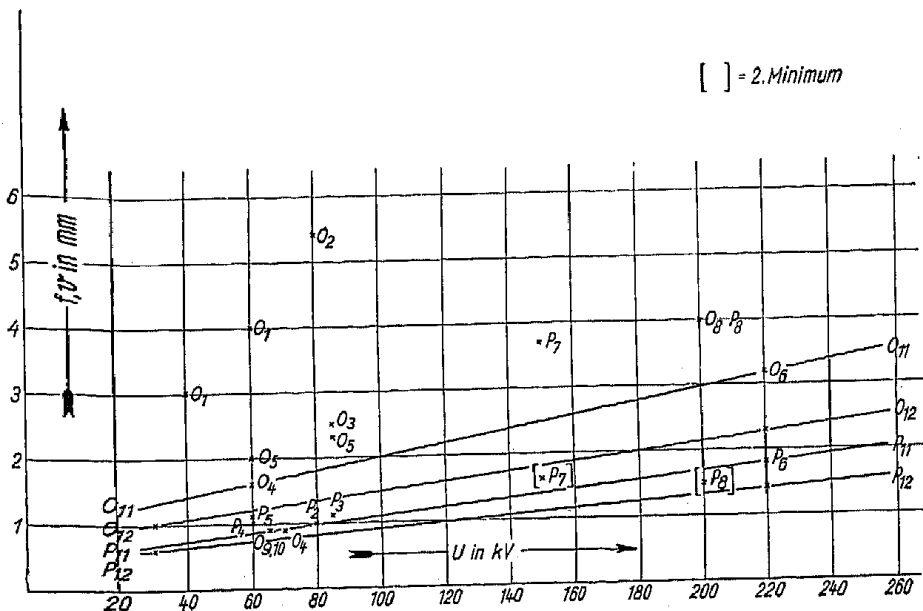


Bild 17. Zusammenstellung der in der Literatur im Verlauf des ersten Jahrzehnts der Entwicklung magnetischer Polschuhlinsen (1933 bis 1943) veröffentlichten Angaben über Brennweiten und Vergrößerungsweiten:

1. E. Ruska, Über ein magnetisches Objektiv für das Elektronenmikroskop. Z. Phys. 89 (1934) S. 90 bis 128. — 2. B. v. Borries u. E. Ruska, Vorläufige Mitteilung über Fortschritte im Bau und in der Leistung des Übermikroskopes. Wiss. Veröff. Siemens-Werk 17 (1938) S. 99 bis 106. — 3. B. v. Borries u. E. Ruska, Aufbau und Leistung des Siemens-Übermikroskopes. Z. wiss. Mikrosk. u. mikr. Techn. 56 (1939) S. 317 bis 333. — 4. M. v. Ardenne, Über ein Universal-Elektronenmikroskop für Hellfeld-, Dunkelfeld- und Stereobildbetrieb. Z. Phys. 115 (1940) S. 339 bis 368. — 5. B. v. Borries u. E. Ruska, Die Technik des Siemens-Übermikroskops. Siemens-Z. 20 (1940) S. 217 bis 227. — 6. H. O. Müller u. E. Ruska, Ein Übermikroskop für 220 kV Strahlspannung. Kolloid-Z. 95 (1941) S. 21 bis 25. — 7. M. v. Ardenne, Zur Prüfung von kurzbrennweitigen Elektronenlinsen. Z. Phys. 117 (1941) S. 602 bis 611. — 8. M. v. Ardenne, Über ein 200 kV-Universal-Elektronenmikroskop mit Objektabschattungsvorrichtung. Z. Phys. 117 (1941) S. 657 bis 688. — 9. M. v. Ardenne, Ergänzung zu den Arbeiten „Zur Prüfung von kurzbrennweitigen Elektronenlinsen“ und „Über ein 200 kV-Universal-Elektronenmikroskop mit Objektabschattungsvorrichtung“. Z. Phys. 118 (1941) S. 384 bis 388. — 10. M. v. Ardenne, Weitere Entwicklungsarbeiten am Universal-Elektronenmikroskop. Phys. Z. 43 (1942) S. 11 bis 15. — 11. E. Ruska, Über die Linsen hochauflösender Elektronenmikroskope. Arch. Elektrotechn. 36 (1942) S. 431 bis 454.

in welchem Maße in den 10 Jahren seit den ersten systematischen Untersuchungen des Verfassers über Polschuhlinsen [1] die Linsen verbessert werden konnten. So wurden die Brenn- und Vergrößerungsweiten im Bereich der ursprünglich angewandten Elektronengeschwindigkeit von 40 bis 70 kV auf etwa $\frac{1}{4}$ heruntergedrückt. Die Geschwindigkeit der zur Durchstrahlungsmikroskopie benutzten Elektronen stieg von 70 auf über 220 kV. Dabei betragen zur Zeit die Brennweitenwerte bei 220 kV nur noch etwa die Hälfte der vor 10 Jahren für nur 40 kV erreichten Werte. Die Spulendurchflutungen, die für die sehr kleinen heute erreichten Brennweiten benötigt werden, sind bei gleichen Elektronengeschwindigkeiten gegenüber den 1933 erhaltenen Werten

nicht angestiegen. Die erreichte Brennweitenverkürzung ist daher der besseren Dimensionierung des Eisenkreises, insbesondere der Polschuhsysteme zuzuschreiben, zum Teil auch dem Übergang auf eine Eisenlegierung von höherer Sättigung.

