(19) **Bundesrepublik Deutschland**
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 695 33 341 T2** 2005.07.28

(12) # Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) **EP 0 669 538 B1**
(21) Deutsches Aktenzeichen: **695 33 341.0**
(96) Europäisches Aktenzeichen: **95 301 077.4**
(96) Europäischer Anmeldetag: **21.02.1995**
(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **30.08.1995**
(97) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung beim EPA: **11.08.2004**
(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **28.07.2005**

(51) Int Cl.[7]: **G01R 33/02**

(30) Unionspriorität:
2506594 23.02.1994 JP

(84) Benannte Vertragsstaaten:
DE, FR, GB

(73) Patentinhaber:
Hitachi, Ltd., Tokio/Tokyo, JP

(74) Vertreter:
Strehl, Schübel-Hopf & Partner, 80538 München

(72) Erfinder:
Suzuki, Hiroshi, Kokubunji-shi, JP; Shinada, Hiroyuki, Chofu-shi, JP; Kuroda, Katsuhiro, Hachioji-shi, JP; Yajima, Yusuke, Kokubunji-shi, JP; Takahashi, Yoshio, Kunitachi-shi, JP; Nakajima, Masato, Chofu-shi, JP; Saito, Hideo, Hachioji-shi, JP

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Messen eines Magnetfeldes und damit arbeitendes Ladungsteilchenstrahlgerät**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zum Messen des Magnetfelds mit einer hohen räumlichen Auflösung unter Verwendung eines Ladungsteilchenstrahls im Vakuum.

[0002] Der Magnetkopf wurde zum Ermöglichen einer erhöhten Kapazität der magnetischen Aufzeichnung zunehmend verkleinert. Es wurde über eine Technik zum Messen des in einem kleinen Bereich existierenden Magnetfelds, wie es von einem Magnetkopf erzeugt wird, unter Verwendung eines Ladungsteilchenstrahls berichtet.

[0003] Ein Beispiel für das Beobachten des durch einen Magnetkopf erzeugten Magnetfelds unter Verwendung eines Transmissionselektronenmikroskops ist in "IEEE Transaction on Magnetics", Band MAG-12, Nr. 1, Januar 1976, S. 34–39 beschrieben. Das in dieser Entgegenhaltung beschriebene Verfahren zum Messen eines Magnetfelds wurde durch die nachstehend beschriebene Prozedur ausgeführt. Zuerst wird ein Elektronenstrahl durch einen amorphen Film oder einen Kohlenstoffilm, der mit Silber beschichtet ist, geschickt, und eine photographische Platte wird mit einem Hellfeldbild dieses Films belichtet. Das auf diese Weise erhaltene Bild wird als ein Referenzbild verwendet. Als nächstes wird ein Magnetkopf unter einer Objektlinse in dem Mikroskop angeordnet, so daß der durch den Film geschickte Elektronenstrahl eine Fläche durchläuft, die das durch den Kopf erzeugte Magnetfeld aufweist. Dieselbe photographische Platte, die mit dem Referenzbild belichtet wird, wird auch mit dem so erhaltenen Hellfeldbild belichtet. Bei dem zweiten Hellfeldbild, mit dem die photographische Platte belichtet wird, erscheinen die Filmteilchen, verglichen mit dem Referenzbild, teilweise verzerrt. Dies liegt daran, daß die Bahn des Elektronenstrahls, der das Magnetfeld des Magnetkopfs durchlaufen hat, unter dem Einfluß der Lorentz-Kraft gebogen wird. Die photographische Platte wird durch Doppelbilder belichtet, wobei eines bei Nichtvorhandensein des Magnetfelds und das andere bei Vorhandensein des Magnetfelds, welches Informationen darüber enthält, daß der Elektronenstrahl durch das Magnetfeld gebogen wird, aufgenommen wird.

[0004] Die Intensität des Magnetfelds wird durch Einstrahlen eines Laserstrahls mit einem begrenzten Fleckdurchmesser auf die doppelt belichtete photographische Platte und durch Projizieren der Young-Interferenzstreifen auf einen auf der Rückseite angeordneten Schirm erfaßt. Es wird angenommen, daß die Anzahl und die Richtung der so projizierten Streifen die Intensität und die Richtung des der Position, die mit dem Laserstrahl bestrahlt wird, zugeordneten Magnetfelds darstellen.

[0005] Weiterhin ist in "IEEE Transaction on Magnetics", Band MAG-21, Nr. 5, September 1985, S. 1593–1595 ein Verfahren zum Messen eines Magnetfelds unter Verwendung einer dem Rasterelektronenmikroskop ähnlichen Vorrichtung offenbart. Dieses Verfahren wird nachstehend beschrieben.

[0006] Zuerst wird ein fokussierter Elektronenstrahl tastend über eine Ebene einer Magnetkopfprobe abgelenkt, die ein Magnetfeld erzeugt. Der Elektronenstrahl wird der Lorentz-Kraft unterzogen, und seine Bahn wird gebogen, während er das Magnetfeld durchläuft. Die Verschiebung des Elektronenstrahls wird gemessen, um Projektionsdaten eines Querschnitts des Magnetfelds bereitzustellen. Diese Messung wird durch Drehen des Magnetkopfs wiederholt ausgeführt. Die Projektionsdaten des Querschnitts des Magnetfelds wurden unter Verwendung der Computertomographietechnik verarbeitet, um dadurch die Richtung und den Betrag, d. h. die Magnetfeldverteilung des Magnetfelds an jedem Punkt im Raum, zu erhalten.

[0007] Weiterhin ist in "IEEE Transaction on Magnetics", Band MAG-28, Nr. 2, März 1992, S. 1017–1023 ein Verfahren offenbart, bei dem der Elektronenstrahl mit einem Vorrichtungsaufbau, der der vorstehend beschriebenen ähnelt, stroboskopisch gemacht wird, wobei der Strahl synchron mit dem bei einer hohen Frequenz betriebenen Magnetkopf erzeugt wird. Die Verschiebung infolge des Magnetfelds des stroboskopischen Elektronenstrahls wird durch einen Halbleiter-Positionsdetektor gemessen, und es wurde über ein dynamisches Ergebnis der Beobachtung der Magnetfeldverteilung des Magnetkopfs berichtet.

[0008] Es wurden vorstehend drei herkömmliche Techniken zum Messen des Magnetfelds beschrieben. Diese Verfahren weisen ihre jeweiligen Probleme auf.

[0009] Zunächst weist die vorstehend zuerst beschriebene Technik, bei der ein Transmissionselektronenmikroskop verwendet wird, zwei nachstehend beschriebene Probleme auf. Eines besteht darin, daß Informationen zu dem Magnetfeld nicht für jeden Punkt im Raum erhalten werden können. Die erhaltenen Magnetfeldinformationen sind ein integraler Wert des in dem Bereich, durch den der Elektronenstrahl geführt wurde, existierenden Magnetfelds. Dies liegt daran, daß alle Informationen über das Magnetfeld entlang dem Weg des Elek-

tronenstrahls auf die Bewegung von Teilchen auf der photographischen Platte konzentriert sind.

[0010] Ein weiteres Problem besteht darin, daß der breite Dynamikbereich der zu messenden Magnetfeldintensität nicht mit der hohen räumlichen Auflösung verträglich sein kann. Dies ist auf den nachstehend erwähnten Grund zurückzuführen.

[0011] Der Fleckdurchmesser des die photographische Platte bestrahlenden Laserstrahls entspricht der räumlichen Auflösung der Messung, und die räumliche Auflösung ist umso höher, je kleiner der Fleckdurchmesser ist. Für die Erzeugung von Young-Interferenzstreifen ist es jedoch erforderlich, daß das Bild der durch das Magnetfeld auf der photographischen Platte bewegten Teilchen in dem Fleck des Laserstrahls enthalten ist. Der Fleckdurchmesser des Laserstrahls muß daher größer sein als die von der Bewegung der Teilchen abgedeckte Fläche. Wenn versucht wird, den Linienintegralwert eines großen Magnetfelds zu messen, wird die räumliche Auflösung verschlechtert. Falls der für die Magnetfeldintensität des Magnetkopfs erforderliche Dynamikbereich erhalten werden soll, beträgt die räumliche Auflösung, die erhalten werden kann, beispielsweise nur etwa 10 μm.

[0012] Weiterhin treten bei den zwei herkömmlichen Techniken, die vorstehend beschrieben wurden, und bei denen das Rasterelektronenmikroskop verwendet wird, zwei nachstehend beschriebene Probleme auf.

[0013] Ein Problem besteht darin, daß die räumliche Auflösung auf 0,1 μm begrenzt ist, wenngleich sie gegenüber dem Stand der Technik verbessert ist. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die räumliche Auflösung vom Durchmesser des das Magnetfeld durchsetzenden Elektronenstrahls abhängt und daß der Strahldurchmesser nicht weiter verringert werden kann.

[0014] Ein weiteres Problem besteht darin, daß die Meßgrenze in dem Bereich, der der Probe, die das Magnetfeld erzeugt, am nächsten liegt, 0,2 μm beträgt und daß die Messung im näheren Bereich unmöglich ist. Für die Bereiche, die der durch die bekannte Technik zu messenden Probe am nächsten liegen, muß ein fokussierter Elektronenstrahl in der Nähe der Probe tastend abgelenkt werden. Bei einem Versuch, den Elektronenstrahl zu nahe an dem Bereich, der einer Probenebene am nächsten liegt, tastend abzulenken, wird jedoch bewirkt, daß der Elektronenstrahl die Probe berührt, wodurch die Messung unmöglich gemacht wird. Dies liegt an der Grenze der Positioniergenauigkeit des Elektronenstrahls und der Tatsache, daß die Probe und der Elektronenstrahl durch Drifts zueinander verschoben werden.

[0015] In US-A-5 075 623 ist ein Verfahren zum Messen eines Magnetfelds offenbart, wobei dem ein Ladungsteilchenstrahl an einer Probe vorbeigesendet und zur Erzeugung eines Bilds detektiert wird. Die Probe ist ein Magnetkopf, der ein Magnetfeld zum Verschieben des Strahls erzeugt. Es ist auf diese Weise möglich, das Streumagnetfeld des Kopfs zu messen. Die Offenbarung von US-A-5 075 623 ist weiter in einem Artikel "Measurement Technology of Three-Dimensional Magnetic Stray Field", von Jin'ichi Matsuda, veröffentlicht in JEE Journal of Electronic Engineering, Band 26, Nr. 270 im Juni 1989 und in einem Artikel "A Three-Dimensional Reconstruction of Stray Magnetic Fields of a Magnetic Head by Electron Beam Tomography" von Jin'ichi Matsuda, veröffentlicht in IEEE Translation Journal on Magnetics in Japan, Band 6, Nr. 10 vom 1. Oktober 1991 erörtert.

[0016] Gemäß einem ersten Aspekt der Erfindung ist vorgesehen: ein Verfahren zum Messen eines Magnetfelds mit den folgenden Schritten:
Übertragen eines Ladungsteilchenstrahls durch eine Referenzprobe, Erstellen eines Bilds aus dem Ladungsteilchenstrahl mit gewünschter Vergrößerung und Erfassen eines ersten Bilds,
Speichern des so erfaßten ersten Bilds,
Schicken des Ladungsteilchenstrahls durch einen ein zu messendes Magnetfeld enthaltenden Bereich, Erstellen eines Bilds mit einer gewünschten Vergrößerung aus dem vom zu messenden Magnetfeld abgelenkten Ladungsteilchenstrahl und Erfassen eines zweiten Bilds,
Speichern des erfaßten zweiten Bilds,
Verarbeiten des ersten und des zweiten gespeicherten Bilds und Bestimmen der Verschiebung oder des Ablenkwinkels des Ladungsteilchenstrahls, und
Bestimmen des zu messenden räumlichen Magnetfelds mittels auf der Verschiebung oder dem Ablenkwinkel basierender Berechnungen.

[0017]
Gemäß einem zweiten Aspekt der Erfindung ist vorgesehen: eine Ladungsteilchenstrahlvorrichtung, welche aufweist:

eine Einrichtung zum Erzeugen eines Ladungsteilchenstrahls,
eine Einrichtung zum Fokussieren des Ladungsteilchenstrahls,
eine Referenzprobe zur Übertragung des Ladungsteilchenstrahls für die Erstellung eines Bilds,
eine Halterung zum Befestigen der Referenzprobe,
ein Gestell zum Anordnen einer Probe an einer gewünschten Position zum Erzeugen eines zu messenden Magnetfelds, wobei die Probe so angeordnet ist, daß der Ladungsteilchenstrahl das Magnetfeld durchquert,
eine Einrichtung zum Erstellen eines Bilds der Referenzprobe durch die Übertragung des Ladungsteilchenstrahls, wobei das Bild eine gewünschte Vergrößerung aufweist, und zum Erfassen des ersten Bilds,
eine Einrichtung zum Speichern des so erfaßten ersten Bilds,
eine Einrichtung zum Erstellen eines ersten Bilds mit der gewünschten Vergrößerung aus dem durch das zu messende Magnetfeld abgelenkten Ladungsteilchenstrahl und zum Erfassen eines zweiten Bilds,
eine Einrichtung zum Speichern des so erfaßten zweiten Bilds,
eine Einrichtung zum Verarbeiten des ersten und des zweiten Bilds und zum Bestimmen der Verschiebung oder des Ablenkwinkels des Ladungsteilchenstrahls, und
eine Einrichtung zum Bestimmen eines zu messenden räumlichen Magnetfelds mittels auf der Verschiebung oder dem Ablenkwinkel beruhender Berechnungen.

[0018] Die vorliegende Erfindung ermöglicht es demgemäß, die Magnetfeldverteilung an jedem Punkt im Raum in dem Bereich, der der Probenebene am nächsten liegt, mit hoher Auflösung, einer hohen Magnetfeldempfindlichkeit und einem breiten Dynamikbereich zu bestimmen.

[0019] Um das vorstehend beschriebene Verfahren zum Messen eines Magnetfelds zu verwirklichen, weist eine tatsächliche Ladungsteilchenstrahlvorrichtung einen Mechanismus zum Ändern des Abstands zwischen einer zu messenden Probe und einem Detektor auf, wodurch die dreidimensionale Intensitätsverteilung des von einer magnetischen Linse erzeugten Magnetfelds gemessen wird, um die Linseneigenschaften zu beurteilen. Ein elektrisches Feld kann mit der gleichen Wirkung an Stelle des Magnetfelds verwendet werden. In diesem Fall werden die Linseneigenschaften anhand der dreidimensionalen Intensitätsverteilung des elektrischen Felds der elektrostatischen Linse beurteilt.

[0020] Zuerst wird das Prinzip erklärt, nach dem das unter Verwendung eines Ladungsteilchenstrahls erhaltene Bild einer Referenzprobe durch das auf dem Ausbreitungsweg des Ladungsteilchenstrahls auftretende Magnetfeld verzerrt wird. Es wird angenommen, daß die Ladungsteilchen eine Ladung e, eine Masse m und eine elektrostatische Feldintensität E, eine magnetische Flußdichte B und eine Geschwindigkeit v aufweisen. Es gilt die Newtonsche Bewegungsgleichung $m(dv/dt) = eE + e[v \cdot B]$. Unter der Annahme, daß die elektrostatische Feldintensität E 0 ist und nur ein Magnetfeld existiert, wird die Newtonsche Bewegungsgleichung in der Form $m(dv/dt) = e[v \cdot B]$ erhalten.

[0021] Fig. 2 zeigt das Prinzip, nach dem ein einziger Ladungsteilchenstrahl **41** durch das Magnetfeld abgelenkt wird. Es sei ein Magnetfeld **42** mit einer gleichmäßigen Komponente in einer einzigen Richtung angenommen, die als Y angenommen wird. Es sei auch angenommen, daß die Ausbreitungsrichtung z des Ladungsteilchenstrahls **41** zur Richtung y senkrecht steht. Weiterhin wird angenommen, daß die zu z und y senkrechte Richtung x ist. Wenn das gleichmäßige Magnetfeld **42** über die Länge l entlang der Richtung z existiert, wird der Ladungsteilchenstrahl **41** der Lorentz-Kraft Fx unterzogen, wenn er die Länge l durchquert, wodurch eine Winkeländerung der Ausbreitungsrichtung hervorgerufen wird. Die Lorentz-Kraft wird durch $Fx = m(dv_x/dt) = e[v_z \cdot B]$ ausgedrückt, und die Winkeländerung $d\theta$ wird durch $d\theta \approx eBl/mv_z$ angenähert. Diese Winkeländerung geschieht in der x-z-Ebene. Infolge dieser Winkeländerung wird die Position, an der der Ladungsteilchenstrahl **41** einen Schirm **43** in einem Abstand L von der Position des Magnetfelds **42** erreicht, verglichen mit dem Fall, in dem kein Magnetfeld vorhanden ist, um $dx = d\theta L$ verschoben.

[0022] Fig. 3 ist ein Diagramm zur Erklärung der Art, in der in gleichen Abständen voneinander erzeugte parallele Ladungsteilchenstrahlen **41** ein Magnetfeld **42** mit einer ungleichmäßigen Intensität durchlaufen. Bei den Ladungsteilchenstrahlen **41** ändert sich im Vergleich zu dem Fall, in dem kein Magnetfeld vorhanden ist, der Ankunftspunkt auf dem Schirm **43**, so daß die Abstände zwischen den Ladungsteilchenstrahlen **41**, die vor dem Durchlaufen des Magnetfelds **42** gleich waren, nun verschieden sind. Mit anderen Worten werden die Abstände verzerrt.

