

Beschreibung

HINTERGRUND DER ERFINDUNG

1. Gebiet der Erfindung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft eine Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration zum Korrigieren des elektronenoptischen Systems eines Elektronenmikroskops hinsichtlich chromatischer Aberration und außerdem ein Verfahren zum Steuern der Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration.

2. Beschreibung des Stands der Technik

[0002] In der Vergangenheit war ein Verfahren, das Multipol-Linsen zum Erzeugen von Quadrupolfeldern verwendet, um das elektronenoptische System (wie etwa eine Objektivlinse) eines Elektronenmikroskops hinsichtlich chromatischer Aberration zu korrigieren, bekannt. Die Eigenschaften von Quadrupolfeldern wurden bereits eingehend untersucht, und die Bahn von Elektronen durch ein Quadrupolfeld und Aberrationen in dem Feld wurden geklärt (siehe Nicht-Patentdokument 1). In der Absicht, chromatische und sphärische Aberrationen in einem in einem Elektronenmikroskop verwendeten Magnetfeld zu beseitigen, wurden Kombinationen von mehreren Quadrupolfeldern erforscht. Aufgründdessen wurde die folgende Schlussfolgerung hinsichtlich der Anzahl von kombinierten Quadrupolfeldern abgeleitet. In einer mit Quadrupolfeldern arbeitenden Aberrations-Korrekturereinrichtung müssen die Brennebene in der x-Bahn und die Brennebene in der y-Bahn dieselbe sein und muss die Vergrößerung in x-Richtung identisch mit der Vergrößerung in y-Richtung sein, d. h. müssen sogenannte stigmatische Bedingungen gelten. Irgendeine Kombination von zwei Quadrupolfeldern kann diese Bedingungen nicht erfüllen (siehe zum Beispiel Nicht-Patentdokument 1, S. 90). Bei zwei Stufen von Quadrupolfeldern ist es möglich, die Brennebene der x-Bahn und die Brennebene der y-Bahn in Übereinstimmung zu bringen. Jedoch ist es im Wesentlichen unmöglich, die Vergrößerungen in x- und in y-Richtung gleich zu machen. Dies wird als pseudo-stigmatische Bedingungen bezeichnet (siehe zum Beispiel Nicht-Patentdokument 2, Kapitel "Quadrupol-Linsen"). Hinsichtlich mit Quadrupolen arbeitender Aberrationskorrekturereinrichtungen wurden daher Kombinationen von vier oder mehr Stufen von Quadrupolen, welche die stigmatischen Bedingungen erfüllen, erforscht und vermarktet.

Aufstellung der Druckschriften

Nicht-Patentdokumente

[0003]

Nicht-Patentdokument 1: P. W. Haukes, Quadrupoles in Electron Lens Design (Advance in Electronics & Electron Physics, Supplement 7), Academic Press (1970), New York und London

Nicht-Patentdokument 2: Katsumi Ura, "Elektronen- und Ionenstrahloptik" (in Japanisch), Kyoritsu Publishing Company (1994), erste Ausg.

[0004] Bei der herkömmlichen Korrektur chromatischer Aberration mittels vier Stufen von Quadrupolen werden die Korrektur in x-Richtung und die Korrektur in y-Richtung mittels verschiedener Stufen von Quadrupolfeldern durchgeführt, weil die Eigenschaften eines Quadrupolfelds direkt zur Korrektur chromatischer Aberration verwendet werden. Für die x- und die y-Bahn heißt das, dass, wenn in einer der Bahnen Konvergenz erreicht wird, in der anderen Divergenz auftritt. Wenn die Korrekturebene in x-Richtung eine andere als die Korrekturebene in y-Richtung ist, ist es nicht möglich, deren Korrekturebenen gleichzeitig in Übereinstimmung mit der Objektivlinsebene, in welche chromatische Aberration eingeführt wird, zu bringen. Wo die Chromatische-Aberrations-Korrekturebene und die Einführungsebene nicht zusammenfallen, werden zum Abstand zwischen diesen proportionale Neben-Aberrationen erzeugt.

KURZBESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

[0005] In Anbetracht des oben geschilderten Problems wurde die vorliegende Erfindung gemacht. Gemäß einigen Aspekten der Erfindung ist es möglich, eine Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration anzubieten, welche einfach aufgebaut, aber fähig ist, das elektronenoptische System eines Elektronenmikroskops hinsichtlich chromatischer Aberration genau zu korrigieren. Außerdem wird ein Verfahren zum Steuern dieser Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration angeboten.

(1) Die vorliegende Erfindung stellt eine Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration zum Korrigieren eines elektronenoptischen Systems eines Elektronenmikroskops hinsichtlich chromatischer Aberration bereit, wobei die Korrektureinrichtung eine erste und eine zweite Multipol-Linse zum Erzeugen von Quadrupolfeldern sowie eine erste und eine zweite Übertragungslinse jeweils mit einer Brennweite f aufweist. Die erste und die zweite Multipol-Linse sind auf entgegengesetzten Seiten der ersten und der zweiten Übertragungslinse angeordnet. Der Abstand zwischen der ersten Multipol-Linse und der ersten Übertragungslinse ist $f - \Delta$. Der Abstand zwischen der ersten und der zweiten Übertragungslinse ist $2f$. Der Abstand zwischen der zweiten Übertragungslinse und der zweiten Multipol-Linse ist $f - \Delta_2$. Die Korrektureinrichtung ist so konstruiert, dass die Beziehung $f > \Delta_1 + \Delta_2 > 0$ gilt.

In der Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration dieser Konstruktion können stigmatische Bedingungen selbst bei Verwendung von zwei Stufen von Quadrupolen erfüllt werden, indem die erste und die zweite Übertragungslinse zwischen der ersten und der zweiten Multipol-Linse, welche jeweils aus einem Quadrupol bestehen, angeordnet werden. Außerdem können in dieser Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration Korrektorebenen in x -Richtung beziehungsweise y -Richtung gleichzeitig in Übereinstimmung mit der Chromatische-Aberrations-Einführungsebene des elektronenoptischen Systems gebracht werden. Das heißt, die vorliegende Erfindung macht es möglich, chromatische Aberration mit einem einfacheren Aufbau und höherer Genauigkeit als bei Verwendung von vier Stufen von Quadrupolen zu korrigieren.