Die in der vorliegenden Arbeit erreichten minimalen Vergrößerungsweiten (Bild 17, P_{12}) zeigen einen Verlauf mit der Elektronengeschwindigkeit, der ziemlich genau den von Sugata [25] berechneten Minimalbrennweiten entspricht, die mit dem besten derzeitigen magnetischen Material zu verwirklichen seien.

Die Abhängigkeit der minimalen Brennweite bzw. Vergrößerungsweite von der Elektronengeschwindigkeit läßt sich nach den bisher vorliegenden genaueren Messungen für ein bestimmtes Polschuhsystem am besten durch

$$f_{\min} = C_1 + C_2 U \quad (7)$$

annähern. Die Konstanten C_1 und C_2 sind von der Halbwertsbreite der Felder, d. h. von der Polschuhform, abhängig. Für größere Halbwertsbreiten der Linsfelder (größere Polschuhbohrungen und Spalte) wird f_{\min} in steigendem Maß von U unabhängig.

Von anderer Seite wird angegeben [21], [13], [22], daß $f_{\min} = CU$ verlaufe. Die Meßkurve, aus der dieser Verlauf hervorgeht (z. B. Bild 11 der Arb. [21]) scheint auf ungenauen Einzelmessungen zu beruhen (vgl. hierzu Bild 9, 12, 13 und 16 dieser Arbeit) oder einfach bei sehr wenigen Meßpunkten durch den Koordinatenursprung gezogen zu sein. v. Ardenne belegt diese Ansicht vom Verlauf der Minimalbrennweite proportional zur Elektronengeschwindigkeit unter anderem damit, daß er bei 65 kV eine Brennweite von 0,9 mm, bei 195 kV kaum eine solche von unter 3 mm erreicht habe [22]. Bei seiner vor der eben zitierten Arbeit erschienenen Beschreibung eines 200 kV-Mikroskops [13] findet sich die Angabe, daß ein Objektiv für 2,6 mm zur Verfügung stehe. Da es sich bei diesen Angaben scheinbar in jedem Fall um ein anderes Polschuhliniensystem handelt, kann aus den angegebenen Daten ebenfalls kein Schluß auf die Proportionalität der Minimalbrennweite des gleichen Systems mit der Elektronengeschwindigkeit gezogen werden. Die Ansicht des gleichen Autors von der merklichen Verschlechterung des Auflösungsvermögens mit steigender Elektronengeschwindigkeit [13] läßt sich, von anderen Gründen abgesehen, wegen der unrichtig angenommenen Abhängigkeit der Minimalbrennweite von der Strahlspannung nicht aufrecht erhalten [23].

Wie die Feldbilder von Objektiven (Bild 13) zeigen, ist bei der hier referierten Entwicklung von Polschuhlinzen die Dimensionierung der Spulenkapselung und der Polschuhsysteme durchweg so getroffen worden, daß sog. „Vor- oder Nachlinsen“, deren Auftreten und nachträgliche Kompensation durch Hilfsspulen v. Ardenne beschrieben hat [13], [22], sich von vornherein nicht ausbilden. Daher konnten besonders kleine Brennweiten bei höheren Elektronengeschwindigkeiten, d. h. höheren Durchflutungen, erreicht werden. Mit derartigen bzw. mit ähnlich dimensionierten Systemen lassen sich selbst für Elektronengeschwindigkeiten von 10^6 V noch Brennweiten unter 10 mm erreichen, so daß man bei nur dreistufiger Abbildung mit noch bequemer Abbildungslänge des Mikroskops sehr hohe Vergrößerungen erreichen kann. Zweistufige Mikroskope geringerer Strahlspannung (40 bis 60 kV) können besonders kurz gebaut werden. Die Spulendurchflutungen und Leistungen sind im ersten Fall noch bequem aufzubringen (10 bis 12 kA), im zweiten Fall aber besonders niedrig (~ 2 kA), so daß auch bequem magnetostatisch und damit ohne Leistung in den Linsen gearbeitet werden kann.