[0023] Wenn ein Bild einer Referenzprobe verwendet wird, werden Ladungsteilchenstrahlen mit unterschiedlichen Helligkeiten im wesentlichen parallel zueinander in einer Ebene durch das Magnetfeld geschickt. Es seien einzelne Ladungsteilchenstrahlen mit unterschiedlichen Helligkeiten in derselben Ebene betrachtet. Das Prinzip, nach dem das Bild verzerrt wird, kann in der gleichen Weise wie vorstehend beschrieben erklärt wer-

den. Genauer gesagt, werden die Ankunftspunkte der von einzelnen Bereichen in einer Probenebene erzeugten Ladungsteilchenstrahlen durch das auf dem Weg der Ladungsteilchenstrahlen existierende ungleichmäßige Magnetfeld in unterschiedlicher Weise verschoben. Daher wird das gesamte Bild der Referenzprobe verzerrt beobachtet. Dies ist das Prinzip, nach dem das unter Verwendung von Ladungsteilchenstrahlen erhaltene Bild einer Referenzprobe durch das auf dem Ausbreitungsweg der Ladungsteilchenstrahlen vorhandene Magnetfeld verzerrt wird.

[0024] Die Bestimmung eines Magnetfelds anhand eines verzerrten Bilds einer Referenzprobe ist der umgekehrte Prozeß. Genauer gesagt, kann, sofern die Verschiebung dx des Ankunftspunkts eines Ladungsteilchenstrahls anhand des verzerrten Bilds einer Referenzprobe erfaßt werden kann, auch der Ablenkwinkel dθ des Ladungsteilchenstrahls bestimmt werden. Überdies kann der Linienintegralwert Bl des Magnetfelds anhand dθ bestimmt werden. Die durch den Ladungsteilchenstrahl erhaltenen hochauflösenden Bildinformationen für einen Bereich, der der Probe am nächsten liegt, werden durch Bildverarbeitung mit einem Computer unter Verwendung eines Mustermatchingvorgangs behandelt. Bei diesem Vorgang entspricht die räumliche Auflösung der Größe eines ein Referenzbild bereitstellenden dritten Bilds (Schablonenbilds). Weiterhin entspricht der Dynamikbereich der Intensität des zu messenden Magnetfelds der Größe eines Bereichs im ersten Bild (Originalbild), in dem ein Schablonenbild durch Mustermatching untersucht wird. Diese beiden Größen können unabhängig voneinander behandelt werden, und die räumliche Auflösung kann daher vom Dynamikbereich getrennt werden. Folglich kann eine Messung der Magnetfeldverteilung mit einer hohen räumlichen Auflösung und einem breiten Dynamikbereich verwirklicht werden.

[0025] Nachstehend wird ein Bildverarbeitungsverfahren zum Erfassen der Verschiebung dx, d. h. des Ablenkbetrags des Ankunftspunkts des Ladungsteilchenstrahls, durch Vergleichen des ersten Bilds (Originalbilds) und des zweiten Bilds (des verzerrten Referenzbilds) dargelegt.

[0026] Zuerst werden Ladungsteilchenstrahlen durch eine Referenzprobe geschickt, um ein Kontrastbild der Probe zu erzeugen. Die Referenzprobe wird so ausgewählt, daß das Bild eine Anzahl von durch Teilchen erzeugten Helligkeitskontrasten enthält, die in einer Ebene unregelmäßig sind. Das Bild enthält Informationen über den Linienintegralwert des Magnetfelds bei jeder Höhe von einer das Magnetfeld erzeugenden Probenebene. Aus diesen Informationen wird ein kleiner Bereich extrahiert, um das Muster eines Bilds in dem Bereich und die Koordinate des bestimmten Punkts, beispielsweise die Koordinate (xs, ys) an einem oberen linken Punkt, zu erkennen. Die Größe des extrahierten Bilds entspricht der räumlichen Auflösung, und das Ergebnis ist daher umso besser, je kleiner der extrahierte Bereich ist. Es muß jedoch sichergestellt werden, daß die Größe dieses Bereichs derart ist, daß er einige Teilchen als Elemente enthält, welche eine Extraktion von Merkmalen zulassen.

[0027] Als nächstes wird eine ein Magnetfeld erzeugende Probe so zwischen einer Referenzprobe und einer Bildebene angeordnet, daß die Ladungsteilchenstrahlen mit einem begrenzten Durchmesser, die sich im wesentlichen parallel ausbreiten, das Magnetfeld und einen Bereich, der die das Magnetfeld erzeugende Probe enthält, durchlaufen.

[0028] Die das Magnetfeld durchlaufenden Ladungsteilchenstrahlen, welche unter dem Einfluß der Lorentz-Kraft abgelenkt werden, werden als ein zuvor erzeugtes Filmbild, das teilweise verzerrt ist, beobachtet. Dieses durch das Magnetfeld verzerrte Bild wird aufgenommen, und ein Bereich mit einem Muster, das dem Muster des zuvor erkannten extrahierten Bilds am stärksten ähnelt, wird durch Mustermatching herausgesucht. Die Koordinate (xp, yp) des bestimmten Punkts wird erkannt. Die Differenz zwischen dem zuvor erkannten Punkt und dem dieses Mal erkannten Punkt liefert die Änderung des Ankunftspunkts der Ladungsteilchenstrahlen, d. h. die Verschiebung dx.

[0029] Das Mustermatching kann durch ein Verfahren, bei dem die Anzahl der in den Bereichen übereinstimmenden oder nicht übereinstimmenden Pixel gezählt wird, durch ein Verfahren, bei dem die Helligkeitsdifferenz zwischen Pixeln bestimmt wird, oder durch ein Verfahren, bei dem der Kreuzkorrelationskoeffizient berechnet wird, ausgeführt werden. Als eine andere Alternative kann eine Fourier-Transformation mit den überlappten Bildern im Fall eines schwachen Magnetfelds verwendet werden.

[0030] Weiterhin wird der Ablenkwinkel dθ wie vorstehend beschrieben anhand der Verschiebung dx erhalten, und der Linienintegralwert Bl für das Magnetfeld anhand des Ablenkwinkels dθ bestimmt.

[0031] Wenn das erste Bild, d. h. das wegen eines nicht vorhandenen Magnetfelds nicht verzerrte ursprüngliche Bild nicht verwendet wird, wird der Ablenkwinkel dθ in der nachstehend beschriebenen Weise bestimmt.

[0032] Wenn ein einziger Ladungsteilchenstrahl vorhanden ist, wird der durch das zu messende Magnetfeld abgelenkte Ladungsteilchenstrahl durch einen mit einer zweidimensionalen Ebene arbeitenden Positionsdetektor, der an einem unteren Punkt installiert ist, erfaßt. Dieser Detektor wird parallel zur Ausbreitungsrichtung des Ladungsteilchenstrahls bewegt, und der Abstand vom Magnetfeld wird geändert, um die Verschiebung dx zu messen. Dementsprechend werden die Ablenkpunkte der Ladungsteilchenstrahlen für zwei Querschnitte unter der Annahme bestimmt, daß die Detektionsebene des Detektors ein räumlicher Querschnitt ist. Weil sich der Ladungsteilchenstrahl linear in einem Bereich mit einem Detektor ausbreitet, wird eine Gerade bestimmt, die durch zwei angenommene räumliche Punkte der gemessenen Ablenkung verläuft. Der Winkel, den die so erhaltene Gerade mit der Ausbreitungsrichtung des Ladungsteilchenstrahls vor der Ablenkung bildet, liefert den Ablenkwinkel dθ des Ladungsteilchenstrahls. Wenn die Anzahl der Messungen des Ablenkpunkts für eine erhöhte Anzahl räumlicher Querschnitte erhöht wird, nimmt auch die Anzahl der Punkte im Raum zu. Eine Gerade wird unter Verwendung einer durch die Methode der kleinsten Quadrate vorgenommenen Näherung des Ablenkwinkels dθ bestimmt.

[0033] Auch in dem Fall, in dem mehrere Ladungsteilchenstrahlen zu einer Zeit durch das Magnetfeld geschickt werden oder ein Ladungsteilchenstrahl mit einem begrenzten Durchmesser, der in einer Ebene ein Helligkeitskontrastmuster aufweist, durch das Magnetfeld geschickt wird, wird ein zweidimensionales Bild unter Verwendung einer Bildaufnahmevorrichtung erzeugt. Auch in diesem Fall wird die Bildaufnahmevorrichtung, wie im vorstehend erwähnten Fall, parallel zur Ausbreitungsrichtung der Ladungsteilchenstrahlen bewegt, um mehrere Bilder zu erzeugen. Wenn davon ausgegangen wird, daß mehrere helle oder dunkle Punkte in einem einzigen Bild beobachtet werden, werden mehrere durch diese Punkte im Raum konfigurierte Geraden unter Verwendung der Hough-Transformation bestimmt. Der Winkel, den jede der so bestimmten Geraden mit der Ausbreitungsrichtung der Ladungsteilchenstrahlen vor der Ablenkung bildet, liefert den Ablenkwinkel dθ mit jeder Geraden. Auf diese Weise kann der Ablenkwinkel dθ des Ladungsteilchenstrahls infolge des Magnetfelds in einem Bereich mit einer gegebenen Größe zu einer Zeit gemessen werden, um dadurch den Linienintegralwert Bl des Magnetfelds zu bestimmen.

[0034] Zum Bestimmen der Intensität des Magnetfelds an jedem Punkt eines Querschnitts im Raum wird der anhand der vorstehend erwähnten Prozedur erhaltene Ablenkwinkel dθ des Ladungsteilchenstrahls infolge des Magnetfelds als Projektionsdaten angenommen, oder es wird der anhand der vorstehend erwähnten Prozedur erhaltene Linienintegralwert Bl des Magnetfelds als Projektionsdaten angenommen, und die Verteilung des Magnetfeld-Querschnitts wird durch die Computertomographietechnik rekonfiguriert. Zu diesem Zweck wird der Ablenkwinkel dθ infolge des Magnetfelds der Ladungsteilchen an einer Anzahl n von Punkten entlang der Richtung des Querschnitts des dadurch zu messenden Magnetfelds erfaßt, um Daten über den Ablenkwinkel dθ zu sammeln. Die Richtung des Querschnitts wird beispielsweise als x angenommen. Weiterhin wird das Bild eines durch das Magnetfeld verzerrten Referenzfilms aus jeder Richtung des Magnetfelds aufgenommen, und der Ablenkwinkel des Ladungsteilchenstrahls wird durch die Bildverarbeitung bestimmt, wobei die sich ergebende Figur als die Projektionsdaten für das Magnetfeld verwendet wird. Diese Bilder werden so aufgenommen, daß das Magnetfeld in Einheiten von einigen Grad beispielsweise um 180 Grad um die vertikale Achse des Querschnitts des zu messenden Magnetfelds gedreht wird. Die Daten über den Ablenkwinkel werden aus verschiedenen Winkeln in bezug auf den Querschnitt des Magnetfelds anhand dieser Bilder in der vorstehend beschriebenen Weise erhalten. Die Winkelrichtung in bezug auf das Magnetfeld für die Zeit der Bildaufnahme wird als ψ_m angenommen, und die Daten über den Ablenkwinkel werden als $d\theta(x_n, \psi_m)$ ausgedrückt. Mit diesen Daten als Projektionsdaten für das Magnetfeld wird die Computertomographieoperation ausgeführt, um die Querschnittsverteilung des Magnetfelds zu berechnen. Wenn die Schablonenfläche zum Extrahieren der Daten für den Ablenkwinkel klein ist, kann die Magnetfeldverteilung mit einer hohen räumlichen Auflösung gemessen werden. Wenn ein kleiner Ablenkwinkel erfaßt werden kann, kann die Empfindlichkeit des Magnetfelds verbessert werden. Auch dann, wenn die Erfassung eines großen Ablenkwinkels möglich ist, kann ein großer Dynamikbereich der zu messenden Magnetfeldintensität sichergestellt werden.

[0035] Für die Verwirklichung der Messung der Magnetfeldverteilung für den Bereich, der einer Probenebene am nächsten liegt, wird ein Bild verwendet, das dem Schatten einer das Magnetfeld erzeugenden Probe am nächsten liegt. Diese Position enthält die Magnetfeldinformationen für einen Bereich, der der das Magnetfeld erzeugenden Probenebene am nächsten liegt. Das Bild eines einer Probenebene am nächsten liegenden Bereichs wird extrahiert, um das Magnetfeld ganz in der Nähe der ein Magnetfeld erzeugenden Probe zu bestimmen.

[0036] Weiterhin ist eine ähnliche Messung der Intensitätsverteilung durch Ablenken des Ladungsteilchenstrahls durch das elektrische Feld E statt durch das Magnetfeld B möglich.

[0037] Auf diese Weise können die Eigenschaften einer elektrostatischen Linse oder einer magnetischen Linse durch Messen der dreidimensionalen Intensitätsverteilung entweder des elektrischen Felds oder des Magnetfelds der elektrostatischen Linse oder der magnetischen Linse durch diese Vorrichtung beurteilt werden.

[0038] In den Zeichnungen zeigen:

[0039] Fig. 1 ein Diagramm, in dem eine erste Ausführungsform der Erfindung dargestellt ist,

[0040] Fig. 2 ein Diagramm zum Erklären der Ablenkung eines Ladungsteilchenstrahls infolge eines Magnetfelds,

[0041] Fig. 3 ein Diagramm zum Erklären der Bildverzerrung infolge eines Magnetfelds,

[0042] die Fig. 4A und Fig. 4B Diagramme, in denen ein Beispiel eines Referenzbilds und eines verzerrten Referenzbilds dargestellt ist,

[0043] Fig. 5 ein Diagramm, in dem ein durch den Computer quantisiertes Schablonenbild dargestellt ist,

[0044] Fig. 6 ein Diagramm, in dem ein durch den Computer quantisiertes Matchingbild dargestellt ist,

[0045] Fig. 7 ein Diagramm, in dem ein Beispiel der gemäß der vorliegenden Erfindung gemessenen Magnetfeldverteilung dargestellt ist,

[0046] Fig. 8 ein Diagramm, in dem ein Beispielbild zum Erklären einer zweiten Ausführungsform der Erfindung dargestellt ist,

[0047] Fig. 9 ein Diagramm, in dem eine dritte Ausführungsform der Erfindung dargestellt ist,

[0048] die Fig. 10A bis Fig. 10D Diagramme, in denen ein Beispielbild zum Erklären einer sechsten Ausführungsform der Erfindung dargestellt ist,

[0049] Fig. 11 ein Diagramm, in dem ein Beispielbild zum Erklären einer siebten Ausführungsform der Erfindung dargestellt ist,

[0050] Fig. 12 ein Diagramm zum Erklären einer achten Ausführungsform der Erfindung,

[0051] die Fig. 13A und Fig. 13B Diagramme zum Erklären der Verschiebung und des Ablenkwinkels,

[0052] Fig. 14 ein Diagramm zum Erklären des dreidimensionalen Raums, in dem ein heller Fleck beobachtet wird,

[0053] Fig. 15 ein Diagramm zum Erklären einer neunten Ausführungsform der Erfindung,

[0054] die Fig. 16A bis Fig. 16C Diagramme, in denen mehrere helle Flecke als ein im dreidimensionalen Raum beobachtetes Beispiel dargestellt sind, und

[0055] Fig. 17 ein Diagramm zum Erklären des Falls, in dem ein Film gemäß der neunten Ausführungsform der Erfindung verwendet wird.

Erste Ausführungsform

[0056] Die Magnetfeldverteilung in der Nähe einer ein Magnetfeld erzeugenden Ebene wird anhand eines Hellfeldbilds eines Films, das durch Schicken eines Ladungsteilchenstrahls durch eine Filmprobe erhalten wird, und eines Hellfeldbilds, das mit einem zu messenden Magnetfeld verzerrt ist, welches auf dem Weg des Ladungsteilchenstrahls, der durch den Film gesendet wurde, angeordnet ist, gemessen. Diese Ausführungsform ist in Fig. 1 dargestellt. Gemäß dieser Ausführungsform wird ein Elektronenstrahl als der Ladungsteilchenstrahl verwendet. Eine ähnliche Messung ist auch unter Verwendung eines Dunkelfeldbilds möglich, wenngleich die Erklärung für den Fall der Verwendung eines Hellfeldbilds gegeben wird.

[0057] In Fig. 1 wird ein Elektronenstrahl **12a** von einer Elektronenstrahlquelle **11** erzeugt und durch eine Fo-

kussierlinse **13** und weiter durch eine Referenzprobe **14** eines Films gesendet. Der so übertragene Elektronenstrahl **12b** wird durch eine Objektlinse **15** gesendet, um ein Hellfeldbild des Films auf einer Bildebene **24** zu erzeugen. Das auf diese Weise gebildete Hellfeldbild wird durch eine Zwischenlinse **17** und eine Vergrößerungslinse **18** mit einer gewünschten Vergrößerung M versehen und von einer Kamera **19** aufgenommen. Das so aufgenommene Bild wird in einem Speicher **20** (**201**) gespeichert. Dieses Bild wird anschließend als ein Referenzbild bezeichnet.

[0058] Gemäß dieser Ausführungsform wird ein Magnetkopf **25** als eine Probe zum Erzeugen eines zu messenden Magnetfelds **16** verwendet. Wenn die Luftträgerfläche des Magnetkopfs **25** parallel zur Richtung des Fortschreitens des Elektronenstrahls gesetzt ist, befindet sich der Magnetkopf **25** an der mit **16a** in Fig. 1 bezeichneten Position, und eine Ansteuereinrichtung **26** wird betätigt, um ein Magnetfeld zu erzeugen. Bei Vorhandensein eines zu messenden Magnetfelds wird der übertragene Elektronenstrahl **12b** der Lorentz-Kraft unterzogen, und seine Bahn wird gekrümmt. Dadurch wird das in der Bildebene **24** gebildete Hellfeldbild verzerrt. Das in der Bildebene **24** erzeugte verzerrte Bild wird durch die Zwischenlinse **17** und die Vergrößerungslinse **18** mit der gewünschten Vergrößerung M versehen und anschließend von der Kamera **19** aufgenommen. Das so aufgenommene Bild wird ebenso wie das Referenzbild im Speicher **20** (**202**) gespeichert. Dieses Bild wird anschließend als das verzerrte Referenzbild bezeichnet.