(2) Bei einem Merkmal dieser Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration ist die Summe $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$ gegeben durch

$$\Delta = Z \left(\frac{2\sin(\beta)\sinh(\beta)}{\beta(\cos(\beta)\sinh(\beta) + \sin(\beta)\cosh(\beta))} - 1 \right) \quad (\text{A})$$

$$\beta = \sqrt{C} Z \quad (\text{B})$$

wobei Z die entlang der optischen Achse gemessene Länge der ersten und der zweiten Multipol-Linse ist und C die Intensität der Anregung der ersten und der zweiten Multipol-Linse ist.

(3) Die vorliegende Erfindung stellt außerdem eine Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration zum Korrigieren eines elektronenoptischen Systems eines Elektronenmikroskops hinsichtlich chromatischer Aberration bereit, wobei die Korrektureinrichtung eine erste und eine zweite Multipol-Linse zum Erzeugen von Quadrupolfeldern, eine erste und eine zweite Übertragungslinse jeweils mit einer Brennweite f und eine Hilfslinse aufweist. Die erste und die zweite Multipol-Linse sind auf entgegengesetzten Seiten der ersten und der zweiten Übertragungslinse angeordnet. Die erste und die zweite Übertragungslinse sind auf entgegengesetzten Seiten der Hilfslinse angeordnet. Der Abstand zwischen der ersten Multipol-Linse und der ersten Übertragungslinse ist f . Der Abstand zwischen der ersten Übertragungslinse und der Hilfslinse ist f . Der Abstand zwischen der Hilfslinse und der zweiten Übertragungslinse ist f . Der Abstand zwischen der zweiten Übertragungslinse und der zweiten Multipol-Linse ist $f - \Delta_s$. Diese Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration ist so konstruiert, dass die Beziehung $f > \Delta_s > 0$ gilt.

In dieser Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration gemäß der vorliegenden Erfindung sind die erste und die zweite Übertragungslinse und die Hilfslinse zwischen der ersten und der zweiten Multipol-Linse, welche jeweils aus einem Quadrupol bestehen, angeordnet. Die stigmatischen Bedingungen können selbst bei Verwendung von zwei Stufen von Quadrupolen erfüllt werden. Außerdem können die Korrektorebenen in x - beziehungsweise y -Richtung gleichzeitig in Übereinstimmung mit der Chromatische-Aberrations-Einführungsebene des elektronenoptischen Systems gebracht werden. Das heißt, mit dieser Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration kann chromatische Aberration mit einem einfacheren Aufbau und höherer Genauigkeit als bei Verwendung von vier Stufen von Quadrupolen korrigiert werden. Darüber hinaus können die stigmatischen Bedingungen durch eine einfache Steueroperation, bestehend aus dem Steuern der Intensität der Anregung der Hilfslinse, erfüllt werden.

(4) In einem Merkmal dieser Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration ist das Δ_s gegeben durch

$$\Delta_s > Z \left(\frac{2\sin(\beta)\sinh(\beta)}{\beta(\cos(\beta)\sinh(\beta) + \sin(\beta)\cosh(\beta))} - 1 \right) \quad (\text{C})$$

$$\beta = \sqrt{C} Z \quad (\text{D})$$

wobei Z die entlang der optischen Achse gemessene Länge der ersten und der zweiten Multipol-Linse ist und C die Intensität der Anregung der ersten und der zweiten Multipol-Linse ist.

(5) Darüber hinaus stellt die vorliegende Erfindung ein Verfahren zum Steuern einer Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration, welche ein elektronenoptisches System eines Elektronenmikroskops hinsichtlich chromatischer Aberration korrigiert, bereit. Die Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration verfügt über eine erste und eine zweite Multipol-Linse zum Erzeugen von Quadrupolfeldern, eine erste und

eine zweite Übertragungslinse jeweils mit einer Brennweite f und eine Hilfslinse. Die erste und die zweite Multipol-Linse sind auf entgegengesetzten Seiten der ersten und der zweiten Übertragungslinse angeordnet. Die erste und die zweite Übertragungslinse sind auf entgegengesetzten Seiten der Hilfslinse angeordnet. Der Abstand zwischen der ersten Multipol-Linse und der ersten Übertragungslinse ist f . Der Abstand zwischen der ersten Übertragungslinse und der Hilfslinse ist f . Der Abstand zwischen der Hilfslinse und der zweiten Übertragungslinse ist f . Der Abstand zwischen der zweiten Übertragungslinse und der zweiten Multipol-Linse ist $f - \Delta_s$. Die erste und die zweite Multipol-Linse haben, entlang der optischen Achse gemessen, eine Länge Z . Die erste und die zweite Multipol-Linse haben eine Anregungsintensität C . Dieses Verfahren besteht aus dem Variieren der Brennweite f_A der Hilfslinse durch Steuern der Anregungsintensität der Hilfslinse dergestalt, dass die folgenden Bedingungen erfüllt werden:

$$\Delta_s - \frac{f^2}{f_A} = Z \left(\frac{2 \sin(\beta) \sinh(\beta)}{\beta (\cos(\beta) \sinh(\beta) + \sin(\beta) \cosh(\beta))} - 1 \right) \quad (\text{E})$$

$$\beta = \sqrt{C} Z \quad (\text{F})$$

[0006] Gemäß der vorliegenden Erfindung können stigmatische Bedingungen durch Verwendung von zwei Stufen von Quadrupolen erfüllt werden, indem eine erste und eine zweite Übertragungslinse zwischen einer ersten und einer zweiten Multipol-Linse, welche jeweils einen Quadrupol darstellen, angeordnet werden. Außerdem können gemäß der Erfindung die Korrektorebenen in x- und y-Richtung gleichzeitig in Übereinstimmung mit der Chromatische-Aberrations-Einführungsebene des elektronenoptischen Systems gebracht werden. Das heißt, gemäß der vorliegenden Erfindung kann chromatische Aberration mit einem einfacheren Aufbau und höherer Genauigkeit als bei Verwendung von vier Stufen von Quadrupolen korrigiert werden. Außerdem können gemäß der Erfindung stigmatische Bedingungen erfüllt werden, indem eine einfache Steueroperation, bestehend aus dem Steuern der Intensität der Anregung der Hilfslinse, durchgeführt wird.

KURZBESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0007] [Fig. 1](#) ist eine Strahlengang-Zeichnung einer zu einer ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung gehörenden Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration, welche die Konfiguration der Korrektoreinrichtung zeigt.

[0008] [Fig. 2](#) ist eine Strahlengang-Zeichnung einer zu einer zweiten Ausführungsform der Erfindung gehörenden Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration, welche die Konfiguration der Korrektoreinrichtung zeigt.

AUSFÜHRLICHE BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

[0009] Die bevorzugten Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung werden im Folgenden anhand der Zeichnungen ausführlich beschrieben. Es versteht sich von selbst, dass die unten bereitgestellten Ausführungsformen den durch die beigefügten Ansprüche dargestellten Umfang der vorliegenden Erfindung nicht übermäßig beschränken und dass nicht alle unten beschriebenen Konfigurationen wesentliche Bestandteile der Erfindung sind.

Erste Ausführungsform

[0010] Ein Beispiel der Konfiguration einer zu einer ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung gehörenden Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration ist in [Fig. 1](#) gezeigt. In diesem Beispiel wird die Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration der vorliegenden Ausführungsform auf das Bildgebungssystem eines Transmissions-Elektronenmikroskops angewendet.

[0011] Die in [Fig. 1](#) gezeigte Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration **10** enthält eine erste und eine zweite Multipol-Linse **12**, **14** zum Erzeugen von Quadrupolfeldern sowie eine erste und eine zweite Übertragungslinse **16**, **18** und korrigiert chromatische Aberration in einer Objektivlinse **20** des Transmissions-Elektronenmikroskops mittels einer durch diese Linsen erzeugten Konkavlinsewirkung. Die erste Multipol-Linse

12 und die zweite Multipol-Linse **14** sind auf entgegengesetzten Seiten der ersten Übertragungslinse **16** und der zweiten Übertragungslinse **18** angeordnet.

[0012] Gleichwertige elektrische und magnetische Felder werden auf die erste Multipol-Linse **12** und die zweite Multipol-Linse **14**, welche entgegengesetzte Polaritäten haben, angewendet. Das heißt, einer divergierenden Kraft aus der ersten Multipol-Linse **12** ausgesetzte Elektronen sind einer konvergierenden Kraft aus der zweiten Multipol-Linse **14** ausgesetzt. Einer konvergierenden Kraft aus der ersten Multipol-Linse **12** ausgesetzte Elektronen sind einer divergierenden Kraft aus der zweiten Multipol-Linse **14** ausgesetzt. Die erste Multipol-Linse **12** und die zweite Multipol-Linse **14** haben beide jeweils eine Länge Z entlang der optischen Achse.

[0013] Die die Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration **10** bildenden Linsen sind so angeordnet, dass der Abstand zwischen der ersten Multipol-Linse **12** und der ersten Übertragungslinse **16** f ist, der Abstand zwischen der ersten Übertragungslinse **16** und der zweiten Übertragungslinse **18** $2f$ ist und der Abstand zwischen der zweiten Übertragungslinse **18** und der zweiten Multipol-Linse **14** $f - \Delta$ ist. f ist die Brennweite der ersten Übertragungslinse **16** und der zweiten Übertragungslinse **18**. Δ nimmt einen Wert im durch $f > \Delta > 0$ gegebenen Bereich an und wird so justiert, dass es die später beschriebenen stigmatischen Bedingungen erfüllt. Alternativ wird, in der Annahme, dass der Abstand zwischen der ersten Multipol-Linse **12** und der ersten Übertragungslinse **16** $f - \Delta_1$ ist und dass der Abstand zwischen der zweiten Übertragungslinse **18** und der zweiten Multipol-Linse **14** $f - \Delta_2$ ist, die Beziehung $\Delta_1 + \Delta_2 = \Delta$ erfüllt.

[0014] Elektronen, welche von der Achse auf einer Probe S ausgehen und welche dann fokussiert werden, verlassen die Objektivlinse **20** in einer parallelen Beziehung zur optischen Achse OA , so dass der Brennpunkt durch die Objektivlinse **20** an einem unendlich fernen Punkt gebildet wird. Die die Objektivlinse **20** verlassenden Elektronen werden durch Linsen **30** und **32** einmal auf die optische Achse OA fokussiert und treffen dann auf die erste Multipol-Linse **12** der Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration **10** in einer parallelen Beziehung zur Linse **12** auf. Die divergierende Bahn bei der ersten Multipol-Linse **12** wird als die x -Bahn XO bezeichnet. Die konvergierende Bahn wird als die y -Bahn YO bezeichnet.