Schon zu Anfang der Entwicklung von Polschuhlinzen wurde darauf hingewiesen [11], daß sich bei Steigerung der Spulendurchflutung über den zur Erzielung der ersten scharfen Objektabbildung notwendigen Wert eine zweite, meist stärker vergrößerte Abbildung ergibt, bei der schon im Spulenfeld ein reelles Zwischenbild liegt. Da die Schärfe dieser mit hohem Stromaufwand hergestellten Bilder (wie sich

inzwischen gezeigt hat wegen der Kondensatorwirkung des vor dem Objekt liegenden Feldanteils) nicht gut war, wurden sie damals nicht weiter betrachtet. Das Auftreten solcher zweiter Bilder wurde neuerdings durch v. Ardenne bemerkt [21] und beim Projektiv als praktischer Fortschritt bewertet. Für ein Projektiv gibt v. Ardenne [21] an, daß im zweiten Minimum der für 150 kV bisher nicht realisierbare Wert von 1,6 mm erreicht worden sei. Aus der zugehörigen Figur folgt die entsprechende Durchflutung zu etwa 7 kA. Mit den seit 1939 serienmäßig zu den Siemens-Übermikroskopen gelieferten Projektiven wird dagegen bei 150 kV bei nur 5 kA eine erste Vergrößerungsweite von 1,4 mm, mit neueren Projektiven bei der gleichen Durchflutung eine solche von 1,2 mm erreicht. Die vorliegenden Untersuchungen haben gezeigt, daß man bei der normalen Abbildung (ohne Zwischenbild im Feld) erstens eine vorgegebene Brennweite mit kleineren Durchflutungen und zweitens bei genügend steilem Feld überhaupt kleinere Brennweiten erreichen kann. Das wird aus der einfachen Überlegung verständlich, daß bei der einstufigen Abbildung durch das Linsenfeld die geringste Strahlenkrümmung bewirkt werden muß. Die gleiche Überlegung spricht auch für die schon früh [11] beobachtete bessere Bildgüte solcher Aufnahmen, da die größte Strahlneigung gegen die Achse hier kleiner ist als bei einer zweistufigen Aufnahme, bei der schon im Feld ein Zwischenbild liegt.

Das in vorliegender Arbeit benutzte Meßverfahren zur Bestimmung der Brennweite von Objektiven erfordert die Scharfstellung auf reelle Objekte in verschiedener Entfernung vom Objektiv und wurde vom Verfasser schon bei den ersten Brennweitenbestimmungen von Polschuhobjektiven benutzt [11]. Inzwischen hat v. Ardenne [21] als eine besonders einfache Methode empfohlen, die Minimalbrennweite kurzbrennweitiger Elektronenlinsen aus einer einzigen, ohne Schärfeneinstellung durchgeführten Elektronenaufnahme zu bestimmen. Dieses Verfahren ist zwar mit einem geringeren Arbeitsaufwand verbunden, liefert dafür aber, wie Dosse [23] gezeigt hat, nicht die gesuchten Minimalbrennweiten sondern den Kehrwert der maximalen Vergrößerung, den wir in der vorliegenden Arbeit als minimale Vergrößerungsweite bezeichneten und der größer ist als die gesuchte minimale Brennweite.

Die in den Polschuhlinsen sich ausbildenden Magnetfelder weisen auf der optischen Achse eine glockenförmige Feldverteilung auf, die nach Glaser [4] in allgemeiner Form durch

$$\mathfrak{H}(z) = \frac{\mathfrak{H}_0}{[1 + (z/a)^2]^\mu} \quad (8a)$$

mit der Halbwertsbreite

$$h = a \sqrt{\sqrt{2} - 1} \quad (8b)$$

dargestellt werden kann. Für das Feld des linearen Kreisleiters ist z. B. $\mu = 3/2$. Die Feldverteilung mit $\mu = 1$ und damit $h = a$

$$\mathfrak{H}(z) = \frac{\mathfrak{H}_0}{1 + (z/h)^2} \quad (9)$$

eignet sich besonders für die rechnerische Behandlung. So konnte Glaser [4] die Brechkraft sowie den Farb- und Öffnungsfehler und Glaser und Lammel [5] die sämtlichen übrigen Linsenfehler dieser Feldverteilung streng berechnen. Dosse zeigte mittels ballistischer Ausmessung der Felder von Polschuhlinsen [20], daß die Gl. (9) dem tatsächlichen Feldverlauf im Sättigungsgebiet, in dem die Linsen nach früheren Messungen des Verfassers überwiegend betrieben werden [11], mit sehr großer Annäherung entspricht [6]. Je weniger die Linse im Sättigungsgebiet betrieben wird, je steiler also die Feldverteilung ist, um so mehr muß der in Gl. (8a u. b) einzusetzende Exponent μ gegenüber 1 vergrößert werden, wenn eine gute Annäherung der Ersatzfunktion an den wirklichen Feldverlauf erzielt werden soll.