[0059] Die in dem Speicher gespeicherten Bilder, welche durch ein Modell dargestellt sind, umfassen ein in Fig. 4A dargestelltes Referenzbild und ein in Fig. 4B dargestelltes verzerrtes Referenzbild. Die unterbrochene Linie und die durchgezogene Linie in Fig. 4A sind jedoch zu Erklärungszwecken hinzugefügt und in einem tatsächlichen Bild nicht vorhanden. Die Kreise und Ellipsen verschiedener Größen, die in den Fig. 4A und Fig. 4B dargestellt sind, stellen Teilchen einer Referenzprobe (**14** in Fig. 1) dar und haben keine Regelmäßigkeit in der Anordnung oder Größe einzelner Teilchen. Die schraffierte Position im unteren Teil von Fig. 4B stellt den Schatten des installierten Magnetkopfs (**25** in Fig. 1) dar. Die in **Fig.** 4 dargestellten Teilchen sind in den Außenbereichen schwarz und in den Innenbereichen weiß dargestellt. Die nachfolgende Bildverarbeitung ist jedoch selbst in dem Fall möglich, in dem die Teilchen innen schwarz sind oder Helligkeitstöne aufweisen. Ein Bild dieser Teilchen kann leicht in dem Fall erhalten werden, in dem das die Teilchen bildende Material von dem Material in dem Bereich, in dem keine Teilchen beobachtet werden, verschieden ist.

[0060] Anschließend wird der folgende Prozeß an einem Bildverarbeitungsabschnitt **21** ausgeführt. Dies wird mit Bezug auf **Fig.** 4 erklärt. Zuerst wird das Referenzbild in kleine Flächen unterteilt, die jeweils untersucht werden. Wie in Fig. 4A dargestellt ist, wird das Referenzbild in sechs Flächen für die X- und die Y-Richtung unterteilt, wobei diese jeweils mit x1 bis x6 und y1 bis y6 bezeichnet sind. Diese kleinen Flächen sind durch unterbrochene Linien bzw. durchgezogene Linien definiert. Jede kleine Fläche weist mehrere kreisförmige oder elliptische Teilchen auf, deren Größe und Form unregelmäßig sind und deren Anordnung nicht periodisch ist.

[0061] Anschließend wird dieses Bild durch den Computer quantisiert und von diesem erkannt, so daß eine gegebene kleine Fläche beispielsweise 16 × 16 Pixeln entspricht. Der Computer wurde veranlaßt, die gesamten Bilder in den Fig. 4A und Fig. 4B mit insgesamt 96 × 96 Pixeln zu erkennen. In dem Referenzbild aus Fig. 4A sei eine kleine Fläche (anschließend als $T_{(3, 4)}$ bezeichnet) mit x3 in X-Richtung und y4 in Y-Richtung betrachtet. Für diese kleine Fläche $T_{(3, 4)}$ wird jedes der 16 × 16 Pixel durch 1-Bit-Daten, die entweder 0 oder 1 sind, bezeichnet. Das vom Computer erkannte Bild ist in Fig. 5 dargestellt. Die weißen Bereiche entsprechen 0-Daten, und die schwarzen Bereiche entsprechen 1-Daten.

[0062] Im nächsten Schritt wird in dem verzerrten Referenzbild aus Fig. 4B, das früher mit 96 × 96 Pixeln erkannt wurde, ein Punkt mit einem Muster, das dem Muster aus Fig. 5 ähnelt, gesucht, und es werden die Koordinaten für den bestimmten Punkt festgestellt. Um einen Punkt mit dem gleichen Muster zu suchen, wird ein nachstehend beschriebener Mustermatchingvorgang ausgeführt. Gemäß diesem Verfahren wird zuerst die kleine Fläche $T_{(3, 4)}$ des Referenzbilds als ein Schablonenbild verwendet, das einer gegebenen Fläche des verzerrten Referenzbilds überlappt wird. Die Flächengröße eines Bereichs, an dem Daten jedes Pixels übereinstimmen oder nicht übereinstimmen, wird bestimmt. Die Überlappungsfläche, in der die Größe einen Maximal- oder einen Minimalwert annimmt, wird als ein Bereich bestimmt, zu dem sich das Schablonenbild bewegt hat.

[0063] Gemäß der betrachteten Ausführungsform wird die Anzahl der Pixel, an denen Daten wie 1 übereinstimmen, gezählt, statt daß die Fläche bestimmt wird. Um die für den Matchingvorgang erforderliche Zeit zu sparen, werden die Flächen, in denen das Matching ausgeführt wird, andererseits auf einen Bereich begrenzt, in dem der Elektronenstrahl **12** wahrscheinlich abgelenkt wird. Im vorliegenden Fall ist die Fläche als eine definiert, die von der Position des ursprünglichen Schablonenbilds ±8 Pixel in X- und Y-Richtung abdeckt. Diese

Fläche wird quantisiert, und das Erkennungsergebnis ist in Fig. 6 dargestellt. Alle Pixel, die für das Matching des Schablonenbilds mit 16 × 16 Pixeln im Bereich von ±8 Pixeln erforderlich sind, sind 32 × 32. Die Flächen, die in Fig. 6 durch dicke durchgezogene Linien definiert sind, geben an, wo sich bei Abwesenheit eines zu messenden Magnetfelds eine Schablone des Referenzbilds befindet.

[0064] Um die Überlappungsposition des Schablonenbilds auf einem verzerrten Referenzbild durch Koordinaten festzulegen, wird eine obere linke Pixelposition als Referenz verwendet. Gemäß dieser Ausführungsform wird der gleiche Punkt, an dem das Schablonenbild in dem Referenzbild zuerst aufgetreten ist, in dem verzerrten Referenzbild zuerst gesucht, und die Koordinate des oberen linken Pixels des so überlappten Schablonenbilds wird mit (0, 0) bezeichnet. Dieses Schablonenbild wird um ±8 Pixel in X- und Y-Richtung bewegt, und die Anzahl der Pixel, an denen Daten 1 übereinstimmen, wird gezählt. Die Koordinate ist an der oberen linken Position in Fig. 6 dargestellt. Weiterhin ist das Zählergebnis in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1

Y \ X	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
8	7	6	6	8	7	5	5	4	6	12	9	5	6	7	4	3	7
7	4	3	3	6	6	4	4	9	7	5	5	6	6	6	4	5	4
6	6	5	6	6	3	4	6	4	8	11	8	4	4	4	4	5	7
5	6	5	5	5	7	7	8	9	8	7	10	13	9	7	6	5	4
4	6	7	5	4	4	6	8	5	9	10	10	10	10	8	7	5	5
3	4	7	4	4	7	7	3	9	10	8	16	46	16	8	11	11	5
2	7	7	6	5	5	3	5	5	7	8	10	10	10	12	11	6	10
1	5	9	6	5	4	3	4	5	6	7	9	13	11	9	10	11	10
0	9	9	6	4	5	2	4	3	3	4	4	3	8	9	8	8	10
-1	6	3	6	7	4	4	2	3	2	4	4	4	5	7	7	11	6
-2	5	7	8	7	5	5	2	0	3	6	6	5	10	7	5	7	8
-3	4	6	6	7	8	5	1	4	5	5	8	9	5	5	8	6	5
-4		5	6	5	5	5	9	6	6	10	9	6	6	8	5	7	9
-5	4	5	7	7	6	6	7	7	9	10	12	7	7	4	9	9	5
-6	13	10	5	6	9	7	8	10	8	11	9	7	10	12	8	6	10
-7	7	5	5	5	7	8	7	8	8	8	10	11	9	7	10	10	8
-8	13	10	11	12	11	8	8	8	8	6	8	8	7	11	7	7	8

[0065] Diese Tabelle gibt an, daß der Punkt, der durch Bewegen um drei Pixel in positiver Richtung entlang X und um drei Pixel in positiver Richtung entlang Y erreicht wird, die größte Anzahl übereinstimmender Pixel aufweist. Dies zeigt wiederum, daß die Fläche $T_{(3, 4)}$ in Fig. 4A infolge der durch das Magnetfeld hervorgerufenen Bildverzerrung um drei Pixel in positiver Richtung entlang X und um drei Pixel in positiver Richtung entlang Y bewegt worden ist. Diese Tatsache wird verwendet, um die Ablenkrichtung und die Verschiebung der Elektronenstrahlen zu bestimmen.

[0066] Der von $T_{(3, 4)}$ zurückgelegte Abstand wird als dq angenommen, die Vergrößerung der unter dem Magnetfeld gebildeten Bildebene (**24** in Fig. 1) wird als M angenommen, und der Abstand zur nächsten Bilderzeugungsebene vom Magnetfeld wird als 1 angenommen. Dann wird der Ablenkwinkel in etwa als

$$d\theta \approx \arctan\left(\frac{dq}{Ml}\right) \qquad (1)$$

bestimmt. Dieser Schablonenmatchingprozeß wird für jede Richtung ausgeführt, in der der gewünschte Querschnitt projiziert wird. In dem Fall, in dem die Messung eines Querschnitts entlang der X-Richtung erwünscht ist, wird der Matchingprozeß jeweils für $T_{(1, 4)}$ bis $T_{(6, 4)}$ in **Fig.** 4 ausgeführt. Unter der Annahme, daß die zurückgelegte Strecke jeder kleinen Fläche $dq(T_{(n, 4)})$ (n = 1, ..., 6) ist, ist der Ablenkwinkel $d\theta(T_{(n, 4)})$ als

$$d\theta\left(T_{(n,4)}\right) \approx \arctan\left(\frac{dq\left(T_{(n,4)}\right)}{Ml}\right) \qquad (2)$$

gegeben. Als nächstes wird das zu messende Magnetfeld um eine Achse gedreht, die zu dem Querschnitt senkrecht steht, der gemessen werden soll, um aus verschiedenen Winkeln projizierte verzerrte Referenzbilder zu erzeugen. Auf diese Weise wird die vorstehend erwähnte Verarbeitung zum Bestimmen des Ablenkwinkels ausgeführt. Zum Ändern der Richtung des Fortschreitens der Elektronenstrahlen in bezug auf das Magnetfeld weist die Vorrichtung gemäß dieser Ausführungsform einen Mechanismus zum Drehen einer Probe auf, der ein zu messendes Magnetfeld erzeugt. Die Messung wird demgemäß durch Drehen des zu messenden Magnetfelds vorgenommen. Wenn unter verschiedenen Winkeln projizierte Bilder erzeugt werden, können sowohl ein Referenzbild als auch ein verzerrtes Referenzbild erhalten werden, oder es kann nur ein verzerrtes Referenzbild erhalten werden, während ein im ersten Prozeß erhaltenes und gespeichertes Referenzbild verwendet werden kann.

[0067] Nach der Drehung um ψ_m gegenüber dem Winkel, den der Elektronenstrahl mit dem zuerst gemessenen Magnetfeld bildet, wird der Ablenkwinkel des Elektronenstrahls als

$$d\theta\left(\psi_m, T_{(n,4)}\right) \approx \arctan\left(\frac{dq\left(\psi_m, T_{(n,4)}\right)}{Ml}\right) \qquad (3)$$

gemessen. Es wird angenommen, daß die durch diese Messung und Berechnung erhaltenen Ablenkwinkeldaten $d\theta(\psi_m, T_{(n,4)})$ der Elektronenstrahlen Projektionsdaten sind, die den Linienintegralwert des Magnetfelds angeben. Diese Projektionsdaten werden in einem Computertomographie-Betriebsabschnitt **22** verarbeitet, um eine Querschnittsverteilung des Magnetfelds zu erzeugen. Die Computertomographie ist eine Technik zum Bestimmen eines tomographischen Bilds durch Berechnung anhand der Projektionsdaten in verschiedenen Winkelrichtungen eines Querschnitts.

[0068] Weiterhin werden diese Bilder verarbeitet, wobei die Daten entlang der Y-Richtung geändert werden, um dadurch Magnetfelder bei verschiedenen Höhen gegenüber der ebenen Fläche des Magnetkopfs zu bestimmen. Fig. 7 zeigt ein Ergebnis einer Beispielmessung. In diesem Fall wird angenommen, daß die Meßebene die X-Y-Koordinate ist, wobei die Höhe durch die Z-Koordinate dargestellt ist. Es läßt sich beobachten, daß sich die Intensität des Magnetfelds entlang der X-Richtung für eine Ebene, die fern von einem Magnetkopfpol **51** liegt, abschwächt.

[0069] Die räumliche Auflösung für die Messung wird durch die Größe des Magnetfeldbereichs eines für die Bildverarbeitung verwendeten Schablonenbilds bestimmt. Gemäß dieser Ausführungsform wird ein Bildbereich mit einer Fläche von 30 μm^2 als ein Schablonenbild verwendet. Die Vergrößerung der Zwischenlinse **27** und der Vergrößerungslinse **18** in Fig. 1 beträgt 3000. Die räumliche Auflösung gemäß der vorliegenden Ausführungsform ist daher 10 nm, wodurch eine Messung mit einer hohen räumlichen Auflösung verwirklicht werden kann. Weiterhin ist die Bildverarbeitung an einer Position möglich, die 30 µm oder weniger von der Probenfläche des Magnetkopfs entfernt ist, und es könnte daher eine Messung verwirklicht werden, die nur 10 nm oder weniger von der Probe entfernt stattfindet. Weiterhin kann gemäß dieser Technik auch ein sich chronologisch änderndes Magnetfeld unter Verwendung eines Elektronenstrahls in stroboskopischer Form gemessen werden.

Zweite Ausführungsform

[0070] Gemäß der vorstehend beschriebenen ersten Ausführungsform wurde die Verschiebung von Ladungsteilchenstrahlen aus einem Bild bei Abwesenheit eines Magnetfelds und einem Bild bei Vorhandensein eines Magnetfelds extrahiert. Gemäß der vorliegenden Ausführungsform werden dagegen nur einige Bilder bei Vorhandensein eines Magnetfelds erhalten, und die Verschiebung der Ladungsteilchenstrahlen wird unter Verwendung dieser Bilder extrahiert.

[0071] Ein Diagramm zum Erklären der vorliegenden Erfindung ist in Fig. 8 dargestellt. Ein Elektronenstrahl **12a** wird als ein Ladungsteilchenstrahl verwendet. Ein Elektronenstrahl **12b**, der durch einen Referenzfilm **14** gesendet wurde, bildet durch eine Objektlinse **15** eine Bildebene **24a** in der Nachbarschaft eines Magnetkopfs **25** zum Erzeugen eines Magnetfelds **16**. Die Bildebene **24a** wird durch eine Zwischenlinse **17** und eine Vergrößerungslinse **18** mit einer gewünschten Vergrößerung versehen, und ein vergrößertes Bild der Bildebene wird auf einer Kamera **19** erhalten. Dieses Bild wird in einem Speicher **20** gespeichert.

[0072] Der Abstand zwischen der Bildebene **24a** und dem Magnetfeld **16** wird geändert. Die Bildebene **24a** wird beispielsweise zu **24b** bewegt, um ähnlich wie bei dem vorstehend erwähnten Verfahren ein vergrößertes Bild der Bildebene zu erzeugen. Bei dem Prozeß wird die Intensität des zu messenden Magnetfelds unverändert gehalten. Die Bildebene kann bewegt werden, während die Stärke der Objektlinse **15** oder der Zwischenlinse **17** geändert wird. Alternativ kann der Magnetkopf **25** zum Erzeugen des Magnetfelds **16** bewegt werden. Es wird in dem so projizierten Bild auf ein bestimmtes Muster **71** geachtet. In diesem Fall wird ein einziges Teilchen berücksichtigt. Wenn sich das Magnetfeld von der Bildebene entfernt, zeigt eine fortlaufende Beobachtung des Bilds, daß sich das betreffende Teilchen so bewegt, als ob es in einer Ebene bleiben würde. Dies ist darauf zurückzuführen, daß ein Teilcheninformationen enthaltender Elektronenstrahl infolge des Magnetfelds einen Ablenkwinkel derart entwickelt, daß die in einer Ebene beobachtete Verschiebung umso größer wird, je weiter sich der Elektronenstrahl von dem Magnetfeld fortbewegt. Durch Bestimmen der von dem Teilchen zurückgelegten Strecke wird der Ablenkwinkel des Elektronenstrahls bestimmt.

[0073] Der Ablenkwinkel des Elektronenstrahls wird unter Verwendung eines an mehreren Punkten gebildeten Bilds extrahiert, wie in Fig. 8 dargestellt ist. Ein einzelnes Teilchen in der Bildebene **24a**, die dem Magnetfeld am nächsten liegt, wird beim Bestimmen der Bahn des das bestimmte Teilchen durchsetzenden Elektronenstrahls unter Verwendung anderer Bildebenen **24b**, **24c** bestimmt. Die Bahn des Elektronenstrahls wird als eine Gerade in einem dreidimensionalen Raum angenommen und durch ein Verfahren zum Bestimmen eines Parameters zum Bestimmen einer linearen Gleichung anhand anderer Bilder bestimmt.

[0074] Bei diesem Extraktionsverfahren können zum Bestimmen der Bahn eines Teilchens anders als bei der ersten Ausführungsform Teilchen regelmäßig mit gleichmäßigen Teilchengrößen angeordnet werden. Weiterhin entspricht die räumliche Auflösung der Größe eines Teilchens. Daher kann die Verschiebung, verglichen mit dem Verfahren, bei dem das mit Bezug auf die erste Ausführungsform beschriebene Mustermatching verwendet wird, mit einer noch höheren räumlichen Auflösung extrahiert werden. Der Prozeß nach dem Extrahieren der Verschiebung kann ähnlich wie gemäß der ersten Ausführungsform ausgeführt werden.

[0075] Für das betrachtete Bild kann das Verfahren gemäß der ersten Ausführungsform zum Extrahieren des Ablenkwinkels verwendet werden. In diesem Fall wird eine Fläche, die mehrere Teilchen enthält, bei der Bestimmung des Ablenkwinkels θ nach $\theta = \arctan(p/zd)$ berücksichtigt, wobei p die in der Ebene des betreffenden Musters zurückgelegte Strecke ist und zd der Abstand zwischen der für das Matching verwendeten Bildebene und dem Magnetfeld ist.