[0015] Seien bei der ersten Multipol-Linse **12** r_h und r_h' die Austrittsposition der x -Bahn beziehungsweise ihre Neigung. Seien bei der ersten Multipol-Linse **12** r_s und r_s' die Austrittsposition der y -Bahn beziehungsweise ihre Neigung. Unter Verwendung von Matrizen M_h und M_s sind diese Positionen und Neigungen gegeben durch

$$\begin{pmatrix} r_h \\ r_h' \end{pmatrix} = M_h \begin{pmatrix} r_{xo} \\ r_{xo}' \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} r_s \\ r_s' \end{pmatrix} = M_s \begin{pmatrix} r_{yo} \\ r_{yo}' \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$M_h = \begin{pmatrix} \cosh(\beta) & \frac{1}{\alpha} \sinh(\beta) \\ \alpha \sinh(\beta) & \cosh(\beta) \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$M_s = \begin{pmatrix} \cos(\beta) & \frac{1}{\alpha} \sin(\beta) \\ -\alpha \sin(\beta) & \cos(\beta) \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\alpha = \sqrt{C} \quad (5)$$

$$\beta = \sqrt{C} Z \quad (6)$$

wobei r_{x0} und r_{x0}' die Einfallposition der x-Bahn beziehungsweise ihre Neigung in der ersten Multipol-Linse **12** sind, r_{y0} und r_{y0}' die Einfallposition der y-Bahn beziehungsweise ihre Neigung in der ersten Multipol-Linse **12** sind und C ein die Intensität der Anregung der ersten Multipol-Linse **12** angegebender Wert ist und gegeben ist durch

$$C = \frac{V}{Ub^2} \left(\frac{2\gamma U + 1}{\gamma U + 1} \right) + \sqrt{\frac{e}{2mU(\gamma U + 1)}} \frac{2\mu_0 Ni}{b^2} \quad (7)$$

$$\gamma = \frac{e}{2mc_v^2} \quad (8)$$

wobei V eine Anregungsspannung zum Erzeugen eines Quadrupolfelds ist, U die Beschleunigungsspannung des Elektronenmikroskops ist, b der Bohrungsradius des Multipol-Elements ist, e die elektrische Elementarladung ist, m die Masse eines Elektrons ist, μ_0 die Vakuumpemreabilität ist, Ni die Amperewindungszahl der Anregung für das Quadrupolfeld ist und c_v die Lichtgeschwindigkeit ist. Die erste Multipol-Linse **12** und die zweite Multipol-Linse **14** erzeugen beide jeweils ein Quadrupolfeld, in welchem elektrische und magnetische Felder überlagert sind. Die jeweils durch Überlagerung elektrischer und magnetischer Felder erzeugten Quadrupolfelder werden so gebildet, dass die jedem Elektron verliehenen Kräfte einander auslöschen. Die jedem einzelnen Elektron verliehene Kraft ist durch Gl. (7) gegeben. Die durch die elektrischen und magnetischen Felder erzeugten Kräfte löschen einander aus. Dies bedeutet, dass das Potential V in Gl. (7) sich hinsichtlich des Vorzeichens von der Amperewindungszahl Ni unterscheidet. Unter diesen Umständen wird die dem Elektron durch das elektrische Quadrupolfeld verliehene Kraft etwas höher gemacht als die dem Elektron durch das magnetische Quadrupolfeld verliehene Kraft. Auf diese Weise werden in den in der Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration **10** verwendeten Quadrupolfeldern die elektrischen und magnetischen Felder in Wettbewerb miteinander versetzt, so dass die Feldstärke des elektrischen Felds etwas höher als diejenige des Magnetfelds ist. Aufgründdessen wirken das elektrische und das magnetische Feld zusammen als ein Quadrupolfeld.

[0016] Die aus der ersten Multipol-Linse **12** herauskommenden und ein Bild bildenden Elektronen werden durch die erste und die zweite Übertragungslinse **16** und **18** übertragen und dann auf die zweite Multipol-Linse **14** auftreffen gelassen. Die erste Übertragungslinse **16** und die zweite Übertragungslinse **18** haben die gleiche Brennweite f. Die erste Übertragungslinse **16** befindet sich in einem Abstand f von der Arbeitsebene (Mittalebene) der ersten Multipol-Linse **12**. Die erste Übertragungslinse **16** und die zweite Übertragungslinse **18** befinden sich in einem Abstand 2f voneinander. Die Arbeitsebene (Mittalebene) der zweiten Übertragungslinse **18** und die Arbeitsebene (Mittalebene) der zweiten Multipol-Linse **14** liegen um einen Abstand f – Δ auseinander. Wegen dieser Linsenordnung sind die Übertragungsvorgänge der ersten Übertragungslinse **16** und der zweiten Übertragungslinse **18** unter Verwendung einer Matrix M_t wie folgt gegeben:

$$M_t = \begin{pmatrix} 1 & f \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

$$L = -(Z + \Delta) < 0 \quad (10)$$

[0017] Da die zweite Multipol-Linse **14** und die erste Multipol-Linse **12** entgegengesetzte Polaritäten haben, sind die Austrittsposition r_{hs} der x-Bahn in der zweiten Multipol-Linse **14** und ihre Neigung r_{hs}' , die Austrittsposition r_{sh} der y-Bahn in der zweiten Multipol-Linse **14** und ihre Neigung r_{sh}' unter Verwendung der Matrix M_h aus Gl. (3), der Matrix M_s aus Gl. (4) und der Matrix M_t aus Gl. (9) wie folgt gegeben:

$$\begin{pmatrix} r_{hs} \\ r_{hs}' \end{pmatrix} = M_s M_t M_h \begin{pmatrix} r_{x0} \\ r_{x0}' \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{pmatrix} r_{sh} \\ r_{sh}' \end{pmatrix} = M_h M_t M_s \begin{pmatrix} r_{y0} \\ r_{y0}' \end{pmatrix} \quad (12)$$

[0018] Die stigmatischen Bedingungen, die in einer mit einer Kombination von mehreren Quadrupolfeldern arbeitenden Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration wichtig sind, gelten, wenn an der Austrittsebene der Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration, auf welche ein rotationssymmetrischer Elektronenstrahl auftrifft, die Position und die Neigung der x-Bahn gleich der Position und der Neigung der y-Bahn werden. Damit die Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration **10** der vorliegenden Ausführungsform die stigmatischen Bedingungen erfüllt, muss demgemäß die folgende Beziehung erfüllt sein:

$$\begin{pmatrix} r_{hs} \\ r_{hs}' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{sh} \\ r_{sh}' \end{pmatrix} \quad (13)$$