Für symmetrische Felder im Sättigungsgebiet gilt also (9), wobei h die Halbwertsbreite* der Funktion darstellt. Unsymmetrische Felder lassen sich durch zwei aneinandergesetzte Kurvenhälften mit derselben maximalen Feldstärke \mathfrak{S}_0 , jedoch mit der dingseitigen Halbwertsbreite h_1 und der bildseitigen Halbwertsbreite h annähern.

$$q = h_1/h \quad (10)$$

gibt dabei den Unsymmetriegrad an. Für die Brennweiten symmetrischer Felder nach (9) ergibt sich nach Glaser [4] die Formel

$$\frac{f}{h} = \frac{1}{\sin \frac{\pi}{\sqrt{1+k^2}}}, \quad (11)$$

wobei

$$k^2 = \frac{e}{8mU} \frac{\mathfrak{S}_0^2 h^2}{(1+U/1000)} = 0,22 \cdot \frac{\mathfrak{S}_0^2 [kG] h^2 [mm]}{U [1+U/1000] [kV]} \quad (12)$$

den für die Brechkraft der Linse maßgeblichen Parameter darstellt. Der Faktor $(1+U/1000)$ berücksichtigt die bei höheren Elektronengeschwindigkeiten nicht mehr vernachlässigbare relativistische Massenänderung. Für unsymmetrische Felder ergeben sich nach einer von Dosse [24] durchgeführten numerischen Auswertung der von Glaser [4] aufgestellten Formeln die in Bild 18 zusammen mit der Gl. (11) für symmetrisches Feld aufgetragenen Kurven für f/h . Die minimale Brennweite ist für das symmetrische (unsymmetrische) Feld gleich der Halbwertsbreite (bildseitigen Halbwertsbreite) also $f_{\min} = h$ und tritt unabhängig vom Unsymmetriegrad bei $k^2 = 3$ auf. Der zur Minimalbrennweite gehörige Objektort liegt unabhängig vom Unsymmetriegrad im Feldmaximum. Nach bisher unveröffentlichten Rechnungen von Glaser¹⁾ ergibt sich die Vergrößerungsweite für symmetrische Felder zu

$$\frac{v}{h} = \frac{\sqrt{1+k^2}}{\sin \pi \sqrt{1+k^2}} \quad (13)$$

für unsymmetrische Felder zu

$$v:h = 1: \left[\frac{\sin \frac{\pi}{2} \sqrt{1+k^2} q^2 \cos \frac{\pi}{2} \sqrt{1+k^2}}{\sqrt{1+k^2} q^2} + \frac{\cos \frac{\pi}{2} \sqrt{1+k^2} q^2 \sin \frac{\pi}{2} \sqrt{1+k^2}}{q \sqrt{1+k^2}} \right], \quad (14)$$

wobei in Gl. (12) für k^2 die bildseitige Halbwertsbreite h einzusetzen ist. Bei symmetrischen Feldern findet sich

$$v_{\min} = 1,45 h \quad \text{bei} \quad k^2 = 1,0457.$$

Bei unsymmetrischen Feldern ist der Wert von v_{\min} und die zugehörige Größe von k^2 vom Unsymmetriegrad q abhängig. Bild 18 gibt den Verlauf der Brennweiten nach Gl. (11), Bild 19 den der Vergrößerungsweiten nach Gl. (13) und (14) wieder.

Die gemessenen Brenn- und Vergrößerungsweiten sollen im folgenden mit den aus der angepaßten Feldkurve (9) berechneten Werten verglichen werden. Hierzu werden für verschiedene Objektiv- und Projektivsysteme bei jeweils einer Durchflutung, für die aus einer Feldmessung \mathfrak{S}_0 und h bekannt war, die bei verschiedenen Elektronengeschwindigkeiten gemessenen Brenn- und Vergrößerungsweiten auf die Halbwertsbreite bezogen und über dem gemäß (12) aus den Messungen berechneten Werten von k^2 aufgetragen (Bild 20 und 21).

Da einerseits nach Bild 18 die Kurven für f/h bei steigendem Unsymmetriegrad nur langsam von der Kurve für das symmetrische Feld abweichen und andererseits

¹⁾ Für die Durchführung dieser Rechnungen sowie für wertvolle Diskussionen bin ich Herrn Prof. W. Glaser zu Dank verpflichtet.

der Unsymmetriegrad der Felder merklich geringer ist, als man aus dem Unterschied der beiden Polschuhbohrungen erwarten könnte, genügt es, falls es nicht auf sehr hohe Genauigkeit ankommt, die Meßwerte f/h unsymmetrischer Objektive mit der theoretischen Kurve für das symmetrische Feld der gemessenen bildseitigen Halbwertsbreite h zu vergleichen und bei der Bestimmung von k^2 aus (12) ebenfalls die bildseitige Halbwertsbreite einzusetzen. Der so durchgeführte Vergleich mit den in den Bildern