Dritte Ausführungsform

[0076] Ein fokussierter Ladungsteilchenstrahl wird auf eine Referenzprobe angewendet und tastet diese ab, und ein Probenbild wird anhand der Sekundärelektronen oder der reflektierten Ladungsteilchen erhalten, wodurch die Messung des Magnetfelds vorgenommen wird. Fig. 9 zeigt die dritte Ausführungsform. Wie gemäß der ersten Ausführungsform wird ein Elektronenstrahl als ein Ladungsteilchenstrahl verwendet.

[0077] In Fig. 9 wird ein von einer Elektronenstrahlquelle **11** erzeugter Elektronenstrahl **12** durch eine Fokussierlinse **13** geschickt und bildet bei **36** einen Kreuzungspunkt. Weiterhin durchläuft der Elektronenstrahl eine Objektlinse **15** und wird auf eine Referenzprobe **14** gestrahlt. Mit dem auf die Probenfläche eingestrahlten Elektronenstrahl werden Sekundärelektronen **37** erzeugt. Die auf diese Weise von der Probe erzeugten Sekundärelektronen **37** werden durch einen Sekundärelektronendetektor **32** erfaßt und durch einen Verstärker **33** verstärkt. Andererseits sendet ein Abtastsignalgenerator **34** ein Abtastsignal zu einer Abtast-Ablenkeinrichtung **30**, so daß der Elektronenstrahl **12** die Oberfläche der Referenzprobe **14** abtastet. Dieses Abtastsignal wird auch zu einer Einheit **35** gesendet, die ein Bild erzeugt. Die Bilderzeugungseinheit **35** synchronisiert das verstärkte Sekundärelektronensignal mit dem Abtastsignal und bildet infolge der Form- oder Materialunterschiede ein Kontrastbild der Referenzprobe **14**. Das Sekundärelektronenbild der Referenzprobe **14** wird in Form von Bilddaten in einem Speicher **20** gespeichert und als ein Referenzbild verwendet.

[0078] Im nächsten Schritt wird das zu messende Magnetfeld **16** an einem Punkt **16a** in Fig. 9 angeordnet. Bei Vorhandensein eines Magnetfelds wird die Bahn des Elektronenstrahls unter der Lorentz-Kraft gekrümmt, und der Ankunftspunkt des Elektronenstrahls auf der Oberfläche der Referenzprobe **14** verschoben. Daher unterscheidet sich der Abtastpunkt des Elektronenstrahls auf der Referenzprobe **14** lokal von dem Elektronenankunftspunkt, was dazu führt, daß das durch die Bilderzeugungseinheit **35** erzeugte Bild insgesamt verzerrt ist. Dieses Bild wird als ein verzerrtes Referenzbild im Speicher **20** gespeichert.

[0079] Die nachstehend beschriebene Bildverarbeitung gleicht derjenigen gemäß der ersten Ausführungs-

form und wird verwendet, um die Verschiebung und den Ablenkwinkel des Elektronenstrahls **12** zu bestimmen. Weiterhin wird wie gemäß der ersten Ausführungsform der eine Probe bereitstellende Magnetkopf **25** gedreht, um ähnlich dem vorstehend beschriebenen ein Bild zu erzeugen. Der Ablenkwinkel des Elektronenstrahls wird auch, ebenso wie die Projektionsdaten des Magnetfelds, aus diesen Bildern entnommen. Diese Projektionsdaten werden durch den Computertomographie-Verarbeitungsabschnitt **22** verarbeitet, um eine Magnetfeldverteilung zu bestimmen.

[0080] Weiterhin wird gemäß der vorliegenden Ausführungsform eine Probe mit einer ungleichmäßigen mit dem Elektronenstrahl **12** bestrahlten Oberfläche als die Referenzprobe **14** verwendet. Diese Probenungleichmäßigkeit wird durch den Sekundärelektronendetektor **32** in bezug auf Differenzen der Stärken der durch tastendes Ablenken des Elektronenstrahls **12** auf der Probenoberfläche erzeugten Sekundärelektronen **37** hervorgerufen. Daher wird die Ungleichmäßigkeit als eine Kontrastdifferenz des von der Bilderzeugungseinheit **35** erzeugten Bilds beobachtet. Die Ungleichmäßigkeit der Oberfläche der Referenzprobe **14** ist unregelmäßig, so daß beim tastenden Ablenken des Elektronenstrahls **12** auf der Probe aus keiner Richtung eine Periodizität beobachtet wird. Überdies kann der Elektronenstrahl in stroboskopischer Form gemäß der vorliegenden Ausführungsform, wie gemäß der ersten Ausführungsform, zum Messen des sich zeitlich ändernden Magnetfelds verwendet werden. Weiterhin ist es bei Verwendung des gemäß der vorliegenden Ausführungsform verwendeten Vorrichtungsaufbaus unnötig, einen Ladungsteilchenstrahl durch eine Referenzprobe zu senden. Anders als gemäß der ersten oder der zweiten Ausführungsform kann daher eine dicke Referenzprobe verwendet werden.

[0081] Die Vorrichtung mit dem Aufbau gemäß dieser Ausführungsform ist daher in der Lage, das Magnetfeld unter Verwendung der gleichen Technik wie gemäß der zweiten Ausführungsform zu messen. Dies ist ein Verfahren zum Erzeugen mehrerer Bilder bei Vorhandensein eines Magnetfelds und zum Extrahieren der Verschiebung des Elektronenstrahls. Bei dieser Vorrichtung wurden mehrere Bilder aufgenommen, während der Kreuzungspunkt **36** und die Position des Magnetfelds **16** geändert wurden. Das so erhaltene Bild wird durch das gleiche Verfahren wie gemäß der zweiten Ausführungsform verarbeitet.

Vierte Ausführungsform

[0082] Gemäß der ersten Ausführungsform wird das Bild einer Referenz-Dünnfilmprobe durch Quantisieren jedes Pixels zu 0- oder 1-Daten in der Bildverarbeitungsstufe erkannt. Wenn das Referenzbild und das verzerrte Referenzbild nicht zu 0- oder 1-Daten quantisiert werden können, wenn also die Helligkeitsdaten jedes Pixels mehr als zwei Bits aufweisen, kann das folgende Verfahren zum Bestimmen des Ablenkwinkels des Ladungsteilchenstrahls verwendet werden.

[0083] Wenn ein Bild durch einen Computer quantisiert und erkannt wird, wird beispielsweise ein Bild erkannt, wobei die Daten der jeweiligen Pixel nicht 0 oder 1 sind, sondern numerische Daten mit 8 Bits, d. h. 256 Tönen, sind. Dieser Prozeß wird sowohl für das Referenzbild als auch für das verzerrte Referenzbild ausgeführt, um die Bilder in einem Speicher zu speichern. Anschließend wird eine kleine Fläche, beispielsweise mit Nx × Ny Pixeln, als ein Schablonenbild aus dem im Speicher gespeicherten Referenzbild extrahiert. Eine Untersuchungsfläche, die größer ist als das Schablonenbild, welche beispielsweise Mx × My Pixel aufweist, wird in dem verzerrten Referenzbild festgelegt und extrahiert. Die Größenbeziehung ist Nx < Mx und Ny < My.

[0084] In der Untersuchungsfläche des verzerrten Referenzbilds wird ein Bereich gesucht, der am besten mit der Schablone des Referenzbilds übereinstimmt. Dieser Vorgang wird durch die folgende Berechnung ausgeführt:

$$D(a, b) = \sum_{n_x=0}^{Nx-1} \sum_{n_y=0}^{Ny-1} \left| H_{(a,b)}(n_x, n_y) - T(n_x, n_y) \right| \qquad (4)$$

[0085] Hierbei ist (a, b) die Koordinate des in der Untersuchungsfläche im verzerrten Referenzbild überlappten Schablonenbilds, d. h. des Überlappungsbereichs. Gemäß dieser Erfindung wird diese Koordinate durch den Punkt dargestellt, an dem sich das obere linke Pixel des Schablonenbilds in der Untersuchungsfläche befindet. $H_{(a, b)}$ bezeichnet den Ton des Pixels des verzerrten Referenzbilds am gleichen Punkt wie demjenigen des überlappten Schablonenbilds, und T ist der Grad des Pixels des Schablonenbilds. Gleichung 4 dient dem Addieren der Absolutwerte der Pixeldatendifferenzen, die zwischen den zwei überlappten Bildern in der gesamten Untersuchungsfläche geeignet untersucht wurden. Der Punkt (a, b) des einem Minimalwert von D(a, b) zugeordneten Schablonenbilds stellt einen Punkt dar, an dem die Bilder am besten übereinstimmen. Wenn die beiden Bilder einander vollständig übereinstimmend überlappen, gilt D(a, b) = 0.

[0086] Gemäß der betrachteten Ausführungsform werden unter Verwendung von Gleichung 4 Werte von D(a, b) für verschiedene Werte von (a, b) bestimmt. Anhand des Werts (a, b), der einem Minimum von D(a, b) zugeordnet ist, wird in dem verzerrten Referenzbild ein Punkt bestimmt, für den angenommen wird, daß das Schablonenbild des Referenzbilds zu ihm bewegt worden ist. Die zurückgelegte Strecke wird als die Verschiebung des Elektronenstrahls und weiter zum Bestimmen des Ablenkwinkels verwendet.

[0087] Anschließend wird ein Schablonenbild für jeden zu messenden Querschnitt für alle abgerufenen Bilder gemessen, und die Berechnung wird nach Gleichung 4 ausgeführt, um das Ziel des Schablonenbilds zu bestimmen. Die Verschiebung und der Ablenkwinkel des Elektronenstrahls infolge des Magnetfelds werden auf diese Weise bestimmt. Weiterhin wird eine ähnliche Berechnung für die aus jeder Richtung des Magnetfelds aufgenommenen Bilder ausgeführt, um dadurch die Verschiebung und den Ablenkwinkel des Elektronenstrahls zu bestimmen und anhand dieser Projektionsdaten des Magnetfelds zu erzeugen. Überdies wird zum Bestimmen einer Magnetfeldverteilung die Berechnung unter Verwendung der Computertomographietechnik in derselben Weise wie gemäß der ersten und der zweiten Ausführungsform ausgeführt.

[0088] Die Berechnung aus Gleichung 4 dient dem Addieren für alle Pixel. Diese Berechnung wird auch für verschiedene Werte von (a, b) in einer Untersuchungsfläche ausgeführt. Wenn eine große Anzahl von Pixeln Mx × My für eine Untersuchungsfläche herangezogen wird, stellt die Berechnungszeit daher ein Problem dar. Angesichts dessen wird die folgende Maßnahme zum Verringern der in Gleichung 4 erforderlichen Berechnungszeit getroffen. Zuerst wird während des Vorgangs der sequentiellen Addition für die Pixel nach Gleichung 4 für D(a, b) ein Abschnittsniveau Ds festgelegt. Während der Berechnung wird D(a, b) sequentiell mit Ds verglichen. Wenn D(a, b) größer als Ds wird, wird die Berechnung von Gleichung 4 selbst mitten in dem Vorgang unterbrochen. Daher wird die Berechnungszeit für das Matching der Bilder mit Daten von mehr als zwei Bits um etwa 10 bis 30 Prozent verringert. Die Berechnungszeit wird auch durch sequentielles Ersetzen von Ds durch einen Minimalwert Dmin von D(a, b), statt daß ein konstanter Wert von Ds erhalten bleibt, und durch Vornehmen des vorstehend erwähnten Vergleichs reduziert.

[0089] Überdies wird als ein anderes Verfahren zum Reduzieren der Berechnungszeit die Änderungsrate ΔD(a, b) während der Addition sequentiell überwacht. Wenn ΔD(a, b) scharf ansteigt, wird die Berechnung selbst vor Abschluß der Berechnung nach Gleichung 4 für die aktuelle Fläche zur nächsten Überlappungsfläche verschoben. Dieses Verfahren ist auch wirksam, um die Berechnungszeit wie im vorstehend erwähnten Fall um 10 bis 30 Prozent zu reduzieren.

Fünfte Ausführungsform

[0090] Gemäß dieser Ausführungsform wird die folgende Technik für das Mustermatching bei der Bildverarbeitung verwendet, um die Verschiebung von Ladungsteilchenstrahlen zu bestimmen. Wie gemäß der vierten Ausführungsform werden Nx × Ny Pixel, die jeweils Daten mit mehr als zwei Bits darstellen, als ein aus einem Referenzbild extrahiertes Schablonenbild verwendet. Mx × My Pixel, die eine Untersuchungsfläche darstellen, werden festgelegt und aus einem verzerrten Referenzbild extrahiert.

[0091] Die Berechnung wird nach Gleichung 5 ausgeführt.

$$C(a,b) = \sum_{n_x=0}^{Nx-1}\sum_{n_y=0}^{Ny-1} \frac{\{H_{(a,b)}(n_x,n_y) - \overline{H}\}\{T(n_x,n_y) - \overline{T}\}}{\sqrt{H_{\sigma ab}T_{\sigma}}} \quad (5)$$

[0092] Hierbei gilt:

$$\overline{H} = \frac{1}{NxNy}\sum_{n_x=0}^{Nx-1}\sum_{n_y=0}^{Ny-1} H_{(a,b)}(n_x,n_y) \quad (6)$$

$$\overline{H} = \frac{1}{NxNy}\sum_{n_x=0}^{Nx-1}\sum_{n_y=0}^{Ny-1} H_{(a,b)}(n_x,n_y) \quad (7)$$

$$H_{\sigma ab} = \sum_{n_x=0}^{Nx-1}\sum_{n_y=0}^{Ny-1} \{H_{(a,b)}(n_x,n_y) - \overline{H}\}^2 \quad (8)$$

und

$$T_\sigma = \sum_{n_x=0}^{Nx-1} \sum_{n_y=0}^{Ny-1} \{T(n_x, n_y) - \overline{T}\}^2 \qquad (9)$$

[0093] Wie gemäß der dritten Ausführungsform bezeichnet (a, b) die Koordinate des einer Untersuchungsfläche in dem verzerrten Referenzbild überlappten Schablonenbilds, d. h. eines Überlappungspunkts. In diesem Fall wird die Koordinate des Schablonenbilds durch die Koordinate des Punkts dargestellt, bei dem sich das obere linke Pixel des Schablonenbilds in der Untersuchungsfläche befindet. Das Zeichen H(a, b) bezeichnet den Ton des Pixels des verzerrten Referenzbilds am selben Punkt wie demjenigen, an dem das Schablonenbild überlappt, und T bezeichnet den Ton des Pixels des Schablonenbilds. Gemäß dieser Ausführungsform wird in Gleichung 5 die Koordinate (a, b) des dem Maximalwert von C(a, b) zugeordneten Schablonenbilds bestimmt. Weiterhin wird die Verschiebung des Elektronenstrahls anhand des Punkts bestimmt, zu dem sich das Schablonenbild des Referenzbilds in dem verzerrten Referenzbild bewegt hat. Der Prozeß nach dem Bestimmen der Verschiebung des Elektronenstrahls kann in der gleichen Weise wie gemäß der ersten Ausführungsform ausgeführt werden.

Sechste Ausführungsform

[0094] Diese Ausführungsform verwendet die Bildverarbeitung, bei der die zweidimensionale Fourier-Transformation für das Extrahieren der Verschiebung des Elektronenstrahls **12** aus Fig. 9 oder des durchgelassenen Elektronenstrahls **12b** aus den Fig. 1 und Fig. 8 anhand eines Referenzbilds und eines verzerrten Referenzbilds aus dem Speicher **20** verwendet wird, wie in den Fig. 1, Fig. 8 und Fig. 9 dargestellt ist. Wenn dieses Bildverarbeitungsverfahren verwendet werden kann, erfüllen die Größe des der Fourier-Transformation unterzogenen Bereichs, die räumliche Auflösung und der Dynamikbereich des Magnetfelds die folgende Beziehung.

[0095] Wenn ein Bereich für die Fourier-Transformation aus einem Referenzbild oder einem verzerrten Referenzbild, das abgerufen wurde, ausgeschnitten wird, muß die Größe des Bereichs kleiner sein als die erforderliche räumliche Auflösung d. Unter der Annahme, daß die Länge einer Seite eines solchen Bereichs l_s ist, gilt die Beziehung $l_s < d \times M$ (M: Vergrößerung). Andererseits sei angenommen, daß das Maximum des Verschiebungsbetrags des Elektronenstrahls in X- und Y-Richtung infolge des Magnetfelds, d. h. der Dynamikbereich, l_{mx} bzw. l_{my} ist. Wenn l_{mx} und l_{my} beide größer sind als die Hälfte von l_s, wodurch die Länge einer Seite des bestimmten Bereichs dargestellt wird, ist das vorliegende Verfahren nicht anwendbar. Mit anderen Worten müssen beide Beziehungen $l_{mx} \leq l_s/2$ und $l_{my} \leq l_s/2$ erfüllt sein.

[0096] Wenn die vorstehend erwähnten Bedingungen erfüllt sind, wird angenommen, daß das Schablonenbild, das kleiner ist als die räumliche Auflösung, welches aus dem Referenzbild ausgeschnitten wurde, $T(n_x, n_y)$ ist und das Bild des verzerrten Referenzbilds mit der gleichen Größe für denselben Punkt $H(n_x, n_y)$ ist. Zuerst wird angenommen, daß das anhand der zwei Bilder synthetisierte Bild $f(n_x, n_y) = T(n_x, n_y) + H(n_x, n_y)$ ist, und die Berechnung wird nach den Gleichungen 10 und 11 für dieses zusammengesetzte Bild ausgeführt.

$$F(u, v) = \left| \sum_{n_x=0}^{Nx-1} \sum_{n_y=0}^{Ny-1} f(n_x, n_y) \exp\left\{-2\pi i \left(\frac{n_x u}{Nx} - \frac{n_y v}{Ny}\right)\right\} \right| \qquad (10)$$

$$G(s, t) = \left| \sum_{n_x=0}^{Nx-1} \sum_{n_y=0}^{Ny-1} F(u, v) \exp\left\{-2\pi i \left(\frac{us}{Nx} - \frac{vt}{Ny}\right)\right\} \right| \qquad (11)$$

[0097] Die Gleichungen 10 und 11 entsprechen den Berechnungen der Amplitude der zweidimensionalen Fourier-Transformation für $f(n_x, n_y)$ und F(u, v). Weiterhin können die Gleichungen 10 und 11 alternativ quadriert werden, um das Leistungsspektrum der Fourier-Transformation zu bestimmen.