[0019] Da die Einfallspolition r_{x0} der x-Bahn und ihre Neigung r_{x0}' gleich der Einfallspolition r_{y0} der y-Bahn beziehungsweise ihrer Neigung r_{y0}' sind, muss die folgende Gleichung gelten:

$$M_s M_t M_h = M_h M_t M_s \quad (14)$$

[0020] Insbesondere unter Verwendung der Gleichungen (3) bis (6) und (9) wird ein Δ ermittelt, welches die folgende Gleichung erfüllt:

$$\Delta = Z \left(\frac{2 \sin(\beta) \sinh(\beta)}{\beta (\cos(\beta) \sinh(\beta) + \sin(\beta) \cosh(\beta))} - 1 \right) \quad (15)$$

[0021] Die Anordnung der Linsen wird entsprechend dem ermittelten Δ so justiert, dass in der Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration **10** die stigmatischen Bedingungen gelten. Unter dieser Bedingung tritt ein rotationssymmetrischer Elektronenstrahl in die Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration **10** ein und verlässt er die Korrekturvorrichtung **10** unter Aufrechterhaltung der Rotationssymmetrie.

[0022] Da die Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration **10** als eine Konkavlinse CO wirkt, wird an der Position der Brennweite f_c eine virtuelle Ebene der Konkavlinse CO gebildet. Divergierende Elektronen, welche die zweite Multipol-Linse **14** verlassen, bilden durch eine Linse **34** ein Bild I. Dann wird durch das elektronenoptische System normaler Konstruktion des Transmissions-Elektronenmikroskops ein vergrößertes Bild gebildet. Nun wird die Funktion zur Korrektur chromatischer Aberration der Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration **10** ausführlich beschrieben.

[0023] Da die Objektivlinse **20** so eingestellt ist, dass sie die Bildgebung an einem unendlich fernen Punkt durchführt, wird angenommen, dass $r_{x0}' = 0$ und $r_{y0}' = 0$. Da die stigmatischen Bedingungen gelten, wird die Brennweite f_c unter Verwendung der Gleichungen (12) und (13) aus den folgenden Gleichungen ermittelt:

$$\frac{1}{f_c} = \frac{r_{hs}'}{r_{x0}} = \frac{r_{sh}'}{r_{y0}} \quad (16)$$

$$\frac{1}{f_c} = \sqrt{C} \left(\frac{\sinh^2(\beta) - \sin^2(\beta)}{\cos(\beta) \sinh(\beta) + \sin(\beta) \cosh(\beta)} \right) \quad (17)$$

[0024] Jetzt wird angenommen, dass die Brennweite f_c in einer zur Bewegungsrichtung der Elektronen entgegengesetzten Richtung ein positives Vorzeichen hat. Wie durch Berechnung der rechten Seite von Gl. (17) er-

sichtlich ist, nimmt die Brennweite f_c in einem durch $0 < \beta < 0,7\pi$ gegebenen Bereich stets einen positiven Wert an. Aus dem folgenden Grund wird darauf gedrängt, dass die Feldstärke jedes Quadrupolfelds so eingestellt wird, dass $\beta < \text{höchstens ungefähr } 0,5\pi$. Bei einer Quadrupolfeldstärke, bei welcher β nahe $0,8\pi$ liegt, beginnen konvergierende Elektronen, um die optische Achse zu schwingen, wie aus den Gleichungen (2) bis (5) ersichtlich ist. Divergierende Elektronen werden so abgelenkt, dass sie gegen die Wand des Elektronenkanals stoßen. Demgemäß kann man vernünftigerweise annehmen, dass die durch Gl. (17) definierte Brennweite f_c einen positiven Wert in einem praktischen Bereich annimmt.

[0025] Fig. 1 zeigt die Bahn von Elektronen bei positiver Brennweite f_c . Die Elektronen werden durch Durchlaufen der Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration **10** von der optischen Achse OA weg abgelenkt. Da die rechte Seite der Gl. (17) weder r_{x0} noch r_{y0} enthält, bilden alle die Achse der Probe S verlassenden Elektronen ein virtuelles Bild an einer Position bei der Brennweite f_c von der virtuellen Hauptebene der Korrekturanrichtung **10** in einer zur Bewegungsrichtung der Elektronen entgegengesetzten Richtung. Das heißt, die Konkavlinse CO mit einer Brennweite f_c wird durch die Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration **10** gebildet. Man kann annehmen, dass ihre Hauptebene die Schnittebene einer auf die erste Multipol-Linse **12** einfallenden Bahn und einer die zweite Multipol-Linse **14** verlassenden Bahn ist. Die Erfüllung der stigmatischen Bedingungen gewährleistet, dass man aus den x- und y-Bahnen dieselbe virtuelle Hauptebene erhält.

[0026] Das heißt, man kann annehmen, dass auf die Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration **10** einfallende Elektronen sowohl für die x-Bahn als auch für die y-Bahn von der optischen Achse OA weg abgelenkt werden und dass sie bei der Hauptebene einer Konkavlinse CO abgelenkt werden. Die Hauptebene der Konkavlinse CO ist grob die Mitte der ersten Multipol-Linse **12** und ist auch grob die Mitte der zweiten Multipol-Linse **14**. Man kann sagen, dass die Mitte der ersten Multipol-Linse **12** und die Mitte der zweiten Multipol-Linse **14** durch die Wirkung der ersten und der zweiten Übertragungslinse **16**, **18** optisch nahezu gleichwertige Ebenen sind (bei der gleichen Ebene im Bereich der Bahn erster Ordnung).