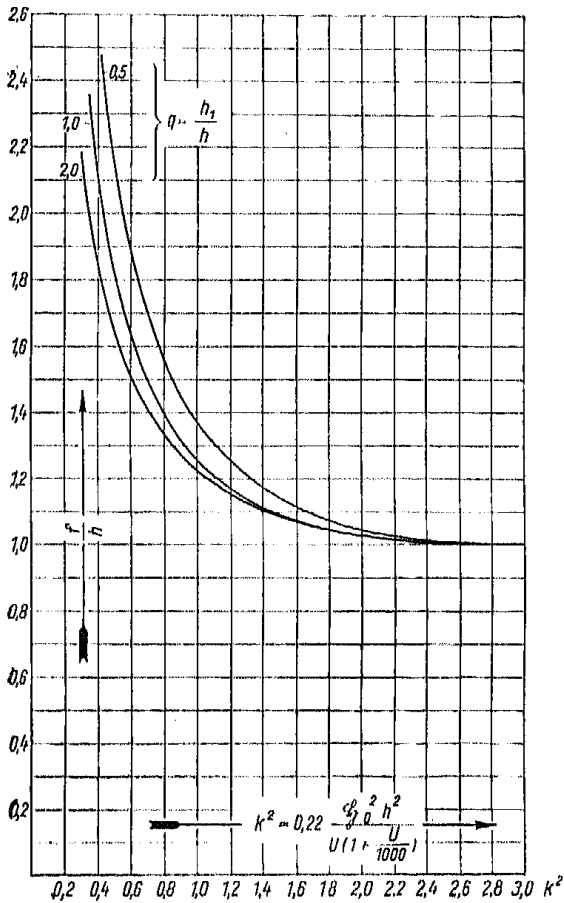


Bild 18.

Bild 18. Auf die bildseitige Halbwertsbreite h bezogene Brennweite f des Feldes $\mathfrak{S}(z) = \frac{\mathfrak{S}_0}{1 + (h/z)^2}$ bei verschiedenem Unsymmetriegrad $q = h_1/h$.

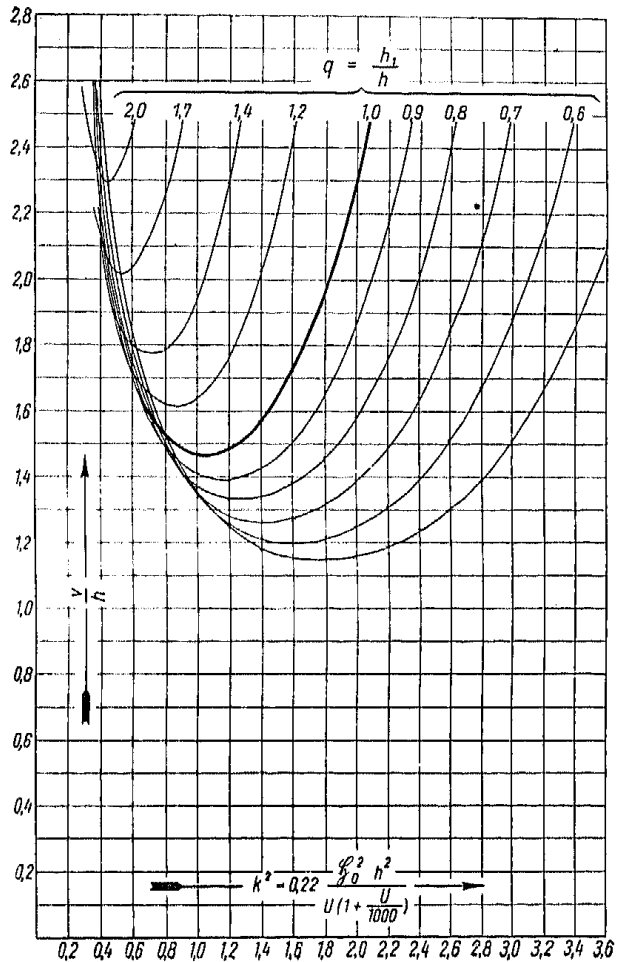


Bild 19.

Bild 19. Auf die bildseitige Halbwertsbreite h bezogene Vergrößerungweite v des Feldes $\mathfrak{S}(z) = \frac{\mathfrak{S}_0}{1 + (z/h)^2}$ bei verschiedenem Unsymmetriegrad $q = h_1/h$.

18 und 19 wiedergegebenen Kennlinien (11), (13) und (14) des Feldes nach Gl. (9) zeigt, daß in den entwickelten Polschuhobjektiven (auch unter Berücksichtigung des Unsymmetriegrades) mindestens bis zu 4 kA Durchflutung, in den Projektiven sogar bis zu 6 kA Durchflutung die erreichten Brechkräfte insbesondere in der Nähe der günstigsten k^2 -Werte größer sind (Bild 20). Dies bedeutet, daß die gemessenen Feldkurven noch merklich steiler sind als die den Rechnungen zugrunde liegenden angepaßten Feldverteilungen nach Gl. (9). Bei der Feldmessung eines älteren Objektives fand Dosse [6] bei 4,8 kA eine sehr weitgehende Übereinstimmung mit Gl. (9).