[0098] Ein Beispiel des Berechnungsergebnisses ist in **Fig.** 10 dargestellt. $T(n_x, n_y)$ ist in Fig. 10A dargestellt, $H(n_x, n_y)$ ist in Fig. 10B dargestellt und $f(n_x, n_y)$ ist in Fig. 10C dargestellt. Fig. 10D ist ein Diagramm, in dem drei Punkte der größten aus dem Berechnungsergebnis aus Fig. 11 extrahierten Werte dargestellt sind, welche als schwarze Flecke angegeben sind. Der mittlere aufgetragene Punkt stellt die Gleichstromkomponente eines Bilds dar, und die aufgetragenen Punkte rechts oben und links unten stellen die primäre Frequenzkomponente dar. Dieser primäre Frequenzpunkt stellt den Betrag und die Richtung der Verschiebung zwischen den überlappten Bildern $T(n_x, n_y)$ und $H(n_x, n_y)$ dar. Welcher der beiden in Fig. 10D dargestellten Punkte der primären Frequenzkomponente den Ablenkpunkt des Elektronenstrahls darstellt, wird durch Sichtvergleich zwischen

dem Referenzbild und dem verzerrten Referenzbild oder durch zusätzliche Verwendung des vorstehend mit Bezug auf die erste, die vierte und die fünfte Ausführungsform beschriebenen Verfahrens entschieden. Die Verarbeitung nach dem Bestimmen der Verschiebung des Elektronenstrahls wird ebenso wie gemäß der ersten Ausführungsform ausgeführt, wodurch die Messung der Magnetfeldverteilung mit einer hohen Auflösung und einer hohen Empfindlichkeit verwirklicht wird.

Siebte Ausführungsform

[0099] Gemäß dieser Ausführungsform wird das Magnetfeld unter Verwendung einer Ladungsteilchenquelle in ebener Form gemessen. Weiterhin wird gemäß dieser Ausführungsform eine ebene Elektronenstrahlquelle als die ebene Ladungsteilchenquelle verwendet.

[0100] Die Ausführungsform ist in Fig. 11 dargestellt. Gemäß dieser Ausführungsform ist, wie in Fig. 11 dargestellt ist, eine ebene Elektronenstrahlquelle **61** oberhalb eines Magnetfelds **16** angeordnet. Die in der Ebene betrachtete ebene Elektronenstrahlquelle **61** weist eine Dichtedifferenz der an verschiedenen Punkten erzeugten Elektronen auf, und es kann, wenn ein Bild in der Ebene gebildet wird, ein Licht-und-Schatten-Muster erhalten werden. Dieser Elektronenstrahl wird durch das Magnetfeld **16** verzerrt, um ein verzerrtes Muster zu erzeugen, wodurch die Verschiebung des räumlichen Elektronenstrahls bestimmt wird. Die Verschiebung der räumlichen Elektronen wird in der gleichen Weise wie gemäß der ersten, der zweiten, der vierten, der fünften und der sechsten Ausführungsform bestimmt.

[0101] Die Verwendung der Elektronenstrahlquelle gemäß dieser Ausführungsform macht es unnötig, einen mit Bezug auf die vorstehend erwähnten Ausführungsformen beschriebenen Referenzfilm zu installieren, wodurch die Größe der Vorrichtung insgesamt verringert wird.

Achte Ausführungsform

[0102] Gemäß dieser Ausführungsform werden Ablenkungspunkte eines Ladungsteilchenstrahls durch zweidimensionales Bewegen eines Detektors gemessen, der in der Lage ist, jeden Ablenkungspunkt des Ladungsteilchenstrahls in dessen Ausbreitungsrichtung zu erfassen. Diese Ablenkungspunkte werden verwendet, um den Ablenkwinkel des Ladungsteilchenstrahls infolge des Magnetfelds und des elektrischen Felds zu bestimmen. Nachstehend wird der Fall beschrieben, in dem ein Elektronenstrahl als ein Ladungsteilchenstrahl verwendet wird und das Meßobjekt ein Magnetfeld ist.

[0103] Diese Ausführungsform wird anhand Fig. 12 erklärt. In Fig. 12 wird ein von einer Elektronenstrahlquelle **11** erzeugter Elektronenstrahl **12** durch eine Fokussierlinse **13** fokussiert und durch einen Ablenkbereich **84** geschickt, in dem das Magnetfeld vorhanden ist. Der Elektronenstrahl **12** entwickelt unter der Lorentz-Kraft einen Ablenkwinkel δθ und wird auf einen Detektor **85** gestrahlt, der sich an einem Punkt sl befindet. Der Detektor **85** mißt die Verschiebung δl (s1) des Elektronenstrahls **12**.

[0104] Der Linienintegralwert S des gewünschten Magnetfelds ist als

$$S = \int Bdz \tag{12}$$

gegeben, wobei B das Magnetfeld ist und z der Weg des Elektronenstrahls ist. Der Ablenkwinkel δθ des Elektronenstrahls läßt sich durch

$$\delta\theta = (q/m)(\int Bdz/Vz) \tag{13}$$

ausdrücken, wobei δθ der Ablenkwinkel des Elektronenstrahls ist, q die Ladung des Elektronenstrahls ist, M die Masse des Elektronenstrahls ist und vz die Geschwindigkeit des Elektronenstrahls ist. Wenn der Linienintegralwert des Magnetfelds durch den Ablenkwinkel ausgedrückt wird, wird die folgende Gleichung anhand der Gleichungen 12 und 13 erhalten:

$$S = (m/q)\delta\theta \cdot Vz \tag{14}$$

[0105] Der Ablenkwinkel δθ des Elektronenstrahls ist durch

$$Mz << Z(s1) \tag{15}$$

gegeben, wobei Mz die Länge des Elektronenstrahls entlang seiner Ausbreitungsrichtung im Magnetfeld ist und Z(s1) der Abstand vom Magnetfeldbereich zum Detektor ist. Dann gilt:

$$\delta\theta = \arctan\{\delta l/Z(s1)\} \quad (16)$$

[0106] Es ist auf diese Weise möglich, anhand der durch den Detektor **85** gemessenen Verschieung δl(s1) des Elektronenstrahls den Ablenkwinkel δθ zu bestimmen, der den Linienintegralwert des Magnetfelds angibt.

[0107] In dem Fall, in dem Gleichung 15 nicht gilt, d. h. in dem Fall, in dem Mz eine Größe aufweist, die verglichen mit Z(s1) nicht vernachlässigbar ist, kann der richtige Ablenkwinkel δθ jedoch nicht allein anhand der Verschiebung δl(s1) erhalten werden. Beispielsweise bleibt der Ablenkwinkel gleich (θa = θb), es werden jedoch unterschiedliche Verschiebungen (δa ≠ δb) zwischen dem Fall, in dem in dem Bereich r eine große Ablenkung auftritt, wie in Fig. 13A dargestellt ist, und dem Fall, in dem in dem Bereich s eine große Ablenkung auftritt, wie in Fig. 13B dargestellt ist, beobachtet.

[0108] Um dieses Phänomen zu vermeiden und stets einen richtigen Ablenkwinkel abzuleiten, wird die folgende Messung ausgeführt. Zuerst werden in Fig. 12 Vorkehrungen getroffen, um den Detektor **85** durch eine Betätigungseinrichtung **86** von der Position s1 parallel zur Ausbreitung des Elektronenstrahls **12a** zu bewegen, bevor dieser abgelenkt wird. Unter Verwendung dieser Einrichtung wird der Detektor **85** zur Position s2 bewegt, und die Verschiebung wird erneut gemessen. Unter der Annahme, daß die Abstände des Detektors vom Magnetfeld Z(s1), Z(s2) sind und die erfaßten Verschiebungen δl(s1), δl(s2) sind, kann der Ablenkwinkel δθ richtig als

$$\delta\theta = \arctan[\{\delta l(s2) - \delta l(s1)\}/\{Z(s2) - Z(s1)\}] \quad (17)$$

bestimmt werden.

[0109] Angesichts der Tatsache, daß der Ablenkwinkel δθ anhand Gleichung 17 richtig bestimmt werden kann, kann der Linienintegralwert des Magnetfelds selbst dann richtig gemessen werden, wenn Gleichung 15 nicht gilt.

[0110] Weiterhin wird zum Verbessern der Genauigkeit der Erfassung des Ablenkwinkels die Position des Detektors weiter geändert und die Verschiebung δl(sn) (n = 1, 2, 3, ..., N) gemessen. Durch Angeben des so erhaltenen Ablenkungspunkts in einem dreidimensionalen Raum wird beispielsweise das in Fig. 14 dargestellte Ergebnis erhalten. In Fig. 14 geben schwarze Flecke die Punkte an, an denen der Elektronenstrahl erfaßt wird. Jeder Erfassungspunkt kann durch Koordinaten (zn, yn, zn (n = 1, 2, 3, ..., N) dargestellt werden. Zum Bestimmen der diese Punkte durchsetzenden Geraden mit hoher Genauigkeit wird die Methode der kleinsten Quadrate verwendet. Weil die Richtung des Elektronenstrahls vor der Ablenkung entlang der in Fig. 14 dargestellten z-Achse verläuft, liefert die Neigung der Geraden in bezug auf die Achse den Ablenkwinkel δθ.

[0111] Gemäß dieser Ausführungsform wurde der Fall erklärt, in dem der Detektor vor der Ablenkung parallel zur Ausbreitungsrichtung des Elektronenstrahls bewegt wird und die bestimmte Richtung parallel zur z-Achse in einem dreidimensionalen Raum verläuft. Wenn die Achse des Elektronenstrahls nicht parallel zur Bewegungsachse verläuft oder wenn die Genauigkeit der Parallelbewegung des Detektors nicht ausreicht, wird jedoch die Position des Elektronenstrahls in Abwesenheit eines Magnetfelds vorab an jeweiligen Detektorpositionen durch den Detektor gemessen. Weiterhin kann gemäß dieser Ausführungsform, die mit Bezug auf das Verfahren zum Bewegen eines Detektors in bezug auf ein Magnetfeld erklärt wurde, ein Magnetfeld alternativ bewegt werden, um ein ähnliches Ergebnis zu erhalten.

[0112] Diese Technik kann den Linienintegralwert S des Magnetfelds bestimmen, ohne daß ein Detektor an einem fernen Punkt installiert wird. Überdies kann durch Bestimmen des Linienintegralwerts S aus verschiedenen Richtungen des Magnetfelds die dreidimensionale Verteilung des Magnetfelds im Raum unter Verwendung der Computertomographietechnik bestimmt werden. Überdies kann diese Technik verwendet werden, um das Magnetfeld einer Magnetfeldlinse zu messen und die Eigenschaften der Linse anhand der dreidimensionalen Verteilung zu beurteilen.

Neunte Ausführungsform

[0113] Gemäß der achten Ausführungsform wurden Ladungsteilchenstrahlen zu einem einzigen Strahl fokussiert, der zu Meßzwecken durch ein Magnetfeld gesendet wurde. Gemäß der vorliegenden Ausführungsform

werden andererseits mehrere Ladungsteilchenstrahlen zu einer Zeit durch ein elektrisches Feld oder ein Magnetfeld geschickt und wird zu einer anderen Zeit der Ablenkwinkel dieser Ladungsteilchenstrahlen bestimmt. Nachstehend wird für den Fall eine Erklärung gegeben, in dem ein Elektronenstrahl und ein Magnetfeld wie gemäß der achten Ausführungsform verwendet werden.

[0114] Diese Ausführungsform wird mit Bezug auf Fig. 15 beschrieben. In Fig. 15 wird ein von einer Elektronenstrahlquelle **11** erzeugter Elektronenstrahl **12** durch eine Fokussierlinse **13** und auch durch eine Maske **91** geschickt, um mehrere zur Messung verwendete Elektronenstrahlen zu bilden. Die Maske **91** hat eine Anzahl von Öffnungen, von denen Elektronenstrahlen durchgelassen werden. Die Elektronenstrahlen **12c**, die von den Öffnungen durchgelassen wurden, werden durch einen vom Magnetfeld gebildeten Ablenkbereich **84** geschickt. Eine Kamera **19** ist unterhalb des Magnetfelds installiert, um zu ermöglichen, daß mehrere helle Flecke der Elektronenstrahlen zu einer Zeit beobachtet werden. Wie gemäß der achten Ausführungsform wird die Kamera **19** durch eine Betätigungseinrichtung **86** bewegt, um die Punkte heller Flecke der Elektronenstrahlen zu messen. Ein Beispiel der so gemessenen hellen Flecke ist in Fig. 16A dargestellt.

[0115] Um mehrere Geraden anhand der so gemessenen hellen Flecke zu erfassen, wird eine Hough-Transformation ausgeführt, wie nachstehend erwähnt wird. Zuerst sei mit Bezug auf Fig. 16B angenommen, daß Parameter, die eine Gerade in einem dreidimensionalen Raum darstellen, durch die Winkel ϕx und ϕy gegeben sind, welche die Gerade, die von der Koordinate (X0, Y0) in der Ebene z = 0 ausgeht und an der x-z-Ebene bzw. der y-z-Ebene projiziert wird, mit der z-Achse bildet. Die Gleichung für die Gerade im dreidimensionalen Raum ist durch

$$(x - X0)/(\cos\phi y \sin\phi x) = (y - Y0)/(\sin\phi y \cos\phi x) = z/(\cos\phi\cos\phi x) \quad (18)$$

gegeben. Anhand Gleichung 18 werden

$$X0 = x - z\tan\phi x \quad (19)$$

$$Y0 = y - z\tan\phi y \quad (20)$$

erhalten.

[0116] Bei Betrachtung eines gegebenen hellen Flecks (x, y, z) kann die Beziehung zwischen vier Parametern einer diesen Fleck durchsetzenden Geraden anhand der Gleichungen 19 und 20 bestimmt werden. Wenn die Werte ϕx, ϕy geändert werden, werden auch die Werte X0, Y0 geändert. Die Werte X0, Y0 ändern sich mit ϕx, ϕy. Wenn die vier Parameter unter Verwendung dieser Beziehung im Raum aufgetragen werden, gibt eine Parameterkombination mit vielen aufgetragenen Parametern die vier Parameter der existierenden Geraden an. Gemäß diesem Verfahren werden, wenn mit einer erheblichen Dichte aufgetragene Bereiche nacheinander ausgewählt werden, selbst wenn die Anzahl der Geraden im Raum unbekannt ist, so viele Geraden wie ausgewählt bestimmt. Mit anderen Worten kann eine Anzahl von Punkten zu einer Zeit gemessen werden.

[0117] Die so erhaltenen Geraden laufen durch helle Flecke im Raum, wie in Fig. 16C dargestellt ist, und haben eine Neigung in bezug auf die z-Achse. Der Ablenkwinkel der jeweiligen Elektronenstrahlen kann anhand dieser Neigung bestimmt werden. Weiterhin wird der Linienintegralwert S des Magnetfelds anhand dieses Ablenkwinkels bestimmt, und das Magnetfeld wird gedreht, um ähnliche Messungen auszuführen. Durch Anwenden der Computertomographietechnik auf das Meßergebnis kann eine räumliche Verteilung des Magnetfelds bestimmt werden.

[0118] An Stelle der gemäß der vorstehend erwähnten Ausführungsform verwendeten Maske **91** kann ein Film, durch den der Ladungsteilchenstrahl gesendet werden kann, zum Messen des elektrischen Felds oder des Magnetfelds verwendet werden. Ein Beispiel ist in Fig. 17 dargestellt.

[0119] Ein von einer Elektronenstrahlquelle **11** erzeugter Elektronenstrahl **12** wird durch eine Fokussierlinse **13** und auch durch einen Film **101** mit einem Muster geschickt, das ein Helligkeitsmuster erzeugt. Der auf diese Weise durchgelassene Elektronenstrahl bildet weiter durch eine Objektlinse **15** eine Bildebene **24**. Die Bildebene **24** erzeugt durch eine Abbildungslinse **104** ein Bild des Films auf einer Kamera **19**.

[0120] Ein Ablenkbereich **84** des elektrischen Felds oder des Magnetfelds wird im Verlauf des Elektronen-

strahls eingerichtet, wie in Fig. 17 dargestellt ist, und es wird ein Bild betrachtet. Das so erhaltene vom Film **101** durchgelassene Bild ist verzerrt. Dies ist darauf zurückzuführen, daß der Elektronenstrahl durch das so eingerichtete elektrische Feld oder Magnetfeld abgelenkt wird. Der Ablenkbereich **84** wird entlang der Ausbreitungsrichtung des Elektronenstrahls bewegt, und es wird wieder ein Bild erzeugt. Das so erhaltene Bild hat die gleiche Wirkung wie gemäß der vorstehend erwähnten Ausführungsform. Bei Betrachtung eines hellen oder eines dunklen Bereichs des so erhaltenen durchgelassenen Bilds wird angenommen, daß diese Positionen wie gemäß den vorstehend erwähnten Ausführungsformen Punkte im Raum sind. Der Ablenkwinkel kann durch Erfassen von Geraden unter Verwendung einer Hough-Transformation ähnlich gemessen werden.

[0121] Das Bild der Bildebene **24** wird durch die Abbildungslinse **104** auf die Kamera **19** projiziert. Die Tatsache, daß sich der Abstand zwischen der Bildebene **24** und dem Ablenkbereich **84** ändert, entspricht der Tatsache, daß der Abstand zwischen dem Detektor **85** oder der Kamera **19** und dem Ablenkbereich **84** gemäß den vorstehend erwähnten Ausführungsformen geändert wird. Die Position der Bildebene **24** kann als der Ort angesehen werden, an dem ein virtueller Detektor eingerichtet ist. Daher kann die Bildebene **24** durch Ändern der Objektlinse **15** und der Abbildungslinse **104** an Stelle des Ablenkbereichs **84** bewegt werden. Weil dies der Bewegung des Detektors entspricht, kann der Ablenkwinkel ähnlich wie im vorstehend erwähnten Fall gemessen werden. Weiterhin kann der Ablenkwinkel gleichwertig gemessen werden, indem der Film **101** und die Bildebene **24** bewegt werden, wobei die Abbildungslinse **104** geändert wird.

