

Ein elektronenoptischer Apochromat

Von OTTO SCHERZER

Aus dem Institut für theoretische Physik der Technischen Hochschule Darmstadt
und den Süddeutschen Laboratorien in Mosbach
(Z. Naturforschg. 3a, 544–545 [1948]; eingegangen am 29. Juli 1948)

An einem Rechenbeispiel wird gezeigt, wie sich Elektronenlinsen durch eine für Elektronen durchlässige ebene Metallfolie chromatisch korrigieren lassen. Die benachbarten Elektroden influenzieren auf der Folie negative Ladungen, die die langsameren Strahl elektronen verhältnismäßig stark nach außen drängen und dadurch den chromatischen Fehler korrigieren.

In jüngster Zeit wurden Elektronenlinsen dazu verwendet, radioaktives Material durch die beim Zerfall ausgesandten Elektronen abzubilden¹. Die Hoffnung ist dabei, daß dieses Verfahren genauen Aufschluß über den Einbau einzelner Atome in wachsende Kristalle oder organische Zellen geben könnte. Wegen der uneinheitlichen Geschwindigkeit der Zerfallselektronen steht der Verwirklichung dieses Ziels bisher in erster

Verwendung mit der von Elektron zu Elektron verschiedenen Energie $e\Phi_0$ austreten. Die Polschuhe der magnetischen Sammellinse wirken gleichzeitig als die eine äußere Elektrode der durch die Folie und ihre Umgebung gebildeten elektrischen Zerstreuungslinse. Da die Elektronen in dieser Zerstreuungslinse viel langsamer sind als in der Sammellinse, kann die Zerstreuungslinse trotz ihrer verhältnismäßig geringen Brechkraft den chromatischen Fehler der Sammellinse für gewisse Geschwindigkeiten gerade aufheben. Die Anordnung ist so gewählt, daß zwei solche Geschwindigkeiten nahe beisammen liegen, so daß ein verhältnismäßig großer Korrekturbereich entsteht. Die Durchrechnung des Strahlenganges ist umständlich und nur näherungsweise möglich. Es soll daher gleich das Ergebnis angegeben werden.

Die chromatischen Eigenschaften des Systems sind weitgehend unabhängig von der Vergrößerung V , falls diese größer als 1 gewählt wird. Die Vergrößerung kann dabei durch Änderung des Bildabstandes variiert werden. Die Scharfstellung erfolgt durch Ändern des Linsenstromes. Die chromatischen Eigenschaften können durch eine geringfügige Änderung der Elektrodenpotentiale und -abstände stark beeinflußt werden. Ist r_B der Radius der Blende, so ist der Radius $|r_b|$ des in der Bildebene auftretenden Zerstreuungskreises in seiner Abhängigkeit von der Austrittsenergie $e\Phi_0$ der abbildenden Elektronen durch die ausgezogene Kurve in Abb. 2 gegeben. Man erkennt daraus, daß für Φ_0 in der Nachbarschaft der

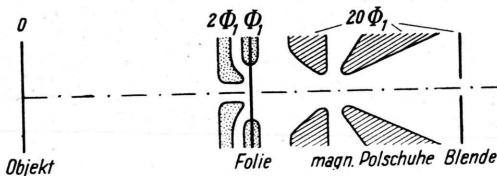


Abb. 1. Elektroden und Polschuhe des Apochromaten.

Linie der chromatischen Fehler der Elektronenlinsen im Wege. Es soll daher auf eine Möglichkeit zur Vermeidung dieses Fehlers hingewiesen werden.

Es ist bekannt, daß bei rotations-symmetrischen Linsen mit zeitlich konstanten Feldern der chromatische Fehler nur vermieden werden kann, wenn elektrische Ladungen auf und in unmittelbarer Nähe der optischen Achse angeordnet werden. Da meines Wissens bisher nie angegeben worden ist, wie diese Ladungen anzugeben sind, soll hier ein Beispiel gegeben werden. Dabei soll eine dünne, für Elektronen durchlässige Metallfolie als Träger der korrigierenden Ladungen dienen². Abb. 1 zeigt die Anordnung der Elektroden. Die angeschriebenen Potentiale sind die Spannungen gegenüber dem Objekt, aus dem die Elek-

¹ L. Marton u. P. H. Abelson, Science [New York] 106, 70 [1947].

² Über die Herstellung hinreichend dünner Folien vgl. N. H. Ast, Nature [London] 159, 370 [1947], und V. E. Cosslett, Biochim. et Biophysica Acta [New York – Amsterdam] 2, 239 [1948].