Zwischen k^2 und der Durchflutung D besteht bei konstanter Feldform Proportionalität: Für das Feld gemäß Gl. (9) gilt

$$\mathfrak{S}_0 \text{ [kG]} \cdot h \text{ [mm]} = 4 D \text{ [kA]} \quad (15)$$

und

$$k^2 = 3,52 \frac{D^2}{U(1 + U/1000)} \tag{16}$$

Für die ausgemessenen steileren Felder fanden wir Werte

$$\delta_0 h = (4,4 \text{ bis } 5,8) D \tag{17}$$

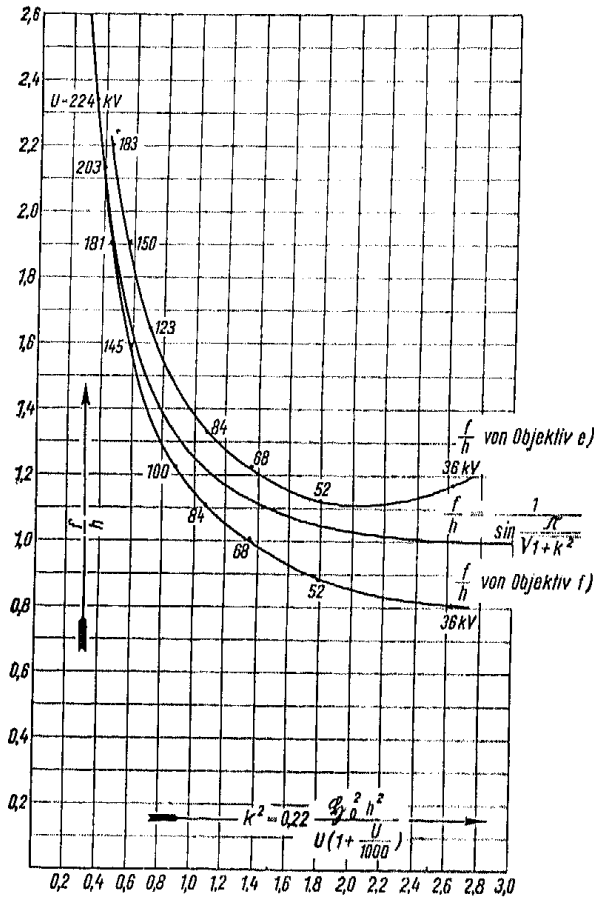


Bild 20.

Bild 20. Vergleich der bezogenen Brennweiten der unsymmetrischen Objektive e und f von Bild 13 bei $D = 4 \text{ kA}$ mit $f/h = \frac{1}{\sin \frac{\pi}{\sqrt{1+k^2}}}$ des symmetrischen Feldes $\delta_0(z) = \frac{\delta_0}{1 + (z/h)^2}$

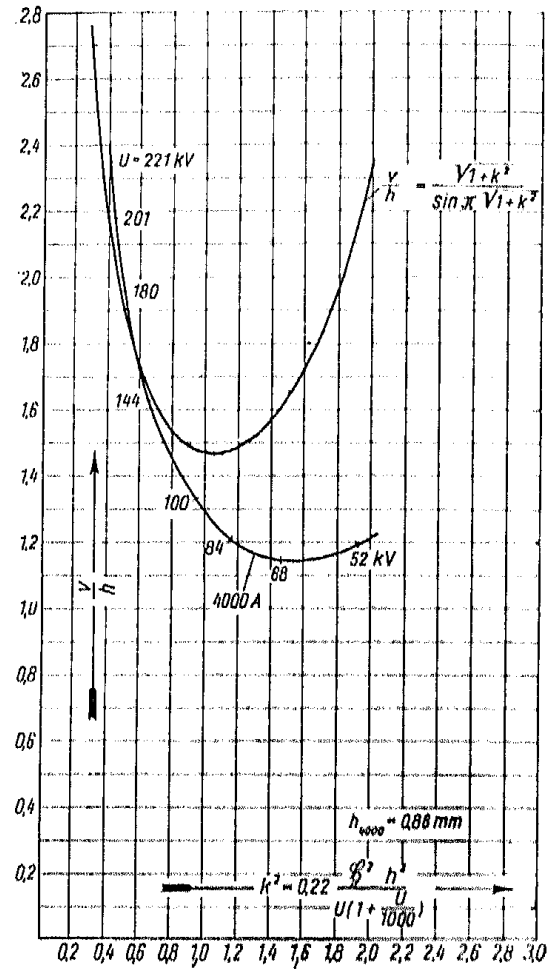


Bild 21.