[0122] Wie vorstehend beschrieben wurde, können gemäß der vorliegenden Ausführungsform Messungen für mehrere Elektronenstrahlen zu einer Zeit ausgeführt werden. Folglich kann die Verteilung des Ablenkwinkels der in einem Bereich mit einer bestimmten Größe entwickelten Elektronenstrahlen zu einer Zeit gemessen werden. Überdies kann die dreidimensionale Magnetfeldverteilung sehr wirksam in kurzer Zeit unter Verwendung dieser Ablenkwinkelverteilung gemessen werden.

[0123] Es wird demgemäß anhand der vorstehenden Beschreibung verständlich geworden sein, daß gemäß der vorliegenden Erfindung ein Verfahren zum Messen des Magnetfelds und eine Ladungsteilchenstrahlvorrichtung unter Verwendung des Verfahrens vorgesehen sind, wobei die durch ein Mustermatching gegebene Bildverarbeitung unter Verwendung eines nicht durch ein Magnetfeld beeinflußten ersten Bilds und eines durch den Einfluß eines Magnetfelds verzerrten zweiten Bilds ausgeführt wird. Alternativ wird die Bildverarbeitung zur Erfassung einer Bahn anhand mehrerer durch Ändern der Position des Magnetfelds und einer Bilderzeugungsposition erhaltener Bilder ausgeführt. Auf diese Weise können die räumliche Auflösung und der Dynamikbereich des Magnetfelds voneinander unterschieden werden, wodurch es ermöglicht wird, den Betrag und die Richtung des Magnetfelds an jedem räumlichen Punkt mit hoher Auflösung und hoher Empfindlichkeit zu messen.

[0124] Die vorliegende Erfindung wurde detailliert beschrieben, und es sei bemerkt, daß verschiedene Änderungen, Ersetzungen und Modifikationen daran vorgenommen werden können, ohne vom Schutzumfang der vorliegenden Erfindung abzuweichen.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Messen eines Magnetfelds umfassend die folgenden Schritte:
Übertragen eines Ladungsteilchenstrahls (**12a**) durch eine Referenzprobe (**14**), Erstellen eines Bildes (**24**) aus dem Ladungsteilchenstrahl mit gewünschter Vergrößerung und Erfassen (**19**) eines ersten Bildes;
Speichern (**20**) des so erfaßten ersten Bildes;
Schicken des Ladungsteilchenstrahls durch einen ein zu messendes Magnetfeld (**16**) enthaltenden Bereich, Erstellen eines Bildes mit einer gewünschten Vergrößerung aus dem vom zu messenden Magnetfeld (**16**) abgelenkten Ladungsteilchenstrahl und Erfassen (**19**) eines zweiten Bildes;
Speichern (**20**) des erfaßten zweiten Bildes;
Verarbeiten des ersten und des zweiten gespeicherten Bildes und Bestimmen der Verschiebung oder des Ablenkwinkels des Ladungsteilchenstrahls (**12a**); und
Bestimmen (**22**) des zu messenden räumlichen Magnetfelds (**16**) mittels auf der Verschiebung oder dem Ablenkwinkel basierender Berechnungen.

2. Verfahren zum Messen eines Magnetfeldes nach Anspruch 1, wobei die Bildverarbeitung (**21**) ein Matchingvorgang ist.

3. Verfahren zum Messen eines Magnetfeldes nach Anspruch 2, wobei beim Matchingvorgang ein drittes Bild mit einer vorgegebenen Größe aus dem ersten Bild extrahiert wird, das dritte und das zweite Bild in Über-

lappung gebracht werden und ein Kreuz-Korrelationskoeffizient berechnet wird, der zum Höchstwert des Kreuz-Korrelationskoeffizienten gehörige Überlappungspunkt des dritten und des zweiten Bildes bestimmt wird, und die Verschiebung des Ladungsteilchenstrahls aus dem so bestimmten Überlappungspunkt bestimmt wird.

4. Verfahren zum Messen eines Magnetfeldes nach Anspruch 2, wobei beim Matchingvorgang ein drittes Bild mit einer vorgegebenen Größe aus dem ersten Bild extrahiert wird, das dritte Bild und das zweite Bild in Überlappung gebracht werden und die Differenzen der Helligkeitswerte in den jeweiligen Überlappungsbereichen addiert werden, ein zum Minimalwert der Summe gehöriger Überlappungspunkt des dritten und des zweiten Bildes bestimmt wird, und die Verschiebung des Ladungsteilchenstrahls aus dem so bestimmten Überlappungspunkt bestimmt wird.

5. Verfahren zum Messen eines Magnetfeldes nach Anspruch 2, wobei beim Matchingvorgang das erste und das zweite Bild jeweils mit einer endlichen Anzahl von Pixeln quantisiert werden, und die Daten der Helligkeitswerte jedes Pixels mit mindestens einem Bit abgetastet werden.

6. Verfahren zum Messen eines Magnetfeldes nach Anspruch 2, wobei beim Matchingvorgang ein drittes Bild mit einer vorgegebenen Größe aus dem zweiten Bild extrahiert wird, und das so extrahierte dritte Bild und das erste Bild in Überlappung gebracht werden, wobei im Verfahren ferner wahlweise
das extrahierte dritte Bild und das erste Bild in Überlappung gebracht werden, um den Kreuz-Korrelationskoeffizienten zu berechnen; oder
die Differenzen der Helligkeitswerte entsprechender Pixel im Überlappungsbereich addiert werden.

7. Verfahren nach Anspruch 1, wobei:
der Abstand zwischen dem zu messenden Magnetfeld (**16**) und dem bildgebenden Punkt (**24a**) des Ladungsteilchenstrahls verändert wird, und mehrere durch das zu messende Magnetfeld verzerrte Bilder der Referenzprobe erstellt werden;
die so erstellten Bilder erfaßt (**19**) und gespeichert (**20**) werden; und
die verzerrten Bilder im Speicher verarbeitet werden, um die Verschiebung oder den Ablenkwinkel des Ladungsteilchenstrahls zu bestimmen.

8. Verfahren zum Messen eines Magnetfelds nach Anspruch 7, wobei die Bildverarbeitung (**21**) ein Matchingvorgang ist.

9. Verfahren zum Messen eines Magnetfelds nach Anspruch 7, wobei die Bildverarbeitung (**21**) ein Vorgang ist, bei dem die Bahn des Ladungsteilchenstrahls mittels der verzerrten Bilder bestimmt wird.

10. Verfahren zum Messen eines Magnetfelds nach Anspruch 1 oder 7, wobei die Referenzprobe (**14**) aus mindestens zwei Materialsorten zusammengesetzt ist.

11. Verfahren zum Messen eines Magnetfelds nach Anspruch 1 oder 7, wobei die Referenzprobe (**14**) ein Film ist.

12. Verfahren zum Messen eines Magnetfelds nach Anspruch 1 oder 7, wobei die Referenzprobe (**14**) eine unregelmäßige Teilchenanordnung aufweist.

13. Verfahren zum Messen eines Magnetfelds nach Anspruch 1 oder 7, wobei die Referenzprobe (**14**) wenigstens zwei Teilchengrößen aufweist.

14. Verfahren zum Messen eines Magnetfelds nach Anspruch 1 oder 7, wobei die Referenzprobe (**14**) das Beobachten mehrerer Helligkeitswerte wahlweise in einem Hellfeld- oder einem Dunkelfeldbild des übertragenen Ladungsteilchenstrahls (**12a**) erlaubt.

15. Verfahren zum Messen eines Magnetfelds nach Anspruch 1 oder 7, wobei die Referenzprobe (**14**) Bilder mindestens zweier Größen von Stellen mit denselben in einem der räumlichen Auflösung entsprechenden Bereich beobachteten Helligkeitswerten erstellen kann, wenn die die Referenzprobe bildenden Teilchen wahlweise in einem Hellfeld- oder einem Dunkelfeldbild eines übertragenden Ladungsteilchenstrahls beobachtet werden.

16. Verfahren zum Messen eines Magnetfelds nach Anspruch 1 oder 7, wobei die Referenzprobe (**14**) min-

destens zwei verschiedene Teilchengrößen aufweist, die in einem der räumlichen Auflösung entsprechenden Bereich wahlweise in einem Hellfeld- oder einem Dunkelfeldbild des übertragenden Ladungsteilchenstrahls (**12a**) beobachtet werden.

17. Verfahren zum Messen eines Magnetfelds nach Anspruch 1 oder 7, wobei die Referenzprobe (**14**) eine unebene ungleichmäßige Querschnittsfläche sowie eine nicht-periodische Struktur aufweist.

18. Ladungsteilchenstrahlvorrichtung umfassend:
Einrichtung (**11**) zum Erzeugen eines Ladungsteilchenstrahls (**12a**);
Einrichtung (**13**) zum Fokussieren des Ladungsteilchenstrahls;
eine Referenzprobe (**14**) zur Übertragung des Ladungsteilchenstrahls für die Erstellung eines Bildes;
eine Halterung (**141**) zum Befestigen der Referenzprobe;
ein Gestell (**161**) zum Anordnen einer Probe an einer gewünschten Position zum Erzeugen eines zu messenden Magnetfelds, wobei die Probe so angeordnet ist, daß der Ladungsteüchenstrahl das Magnetfeld durchquert;
Einrichtung (**17**, **18**) zum Erstellen eines Bildes der Referenzprobe durch die Übertragung des Ladungsteilchenstrahls, wobei das Bild eine gewünschte Vergrößerung aufweist, und zum Erfassen eines ersten Bildes;
Einrichtung (**20**) zum Speichern des so erfaßten ersten Bildes;
Einrichtung zum Erstellen eines ersten Bildes mit der gewünschten Vergrößerung aus dem durch das zu messende Magnetfeld (**16**) abgelenkten Ladungsteilchenstrahl und zum Erfassen eines zweiten Bildes;
Einrichtung (**20**) zum Speichern des so erfaßten zweiten Bildes;
Einrichtung (**21**) zum Verarbeiten des ersten und des zweiten Bildes und zum Bestimmen der Verschiebung oder des Ablenkwinkels des Ladungsteilchenstrahls (**12a**); und
Einrichtung (**22**) zum Bestimmen eines zu messenden räumlichen Magnetfelds mittels auf der Verschiebung oder dem Ablenkwinkel beruhenden Berechnungen.

19. Ladungsteilchenstrahlvorrichtung nach Anspruch 18, ferner umfassend eine Einrichtung (**26**) zum Bewegen einer Probe zum Erzeugen des zu messenden Magnetfelds.

20. Ladungsteilchenstrahlvorrichtung nach Anspruch 19, wobei die Erfassungseinrichtung (**19**) ein Bild der Referenzprobe (**14**) erfaßt, wenn die Bewegungseinrichtung (**26**) inaktiv ist, und ein Bild der Referenzprobe (**14**), wenn die Bewegungseinrichtung (**26**) aktiv ist.

21. Ladungsteilchenstrahlvorrichtung nach Anspruch 18, wobei die Erfassungseinrichtung (**19**) eine Einheit zum Erfassen von Bildern der Referenzprobe (**14**) durch Verändern des Abstands zwischen der Probe zur Erzeugung eines zu messenden Magnetfelds und der bildgebenden Position des Ladungsteilchenstrahls (**12a**) enthält.

22. Ladungsteilchenstrahlvorrichtung nach einem der Ansprüche 18 bis 21, wobei die Bildverarbeitungseinrichtung (**21**) eine Einrichtung zur Durchführung eines Matchingvorgangs enthält.

23. Ladungsteilchenstrahlvorrichtung nach einem der Ansprüche 18 bis 22, wobei die Bildverarbeitungseinrichtung (**21**) eine Einrichtung zum Bestimmen der Bahn des Ladungsteilchenstrahls enthält.

24. Ladungsteilchenstrahlvorrichtung nach einem der Ansprüche 18 bis 23, wobei die Bildverarbeitungseinrichtung (**21**) eine Fourier-Transformationseinheit enthält.

25. Ladungsteilchenstrahlvorrichtung nach einem der Ansprüche 18 bis 24, wobei die Einrichtung (**22**) zum Bestimmen eines zu messenden räumlichen Magnetfelds eine Einrichtung für Computertomographie-Bildverarbeitung enthält.

26. Ladungsteilchenstrahlvorrichtung nach einem der Ansprüche 18 bis 25, wobei die Referenzprobe (**14**) aus mindestens zwei Materialsorten hergestellt ist.

27. Ladungsteilchenstrahlvorrichtung nach Anspruch 20 oder 21, wobei die Referenzprobe (**14**) aus einem Film hergestellt ist.

28. Ladungsteilchenstrahlvorrichtung nach Anspruch 20 oder 21, wobei die Referenzprobe (**14**) eine unregelmäßige Anordnung der die Referenzprobe bildenden Teilchen aufweist.

29. Ladungsteilchenstrahlvorrichtung nach Anspruch 20 oder 21, wobei die Referenzprobe (**14**) mindestens zwei verschiedene Teilchengrößen aufweist.

30. Ladungsteilchenstrahlvorrichtung nach Anspruch 20 oder 21, wobei die Referenzprobe (**14**) so beschaffen ist, daß mehrere Helligkeitswerte wahlweise in einem Hellfeld- oder einem Dunkelfeldbild des übertragenen Ladungsteilchenstrahls (**12a**) beobachtet werden können.

31. Ladungsteilchenstrahlvorrichtung nach Anspruch 20 oder 21, wobei die Referenzprobe (**14**) ein Bild mit mindestens zwei verschiedenen Größen von Bereichen mit denselben in einem der räumlichen Auflösung entsprechenden Bereich beobachteten Helligkeitswerten erstellt, wenn die die Referenzprobe (**14**) bildenden Teilchen wahlweise als Hellfeld- oder als Dunkelfeldbild des übertragenen Ladungsteilchenstrahls (**12a**) beobachtet werden.

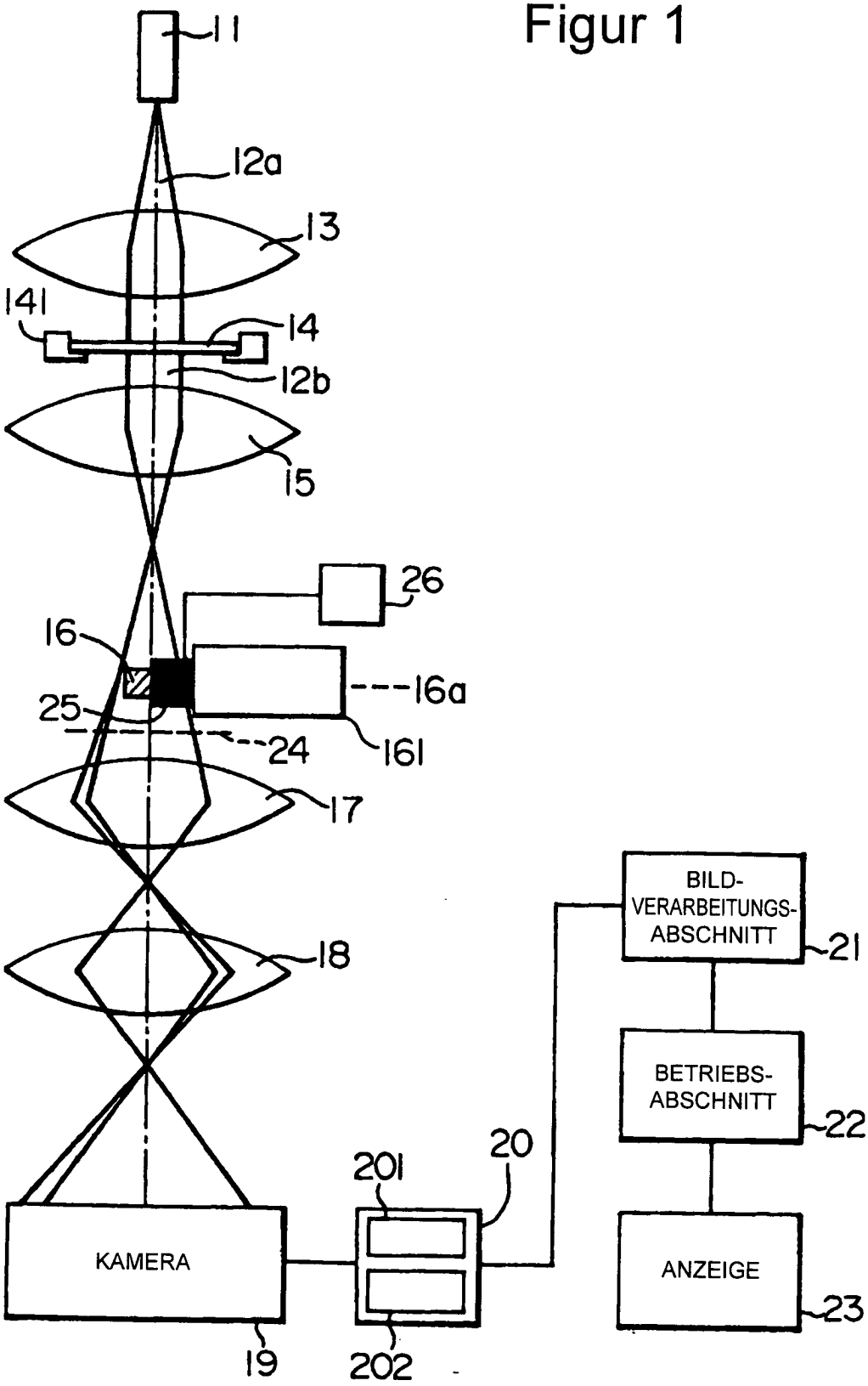
32. Ladungsteilchenstrahlvorrichtung nach einem der Ansprüche 18 bis 21, wobei die Referenzprobe (**14**) mindestens zwei verschiedene Größen von in einem der räumlichen Auflösung entsprechenden Bereich beobachteten Teilchen aufweist, wenn die die Referenzprobe (**24**) bildenden Teilchen wahlweise als Hellfeld- oder Dunkelfeldbild des übertragenen Ladungsteilchenstrahls beobachtet werden.