[0027] In der Annahme, dass die Objektivlinse **20** eine Brennweite f_o hat, ist die Bildvergrößerung M an einem Punkt, an welchem ein virtuelles Bild gebildet wird, gegeben durch

$$M = \frac{|f_c|}{f_o} \quad (18)$$

[0028] Chromatische Aberration in der Objektivlinse **20** des Elektronenmikroskops entsteht dadurch, dass die Brennweite der Objektivlinse **20**, bedingt durch eine recht kleine Energieschwankung δU der Elektronen, um δf schwankt. In der Annahme, dass die Objektivlinse **20** einen chromatischen Aberrationskoeffizienten C_c hat, ist die Brennweitenschwankung δf gegeben durch

$$\delta f = C_c \frac{1}{U} \left(\frac{2\gamma U + 1}{\gamma U + 1} \right) \delta U \quad (19)$$

[0029] Die Brennweitenschwankung δf ist eine Brennpunktabweichung, welche durch einen Rückgang der Ablenkraft der Objektivlinse **20**, verursacht durch eine Zunahme der Elektronenenergie, vorausgesetzt, die Energieschwankung δU hat einen positiven Wert, erzeugt wird. Die Objektivlinse **20** ist eine Konvexlinse. Die Brennweitenschwankung δf erzeugt für Elektronen, welche höhere Energien haben und daher weniger abgelenkt werden, eine Abweichung in der Bewegungsrichtung der Elektronen. δf in Gl. (19) ist eine Brennpunktabweichung in der Probenoberfläche. Bei einer willkürlichen Bildebene ist eine der Brennweitenschwankung δf entsprechende Abweichung des Bilds in z-Richtung (entlang der optischen Achse) ein Betrag, welchen man durch Multiplizieren der Brennweitenschwankung δf mit dem Quadrat der Bildvergrößerung erhält. Folglich bewirkt die chromatische Aberration in der Objektivlinse **20**, dass die in Fig. 1 gezeigte Brennweite f_c in der Ebene des Papiers von Fig. 1 um einen Betrag gleich $M^2 \delta f$ nach rechts (in die Bewegungsrichtung der Elektronen) abweicht.

[0030] Im Gegensatz dazu wirkt die Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration **10** als die Konkavlinse CO, und daher geht die Abweichung der Brennweite f_c für Elektronen, welche höhere Energien haben und folglich weniger abgelenkt werden, in eine zur Bewegungsrichtung der Elektronen entgegengesetzte Richtung. Demgemäß wird chromatische Aberration korrigiert, vorausgesetzt, die durch die chromatische Aberration in der Objektivlinse **20** verursachte Abweichung der Brennweite f_c und die durch die Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration **10** verursachte Abweichung der Brennweite f_c löschen einander genau aus. Diese Bedingung ist gegeben durch

$$\frac{df_c}{dU} \delta U = M^2 Cc \frac{1}{U} \left(\frac{2\gamma U + 1}{\gamma U + 1} \right) \delta U \quad (20)$$

[0031] Unter Verwendung von Gl. (18) wird Gl. (20) verändert zu

$$\frac{1}{f_c^2} \frac{df_c}{dU} = \frac{1}{f_o^2} Cc \frac{1}{U} \left(\frac{2\gamma U + 1}{\gamma U + 1} \right) \delta U \quad (21)$$

[0032] Das heißt, chromatische Aberration in der Objektivlinse **20** wird durch die Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration **10** korrigiert, indem das Potential V und die Amperewindungszahl N_i des Quadrupolfelds wie in Gl. (7) gegeben an die erste und die zweite Multipol-Linse **12** und **14** gegeben wird, um Gl. (21) zu erfüllen, welche len. Es gibt unendlich viele Kombinationen von V und Gl. (21) erfüllen. Ein zum Korrigieren von unter den Bedingungen, bei welchen die Beschleunigungsspannung U 200 kV beträgt, die Brennweite f_o der Objektivlinse **20** 2,3 mm beträgt und der chromatische Aberrationskoeffizient Cc 1,5 mm beträgt, auftretender chromatischer Aberration verwendeter Satz von V (in V) und N_i (in A) sowie die resultierenden Parameter Δ (in mm), f_c (in mm) und M sind in Tabelle 1 gezeigt. Es wird angenommen, dass die erste und die zweite Multipol-Linse **12** und **14** einen Bohrungsradius (b) von 2,5 mm und eine Länge Z von 80 mm entlang der optischen Achse haben.

Tabelle 1

V (V)	N_i (A)	Δ (mm)	f_c (mm)	$M = f_c/f_o$
7.000	-25,14	13,46	29,64	12,89
8.000	-29,09	10,88	37,06	16,11
9.000	-33,02	9,002	45,18	19,64
10.000	-36,94	7,499	54,61	23,75

[0033] Auf diese Weise können in der Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration **10** der vorliegenden Ausführungsform stigmatische Bedingungen erfüllt werden, obwohl zwei Stufen von Quadrupolfeldern verwendet werden. Die Korrektur chromatischer Aberration, welche die zwei Stufen von Quadrupolfeldern und die zwei Stufen von Übertragungslinsen in der Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration **10** verwendet, nutzt die Eigenschaften der Quadrupolfelder nicht direkt, sondern nutzt die durch Schwankungen der Elektronenbahn innerhalb der Quadrupolfelder erzeugte sekundäre Konkavlinsewirkung. Diese Konkavlinsewirkung wirkt gleichzeitig auf Elektronen in einer konvergierenden Bahn und auf Elektronen in einer divergierenden Bahn. Das heißt, bei einer einzigen Stufe von einem Quadrupolfeld kann die einer Konkavlinse eigene Funktion zur Korrektur chromatischer Aberration gleichzeitig auf Elektronen in x- und y-Bahnen wirken gelassen werden. Folglich können die Korrektorebenen in x- beziehungsweise y-Richtung gleichzeitig in Übereinstimmung mit der Chromatische-Aberrations-Einführungsebene der Objektivlinse gebracht werden. Die Korrektur chromatischer Aberration kann genau durchgeführt werden, ohne jegliche Neben-Aberrationen zu erzeugen.

Zweite Ausführungsform

[0034] Ein Beispiel der Konfiguration einer zu einer zweiten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung gehörenden Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration ist in [Fig. 2](#) gezeigt. In den beiden [Fig. 1](#) und [Fig. 2](#) sind gleiche Komponenten mit gleichen Bezugszeichen versehen, und Komponenten, die bereits beschrieben wurden, werden im Folgenden nicht erneut beschrieben.