Bild 21. Vergleich der bezogenen Vergrößerungsweiten eines symmetrischen Projektivs ($d = 1 \text{ mm}$, $s = 1,25 \text{ mm}$) bei $D = 4 \text{ kA}$ mit $\frac{v}{h} = \frac{\sqrt{1+k^2}}{\sin \pi \sqrt{1+k^2}}$ des symmetrischen Feldes $\delta_2 = \frac{\delta_0}{1 + (z/h)^2}$.

und entsprechend größere Werte von k^2 . Für die steilste mögliche Feldverteilung (Rechteck) aber auch für ein linear an- und absteigendes Feld (Dreieck) wird $\delta_0 h = 2 \pi D$.

Wären die tatsächlichen Linsenfelder von der Form der Gl. (9), so müßte die günstigste Durchflutung für eine gegebene Elektronengeschwindigkeit bei Objektiv und Projektiv entsprechend $k^2 = 3$ und $k^2 = 1,05$ im Verhältnis $\sqrt{\frac{3}{1,05}} = 1,7$ verschieden

groß sein. Tatsächlich ergeben sich aber, wenn man in beiden Abbildungsstufen die höchste Vergrößerung einstellt, in den beiden Linzen praktisch dieselben Durchflutungen. Dieser Befund klärt sich ebenfalls aus den in Bild 20 und 21 eingezeichneten Kennlinien gemessener Polschuhsysteme. Die kleinsten Brennweiten erhält man im Experiment schon bei kleinerem k^2 als dem für das Feld (9) günstigsten $k^2 = 3$. Die kleinsten Vergrößerungsweiten liegen nach den Versuchen bei größerem k^2 als dem für das Feld (9) günstigsten $k^2 = 1,05$. Von diesen Verhältnissen kann man mit Vorteil Gebrauch machen, um bei der Bildeinstellung die Bilddrehung zu vermeiden. Da der Winkel der Bilddrehung der Durchflutung proportional ist, schaltet man die Wicklungen von Objektiv und Projektiv hintereinander, und zwar magnetisch gegeneinander, und regelt sie gemeinsam. Diese Maßnahme läßt sich wegen der Gleichheit der Durchflutung für maximale Vergrößerung praktisch ohne Vergrößerungsbeschränkung durchführen.

Zusammenfassung

Für die Vergrößerung eines Mikroskops ist die Brennweite der Linzen, die Zahl der Abbildungsstufen und die Gerätelänge wesentlich. Die in einem Mikroskop erzielbare Vergrößerung sollte wenigstens annähernd die durch das Auflösungsvermögen des Mikroskops bestimmte förderliche Vergrößerung erreichen. Hochauflösende Elektronenmikroskope verlangen daher in einem großen Bereich der Elektronengeschwindigkeit Linzen kleinster Brennweite. Sowohl aus diesem Grunde wie wegen der größeren Fehlerkonstanten elektrischer Linzen kommen für Elektronenmikroskope von höchstem Auflösungsvermögen bisher nur magnetische Linzen in Frage, die als Polschuhlinzen in verschiedener Weise aufgebaut sein können.

Es werden Meßreihen über die Abhängigkeit der Brechkraft von magnetischen Polschuhlinzen von der geometrischen Form der Polschuhsysteme und der Elektronengeschwindigkeit sowie der Spulendurchflutung wiedergegeben und zusammenfassend ausgewertet. An Hand dieser Schaubilder ist jetzt eine Dimensionierung von Objektiven und Projektiven (Geometrie, Spulendurchflutung) je nach den beim Mikroskopbau vorliegenden Bedingungen (Elektronengeschwindigkeit, Gerätelänge, Vergrößerung) möglich. Es werden einige Erfahrungen über den mechanischen Aufbau solcher Systeme mitgeteilt. Einige Angaben in neueren Arbeiten und daraus gezogene Schlüsse, die zum Teil mit früheren experimentellen Ergebnissen des Verfassers in Widerspruch stehen, werden als nicht haltbar nachgewiesen; ebenso erscheinen einige für besonders gut angesehene neuere Anordnungen oder Meßverfahren als wenig geeignet bzw. als fehlerhaft. Der Vergleich der experimentellen Werte mit den für das Feld $S_{(z)} = \frac{S_0}{1 + (z/h)^2}$ von Glaser berechneten Daten zeigt gute qualitative und quantitative Übereinstimmung. Die praktisch erreichbaren Werte liegen merklich günstiger als die berechneten, da die empirischen Magnetfelder einen beträchtlich steileren Verlauf zeigen als die die Berechnung der Brechkräfte zulassende angepaßte Feldfunktion.