33. Ladungsteilchenstrahlvorrichtung nach Anspruch 20 oder 21, wobei die Referenzprobe (**14**) einen vorgegebenen Querschnitt mit unregelmäßiger Form, unebener Fläche und nicht-periodischer Struktur aufweist.

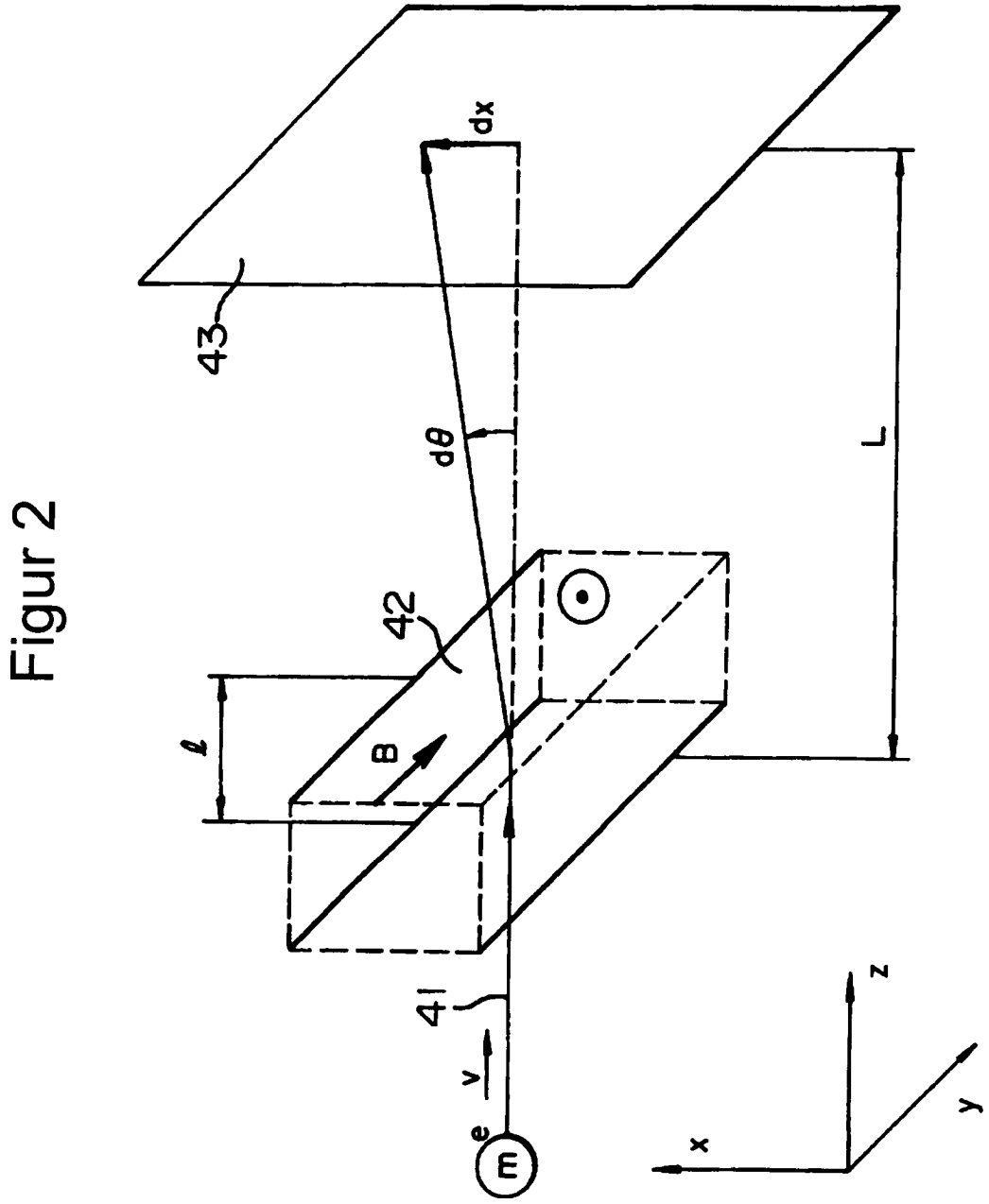
Es folgen 16 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

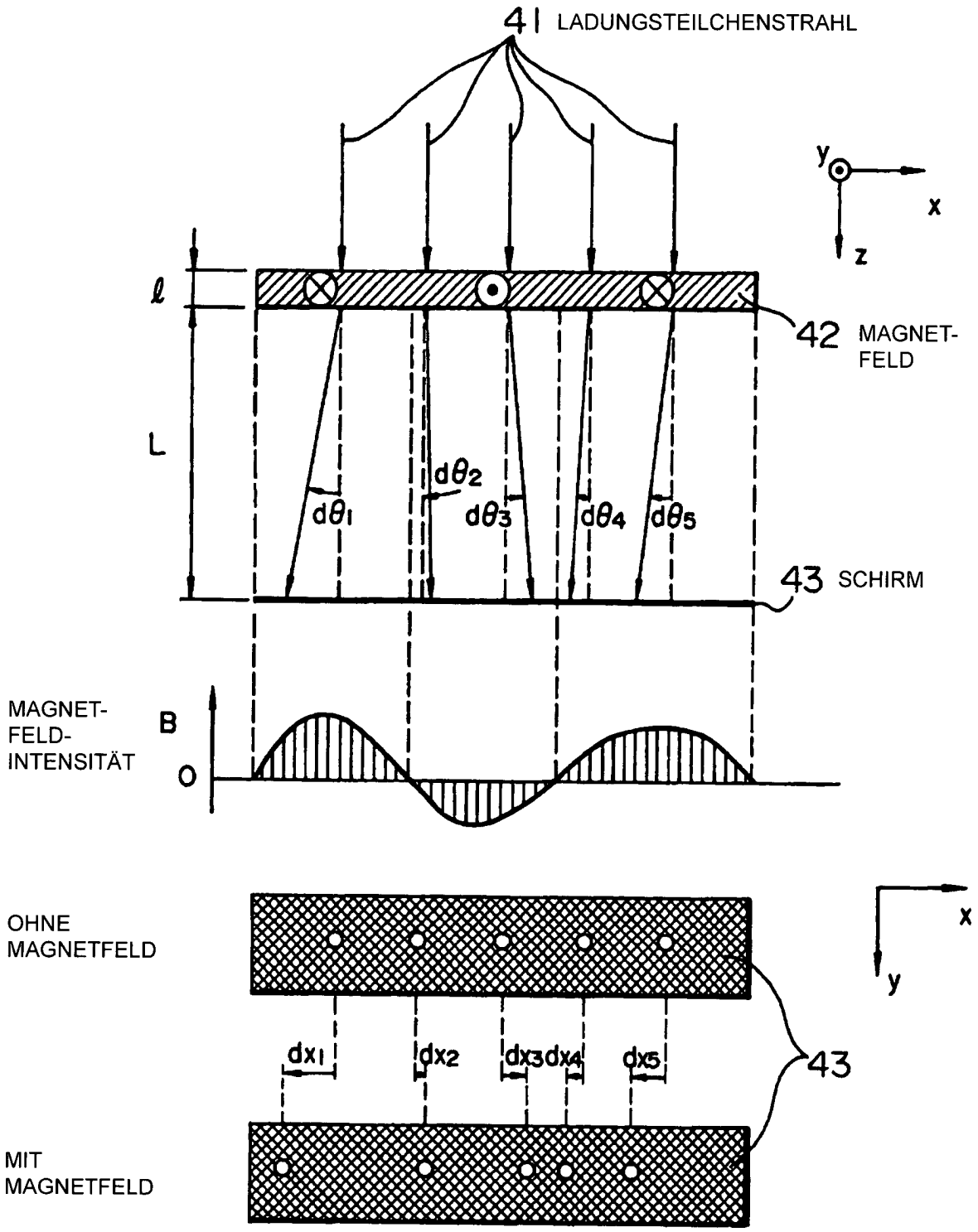
Figur 1



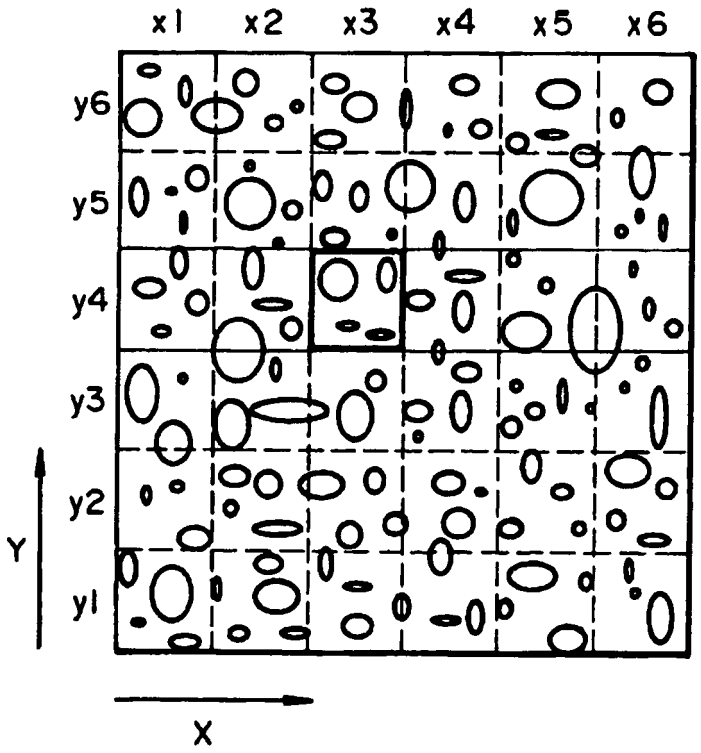
Figur 2



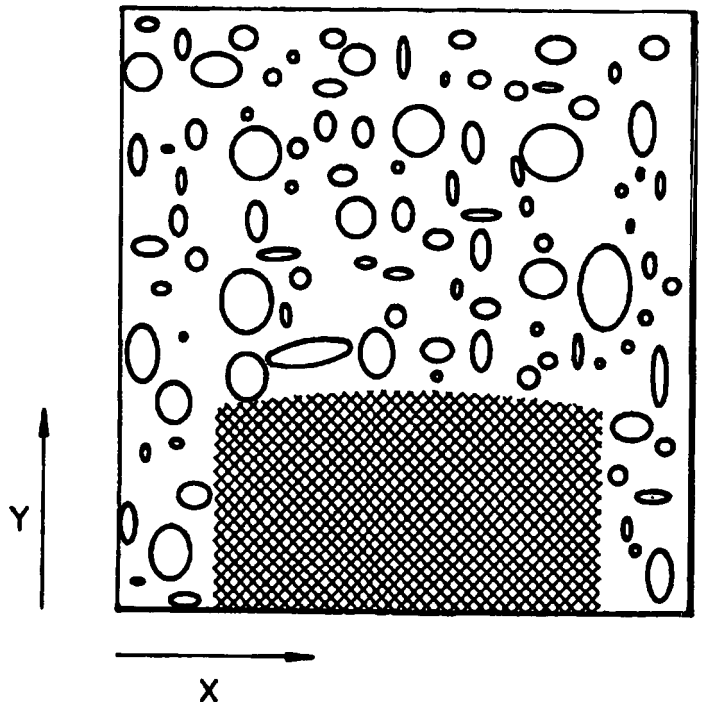
Figur 3


41 LADUNGSTEILCHENSTRAHL
y
x
z
ℓ
42 MAGNET-FELD
L
dθ1
dθ2
dθ3
dθ4
dθ5
43 SCHIRM
MAGNET-FELD-INTENSITÄT
B
0
OHNE MAGNETFELD
x
y
dx1
dx2
dx3
dx4
dx5
43
MIT MAGNETFELD