Hälften des Folienpotentials Φ_1 , die Anordnung für drei verschiedene Austrittsenergien abbildet, ähnlich wie ein lichtoptischer Apochromat für drei verschiedene Farben korrigiert ist. Bei einem Blendenradius $r_B = 1$ mm würde für Austrittsenergien von $e\Phi_1/3$ bis $2e\Phi_1/3$ die auf das Objekt bezogene Unschärfe $|r_b|/V$ kleiner als 1μ sein^{2a}. An den Rändern dieses Energiebereichs nimmt die Unschärfe so rasch zu, daß die Elektronen mit außerhalb des Bereichs liegenden Energien nur eine allgemeine Verschleierung des Bildes, aber keine wesentliche Beeinträchtigung des Auflösungsvermögens bewirken. Die in Abb. 2 gestrichelte Kurve

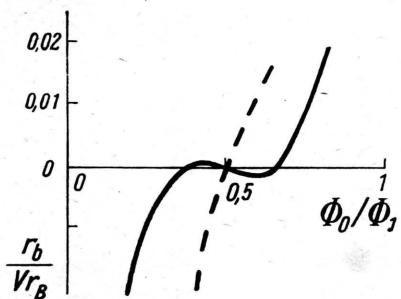


Abb. 2. Unschärfe in Abhängigkeit von der Energie.
— Apochromat, - - - unkorrigiertes System.

gilt für das durch Herausnahme der Folie und der ersten Elektrode entstehende magnetische Abbildungssystem mit elektrostatischer Vorbeschleunigung. Sie läßt die durch die korrigierende Wirkung der Folie erzielte Verbesserung erkennen. Bei den bisher bekannt gewordenen Versuchen ist mit unkorrigierten Linsen und bei Beschränkung auf durch γ -Strahlen ausgelöste Sekundärelektronen

^{2a} Anm. b. d. Korrektur. Wird das Potential der linken Elektrode auf $1,5 \Phi_1$ gesenkt und das Objekt noch etwas nach links gerückt, so läßt sich durch eine geringe Verformung des linken Polschuhs der auf 1μ korrigierte Bereich von $e\Phi_1/4$ bis $3e\Phi_1/4$ erweitern.

nen ein Auflösungsvermögen von 30μ erreicht werden. Die Unschärfe von nur 1μ würde demgegenüber einen erheblichen Fortschritt bedeuten.

Entsprechend einer Anregung von Dr. L. Marton war bei der Wahl der Elektrodenpotentiale an ^3H als β -Strahler, also an relativ niedrige Austrittsenergien gedacht worden. Es lassen sich unschwer Elektrodensysteme finden, bei denen der korrigierte Bereich näher am Potential der magnetischen Polschuhe liegt. Die Anordnung ist dann für energiereichere β -Strahlen verwendbar, ohne daß zu hohe Spannungen auftreten.

Das hier beschriebene Linsensystem ist nur für die Bildmitte chromatisch korrigiert. In den Außenbezirken des Bildes macht sich die Abhängigkeit der Vergrößerung und der Bilddrehung von der Wellenlänge bemerkbar. Durch Einführung weiterer Elektroden dürften auch diese Fehler zu beseitigen sein. Beispielsweise kann die chromatische Abhängigkeit der Bilddrehung durch Verwendung einer drehungsfreien Linse vermieden werden. Die Streuung der Elektronen in der Folie ist bei den dünnsten heute herstellbaren Berylliumfolien vernachlässigbar. Bei geeigneter Formgebung des Folienhalters und der Nachbarelektroden kann die Folie sogar die sphärische Aberration des Systems korrigieren³ und dadurch den ausnutzbaren Öffnungswinkel vergrößern. Die chromatische Korrektur durch Folien ist auch im Falle des Durchstrahlungsverfahrens von Nutzen, wenn die Elektronenstrahlen beim Durchgang durch dicke Objekte geschwindigkeitsinhomogen geworden sind. Es ist also sehr wahrscheinlich, daß das Verfahren der Linsenkorrektur durch Folien nach seiner technischen Durchgestaltung nicht nur der eingangs erwähnten Abbildung radioaktiver Substanzen, sondern dem Gesamtgebiet der Elektronenoptik zugute kommen wird.

³ O. Scherzer, Optik 2, 124 [1947]; J. appl. Physics, im Druck.