[0035] In der in [Fig. 1](#) gezeigten Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration **10** ist es erforderlich, dass ein Gl. (15) erfüllendes Δ ermittelt wird und dass die zweite Multipol-Linse **14** entsprechend dem ermittelten Δ mechanisch fixiert wird. Dies hat weniger Spielraum beim Konstruieren der Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration zur Folge. Demgemäß können, wie in [Fig. 2](#) gezeigt, Justierungen zur Erfüllung der stigmatischen Bedingungen durchgeführt werden, indem eine Hilfslinse **17** zwischen der ersten Übertragungslinse **16** und der zweiten Übertragungslinse **18** angeordnet wird und die Stärke der Anregung der Hilfslinse **17** gesteuert wird, um die Brennweite der Hilfslinse **17** zu justieren, welche einen Hilfsvorgang durchführt.

[0036] In der in [Fig. 2](#) gezeigten Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration **10** liegen die Arbeitsebene der ersten Multipol-Linse **12** und die erste Übertragungslinse **16** um einen Abstand f , d. h. die Brennweite der ersten und der zweiten Übertragungslinse, auseinander. Die erste Übertragungslinse **16** und die Hilfslinse **17** liegen um einen Abstand f auseinander. Die Hilfslinse **17** und die zweite Übertragungslinse **18** liegen um einen Abstand f auseinander. Die Arbeitsebene der zweiten Übertragungslinse **18** und die Arbeitsebene der zweiten Multipol-Linse **14** liegen um einen Abstand $f - \Delta_s$ auseinander. Δ_s ist ein Wert in einem durch $f > \Delta_s > 0$ dargestellten Bereich und ist gegeben durch

$$\Delta_s > Z \left(\frac{2 \sin(\beta) \sinh(\beta)}{\beta (\cos(\beta) \sinh(\beta) + \sin(\beta) \cosh(\beta))} - 1 \right) \quad (22)$$

[0037] Das heißt, der Wert Δ_s wird größer als Δ , welches die stigmatischen Bedingungen der Gl. (15) erfüllt, eingestellt, und die Anordnung der Linsen wird entsprechend dem eingestellten Wert Δ_s justiert. Die Stärken der anderen Linsen als der Hilfslinse **17** sind die gleichen wie im Fall von [Fig. 1](#). Die Beziehung zwischen Δ und Δ_s ist gegeben durch

$$\Delta = \Delta_s - \frac{f^2}{f_A} \quad (23)$$

wobei f_A die Brennweite der Hilfslinse **17** ist. Gl. (23) bedeutet, dass mit zunehmender Stärke der Anregung der Hilfslinse **17** die Brennweite f_A abnimmt. Dies führt zu einer Wirkung, welche derjenigen, die man erhält, wenn Δ in [Fig. 1](#) verringert wird, gleichwertig ist. Wie in Gl. (22) gegeben, wurde Δ_s vorher höher als Δ , welches die stigmatischen Bedingungen erfüllt, eingestellt. Daher sollte die Stärke der Anregung der Hilfslinse **17** (d. h. die Brennweite f_A) so justiert werden, dass das aus Gl. (23) erhaltene Δ die durch Gl. (15) gegebenen stigmatischen Bedingungen erfüllt (d. h., die rechte Seite von Gl. (23) wird gleich der rechten Seite von Gl. (22)). Das heißt, Justierungen zur Erfüllung der stigmatischen Bedingungen können durch Steuern der Anregungsintensität der Hilfslinse **17** vorgenommen werden. Dies lässt mehr Spielraum beim Justieren der Vorrichtung zu. Die Funktion zur Korrektur chromatischer Aberration der in [Fig. 2](#) gezeigten Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration **10** ist genau die gleiche wie die in [Fig. 1](#) veranschaulichte Funktion.

[0038] Es versteht sich von selbst, dass die vorliegende Erfindung nicht auf die oben beschriebenen Ausführungsformen beschränkt ist und dass verschiedene Änderungen und Modifikationen möglich sind. Die vorliegende Erfindung umfasst Konfigurationen (z. B. in Funktion, Verfahren und Ergebnissen identische oder in Zweck und vorteilhaften Auswirkungen identische Konfigurationen), welche mit den in einer beliebigen der obigen Ausführungsformen beschriebenen Konfigurationen im Wesentlichen identisch sind. Außerdem umfasst die Erfindung Konfigurationen, welche abgesehen davon, dass ihre nichtwesentlichen Teile ersetzt wurden, den in einer beliebigen der obigen Ausführungsformen beschriebenen Konfigurationen gleichen. Weiter umfasst die Erfindung Konfigurationen, welche in vorteilhaften Auswirkungen identisch sind mit den oder welche das gleiche Ziel erreichen können wie die in einer beliebigen der obigen Ausführungsformen beschriebenen Konfigurationen. Ferner umfasst die Erfindung Konfigurationen, welche abgesehen davon, dass ein allgemein bekanntes Verfahren hinzugefügt ist, den in einer beliebigen der obigen Ausführungsformen beschriebenen Konfigurationen gleichen.

[0039] Zum Beispiel wird in der oben beschriebenen ersten und zweiten Ausführungsform eine Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration im Bildgebungssystem eines Transmissions-Elektronenmikroskops verwendet. Eine zur vorliegenden Erfindung gehörende Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration kann im Beleuchtungssystem eines Transmissions-Elektronenmikroskops verwendet werden. In diesem Fall sind die optischen Elemente der in den [Fig. 1](#) und [Fig. 2](#) gezeigten Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration **10** bezüglich der Probe S auf der Seite der Elektronenstrahlquelle spiegelsymmetrisch angeordnet. Die Anregungsintensitäten der optischen Elemente der Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration **10** sind genau die gleichen wie in den Beispielen der [Fig. 1](#) und [Fig. 2](#).