Schrifttum

1. B. v. Borries u. E. Ruska, Mikroskopie hoher Auflösung mit schnellen Elektronen. *Ergebn. exakt. Naturw.* 19 (1940) S. 237. — 2. M. Knoll u. E. Ruska, Beitrag zur geometrischen Elektronenoptik I u. II. *Ann. Phys., Lpz.* 12, V (1932) S. 607 u. 641. — 3. E. Ruska, Über Fortschritte im Bau und in der Leistung des magnetischen Elektronenmikroskops. *Z. Phys.* 87 (1934) S. 580. — 4. W. Glaser, Strenge Berechnung magnetischer Linzen der Feldform $H = \frac{H_0}{1 + (z/h)^2}$. *Z. Phys.* 117 (1941) S. 285. — 5. W. Glaser u. E. Lammell, Strenge Berechnung der elektronenoptischen Aberrationskurven eines typischen Magnetfeldes. *Arch. Elektrotechn.* 37 (1943) S. 347. — 6. J. Dosse, Über optische Kenngrößen starker Elektronenlinzen. *Z. Phys.* 117 (1941) S. 722, auf S. 744. — 7. H. Busch, Über die Wirkungsweise der Konzentrierungsspule bei der Braunschen Röhre. *Arch. Elektrotechn.* 18 (1927) S. 583. — 8. E. Ruska u. M. Knoll,

- Die magnetische Sammelspule für schnelle Elektronenstrahlen. *Z. techn. Phys.* 12 (1931) S. 389 u. 448. — 9. B. v. Borries u. E. Ruska, Magnetische Sammellinse kurzer Feldlänge. *DRP 680284 v. 17. 3. 1932.* — 10. Es finden sich in der Literatur (z. B. E. Kinder, *Kolloid-Z.* 95 (1941) S. 326: Über das magnetische Jochlin sen-Übermikroskop und einige Anwendungen in der Kolloidchemie) auch Bezeichnungen, die die Bauweise des die Polschuhe verbindenden Eisenkreises zum Inhalt haben. So wird die durch Joche erregte Polschuhlinse als Jochlinse bezeichnet, die übliche Form der Polschuhlinse als gekapselte Linse. Es scheint uns richtiger, von einer durch Joche bzw. durch eine konzentrische Wicklung erregten Polschuhlinse zu sprechen, wenn man diese besonderen Bauweisen der Polschuhlinse ins Auge faßt. — 11. E. Ruska, Über ein magnetisches Objektiv für das Elektronenmikroskop. *Z. Phys.* 89 (1934) S. 90. — 12. M. v. Ardenne, Über ein Universal-Elektronenmikroskop für Hellfeld-, Dunkelfeld- und Stereobild-Betrieb. *Z. Phys.* 115 (1940) S. 339. — 13. M. v. Ardenne, Über ein 200 kV-Universal-Elektronenmikroskop mit Objektabschattungsvorrichtung. *Z. Phys.* 117 (1941) S. 657. — 14. B. v. Borries, E. Ruska, J. Krumm, H. O. Müller, Übermikroskopische Abbildung mittels magnetostatischer Linsen. *Naturwiss.* 28 (1940) S. 350. — 15. Nach einem Vorschlag von Schering, s. bei W. Raske, *Arch. Elektrotechn.* 31 (1937) S. 732, auf S. 747. Vgl. auch W. Schröder, *DRP 720927 ang. 25. 2. 1937.* — 15a. E. Kinder u. A. Pendzich, Eine neue magnetische Linse kleiner Brennweite. *J. AEG-Forsch.* 7 (1940) S. 23. — 16. E. Ruska, Zur Entwicklung der Übermikroskopie und über ihre Beziehungen zur Kolloidchemie. *Kolloid-Z.* 107 (1944) S. 2. — 17. E. Ruska, Über die Linsen hochauflösender Elektronenmikroskope. *Arch. Elektrotechn.* 36 (1942) S. 431. — 18. B. v. Borries u. E. Ruska, Die Technik des Siemens-Übermikroskops. *Siemens-Z.* 20 (1940) S. 217. — 19. H. O. Müller u. E. Ruska, Ein Übermikroskop für 220 kV Strahlspannung. *Kolloid-Z.* 95 (1941) S. 21. — 20. J. Dosse, Zur Ausmessung des Feldes magnetischer Elektronenlinsen. *Z. Phys.* 117 (1941) S. 437. — 21. M. v. Ardenne, Zur Prüfung kurzbrennweitiger Elektronenlinsen. *Z. Phys.* 117 (1941) S. 602. — 22. M. v. Ardenne, Ergänzung zu den Arbeiten „Zur Prüfung von kurzbrennweitigen Elektronenlinsen“ und „Über ein 200 kV-Universal-Elektronenmikroskop mit Objektabschattungsvorrichtung“. *Z. Physik* 118 (1941) S. 384. — 23. J. Dosse, Ergänzung zur Arbeit „Über optische Kenngrößen starker Elektronenlinsen“. *Z. Phys.* 118 (1941) S. 375. — 24. J. Dosse, Strenge Berechnung magnetischer Linsen mit unsymmetrischer Feldform nach $H = H_0/[1 + (z/a)^2]$. *Z. Phys.* 117 (1941) S. 316. — 25. E. Sugata, The limit of magnification by a magnetic lens for electron microscope *Electrot. Journ. Japan* 3 (1939) S. 271.