ZITATE ENHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Nicht-Patentliteratur

- P. W. Haukes, Quadrupoles in Electron Lens Design (Advance in Electronics & Electron Physics, Supplement 7), Academic Press (1970), New York und London [\[0003\]](#)
- Katsumi Ura, "Elektronen- und Ionenstrahloptik" (in Japanisch), Kyoritsu Publishing Company (1994), erste Ausg. [\[0003\]](#)

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration zum Korrigieren eines elektronenoptischen Systems eines Elektronenmikroskops hinsichtlich chromatischer Aberration, wobei die Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration aufweist:

eine erste und eine zweite Multipol-Linse zum Erzeugen von Quadrupolfeldern; und

eine erste und eine zweite Übertragungslinse jeweils mit einer Brennweite f ,

wobei die erste und die zweite Multipol-Linse auf entgegengesetzten Seiten der ersten und der zweiten Übertragungslinse angeordnet sind;

wobei der Abstand zwischen der ersten Multipol-Linse und der ersten Übertragungslinse $f - \Delta_1$ ist, der Abstand zwischen der ersten und der zweiten Übertragungslinse $2f$ ist und der Abstand zwischen der zweiten Übertragungslinse und der zweiten Multipol-Linse $f - \Delta_2$ ist; und

wobei die Korrekturvorrichtung so konstruiert ist, dass die Beziehung $f > \Delta_1 + \Delta_2 > 0$ gilt.

2. Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration nach Anspruch 1, wobei die Summe $\Delta = \Delta_1 + \Delta_2$ gegeben ist durch

$$\Delta = Z \left(\frac{2\sin(\beta)\sinh(\beta)}{\beta\cos(\beta)\sinh(\beta) + \sin(\beta)\cosh(\beta)} - 1 \right) \quad (\text{A})$$

$$\beta = \sqrt{C} Z \quad (\text{B})$$

wobei Z die entlang einer optischen Achse gemessene Länge der ersten und der zweiten Multipol-Linse ist und C eine Anregungsintensität der ersten und der zweiten Multipol-Linse ist.

3. Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration zum Korrigieren eines elektronenoptischen Systems eines Elektronenmikroskops hinsichtlich chromatischer Aberration, wobei die Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration aufweist:

eine erste und eine zweite Multipol-Linse zum Erzeugen von Quadrupolfeldern;

eine erste und eine zweite Übertragungslinse jeweils mit einer Brennweite f , und

eine Hilfslinse, auf deren entgegengesetzten Seiten die erste und die zweite Übertragungslinse angeordnet sind;

wobei die erste und die zweite Multipol-Linse auf entgegengesetzten Seiten der ersten und der zweiten Übertragungslinse angeordnet sind;

wobei der Abstand zwischen der ersten Multipol-Linse und der ersten Übertragungslinse f ist, der Abstand zwischen der ersten Übertragungslinse und der Hilfslinse f ist, der Abstand zwischen der Hilfslinse und der zweiten Übertragungslinse f ist und der Abstand zwischen der zweiten Übertragungslinse und der zweiten Multipol-Linse $f - \Delta_s$ ist; und

wobei die Korrekturvorrichtung so konstruiert ist, dass die Beziehung $f > \Delta_s > 0$ gilt.

4. Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration nach Anspruch 3, wobei das Δ_s gegeben ist durch

$$\Delta_s > Z \left(\frac{2\sin(\beta)\sinh(\beta)}{\beta\cos(\beta)\sinh(\beta) + \sin(\beta)\cosh(\beta)} - 1 \right) \quad (\text{C})$$

$$\beta = \sqrt{C} Z \quad (\text{D})$$

wobei Z die entlang einer optischen Achse gemessene Länge der ersten und der zweiten Multipol-Linse ist und C eine Anregungsintensität der ersten und der zweiten Multipol-Linse ist.

5. Verfahren zum Steuern einer Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration, welche ein elektronenoptisches System eines Elektronenmikroskops hinsichtlich chromatischer Aberration korrigiert,

wobei die Vorrichtung zur Korrektur chromatischer Aberration eine erste und eine zweite Multipol-Linse zum Erzeugen von Quadrupolfeldern, eine erste und eine zweite Übertragungslinse jeweils mit einer Brennweite f und eine Hilfslinse aufweist, wobei die erste und die zweite Multipol-Linse auf entgegengesetzten Seiten der ersten und der zweiten Übertragungslinse angeordnet sind und die erste und die zweite Übertragungslinse auf entgegengesetzten Seiten der Hilfslinse angeordnet sind,

wobei die erste Multipol-Linse, die zweite Multipol-Linse, die erste Übertragungslinse, die zweite Übertragungslinse und die Hilfslinse so angeordnet sind, dass der Abstand zwischen der ersten Multipol-Linse und der ersten Übertragungslinse f ist, der Abstand zwischen der ersten Übertragungslinse und der Hilfslinse f ist, der Abstand zwischen der Hilfslinse und der zweiten Übertragungslinse f ist und der Abstand zwischen der zweiten Übertragungslinse und der zweiten Multipol-Linse $f - \Delta_s$ ist, wobei das Verfahren den folgenden Schritt aufweist:

Steuern der Anregungsintensität der Hilfslinse, um die Brennweite f_A der Hilfslinse zu variieren, um Bedingungen zu erfüllen, welche gegeben sind durch

$$\Delta_s - \frac{f^2}{f_A} = Z \left(\frac{2 \sin(\beta) \sinh(\beta)}{\beta (\cos(\beta) \sinh(\beta) + \sin(\beta) \cosh(\beta))} - 1 \right) \quad (\text{E})$$

$$\beta = \sqrt{C} Z \quad (\text{F})$$

wobei Z die entlang einer optischen Achse gemessene Länge der ersten und der zweiten Multipol-Linse ist und C die Anregungsintensität der ersten und der zweiten Multipol-Linse ist.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

Fig. 2