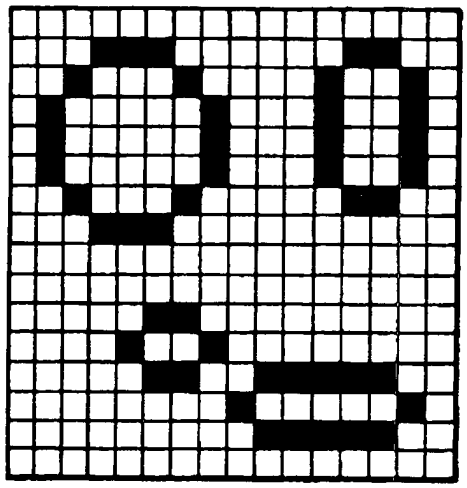
Figur 4A



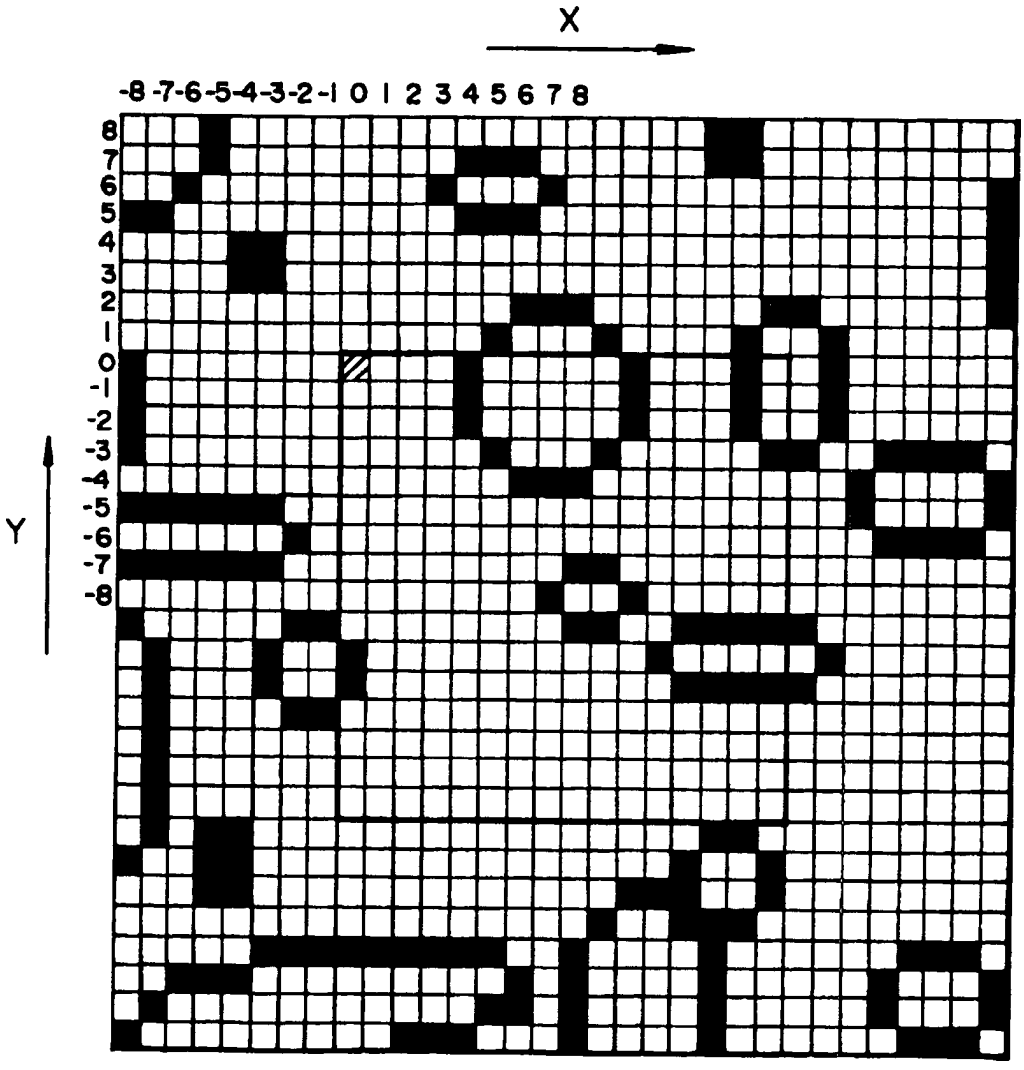
Figur 4B



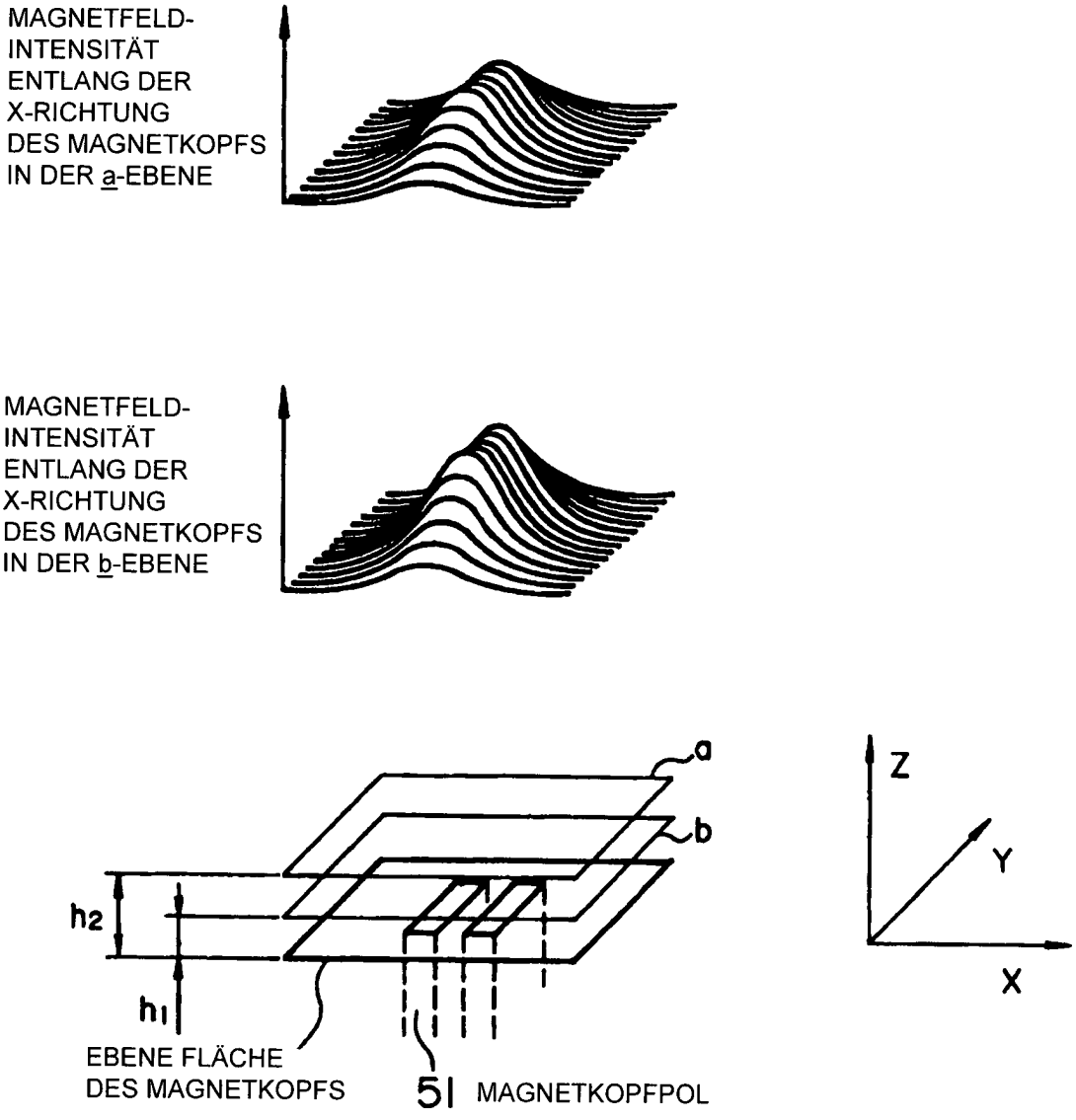
Figur 5



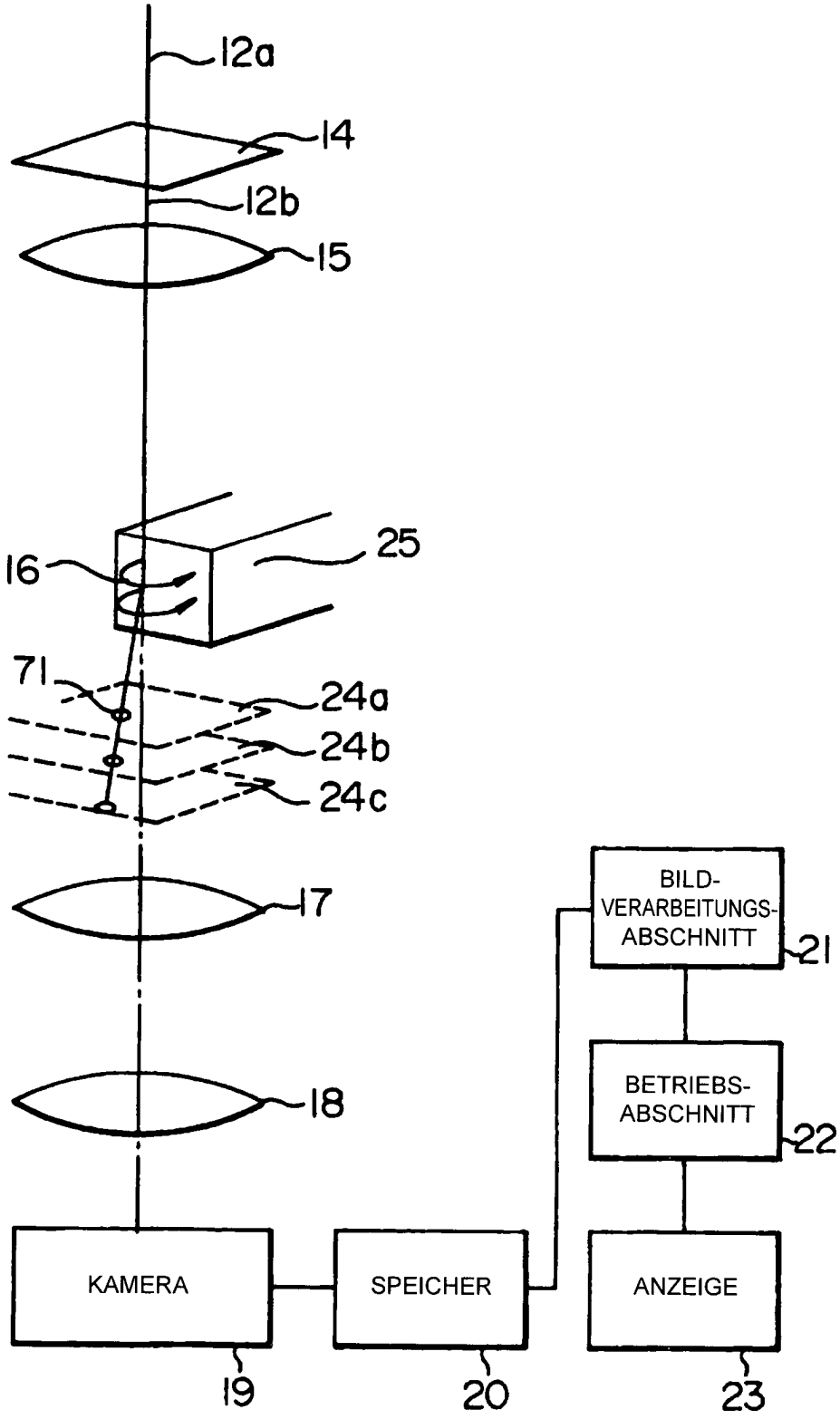
Figur 6



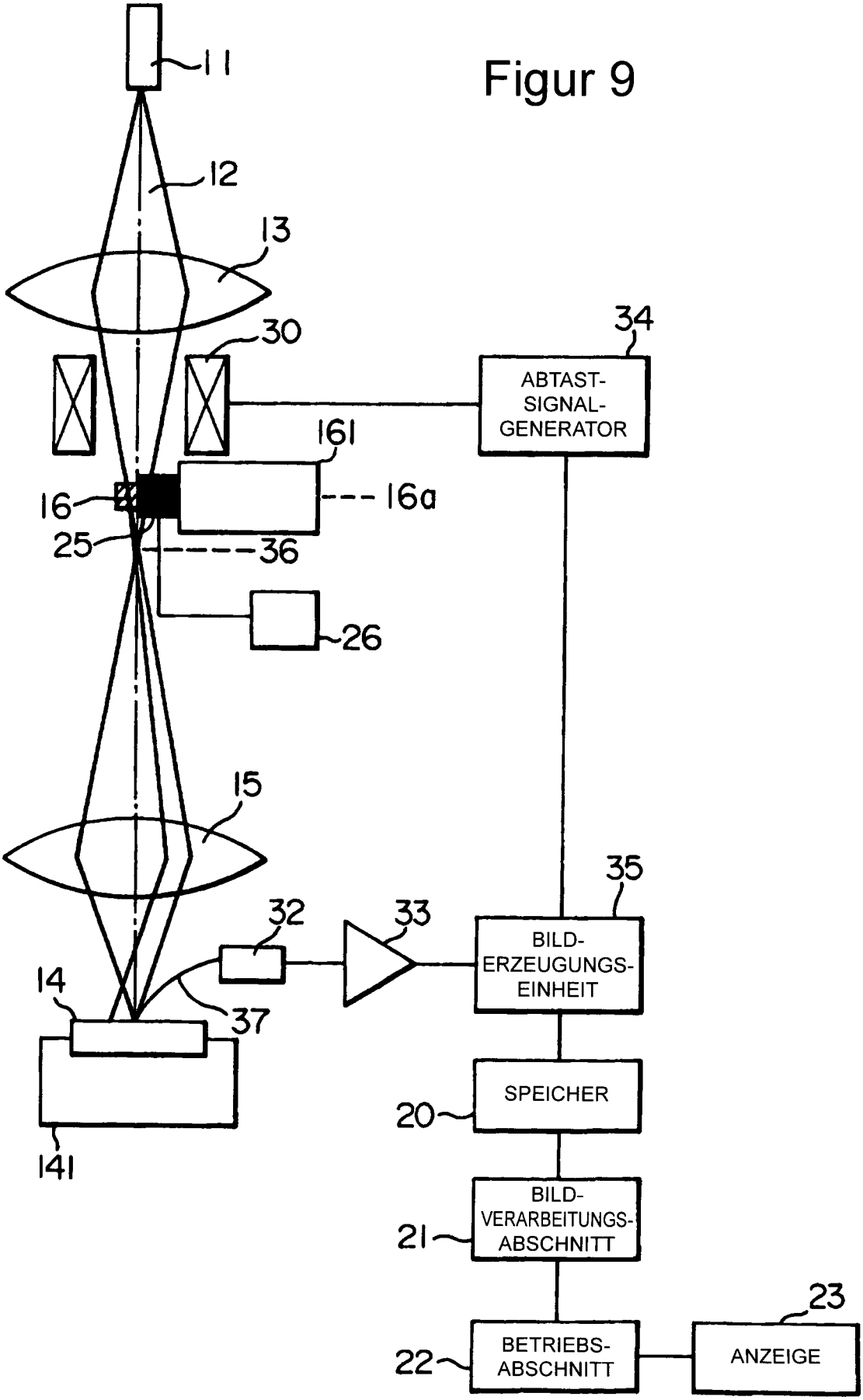
Figur 7


MAGNETFELD-
INTENSITÄT
ENTLANG DER
X-RICHTUNG
DES MAGNETKOPFS
IN DER a-EBENE
MAGNETFELD-
INTENSITÄT
ENTLANG DER
X-RICHTUNG
DES MAGNETKOPFS
IN DER b-EBENE
a
b
h2
h1
EBENE FLÄCHE
DES MAGNETKOPFS
51
MAGNETKOPFPOL
Z
Y
X

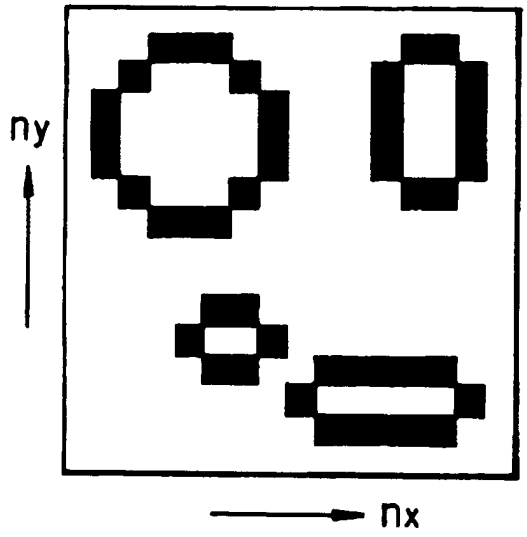
Figur 8


12a
14
12b
15
16
25
71
24a
24b
24c
17
18
KAMERA
SPEICHER
BILD-
VERARBEITUNGS-
ABSCHNITT
BETRIEBS-
ABSCHNITT
ANZEIGE
19
20
21
22
23

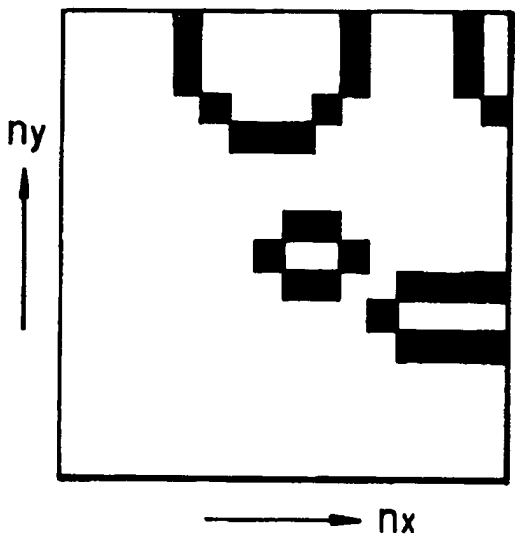
Figur 9


11
12
13
30
34
ABTAST-
SIGNAL-
GENERATOR
161
16
16a
25
36
26
15
35
32
33
BILD-
ERZEUGUNGS-
EINHEIT
14
37
SPEICHER
20
BILD-
VERARBEITUNGS-
ABSCHNITT
21
23
BETRIEBS-
ABSCHNITT
22
ANZEIGE
141

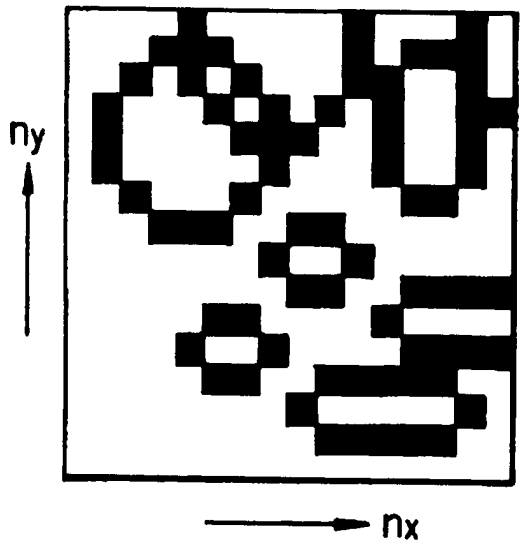
Figur 10A



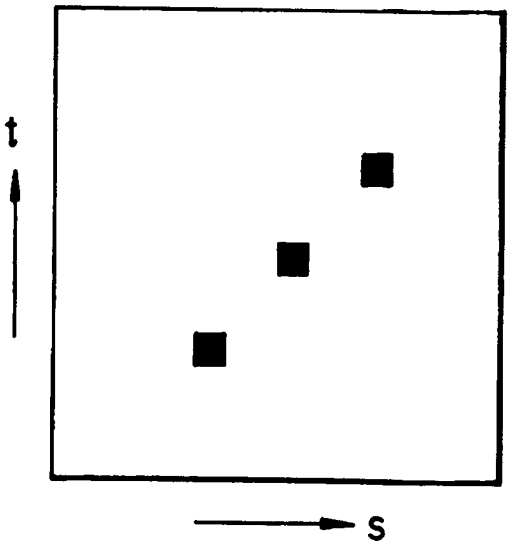
Figur 10B



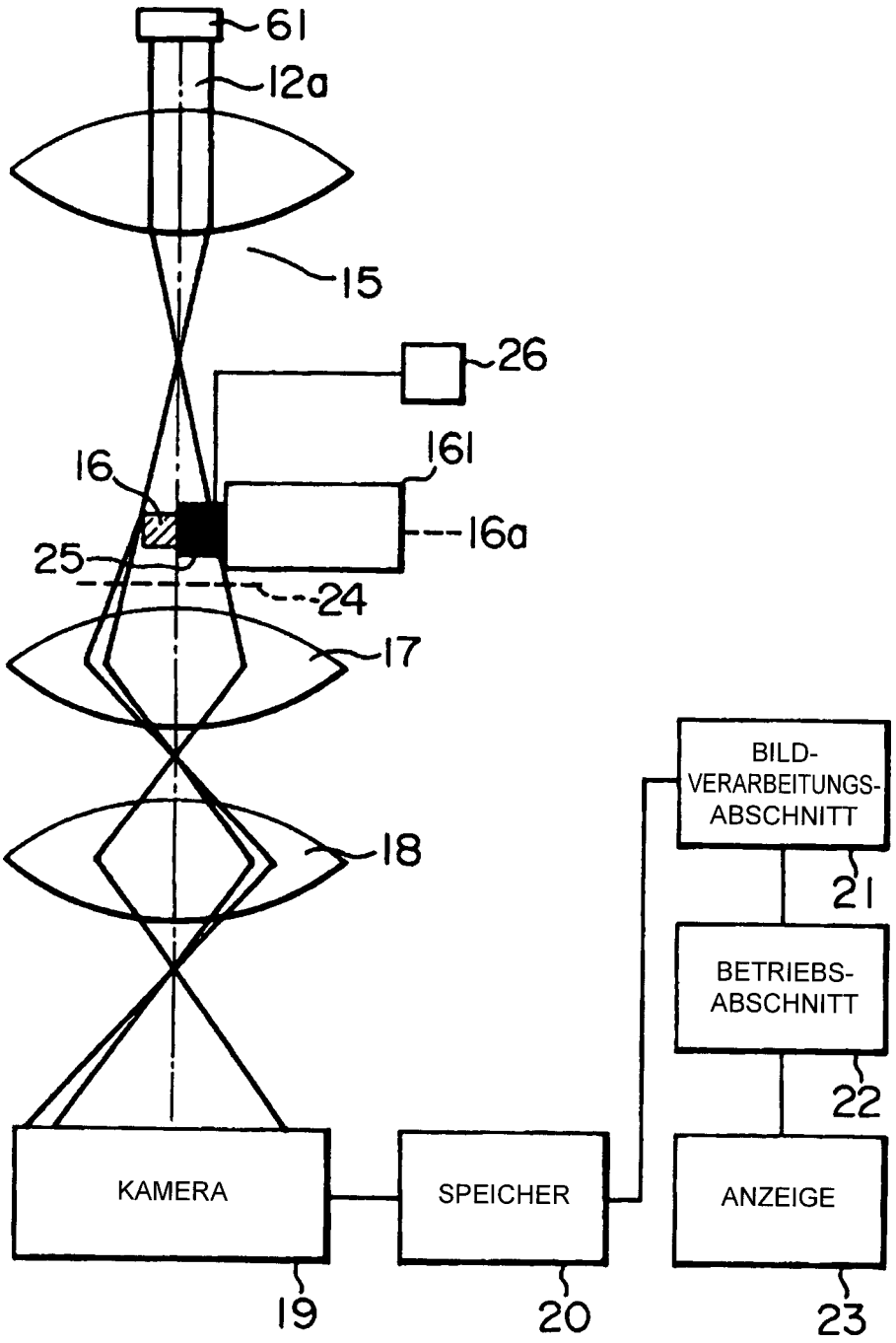
Figur 10C



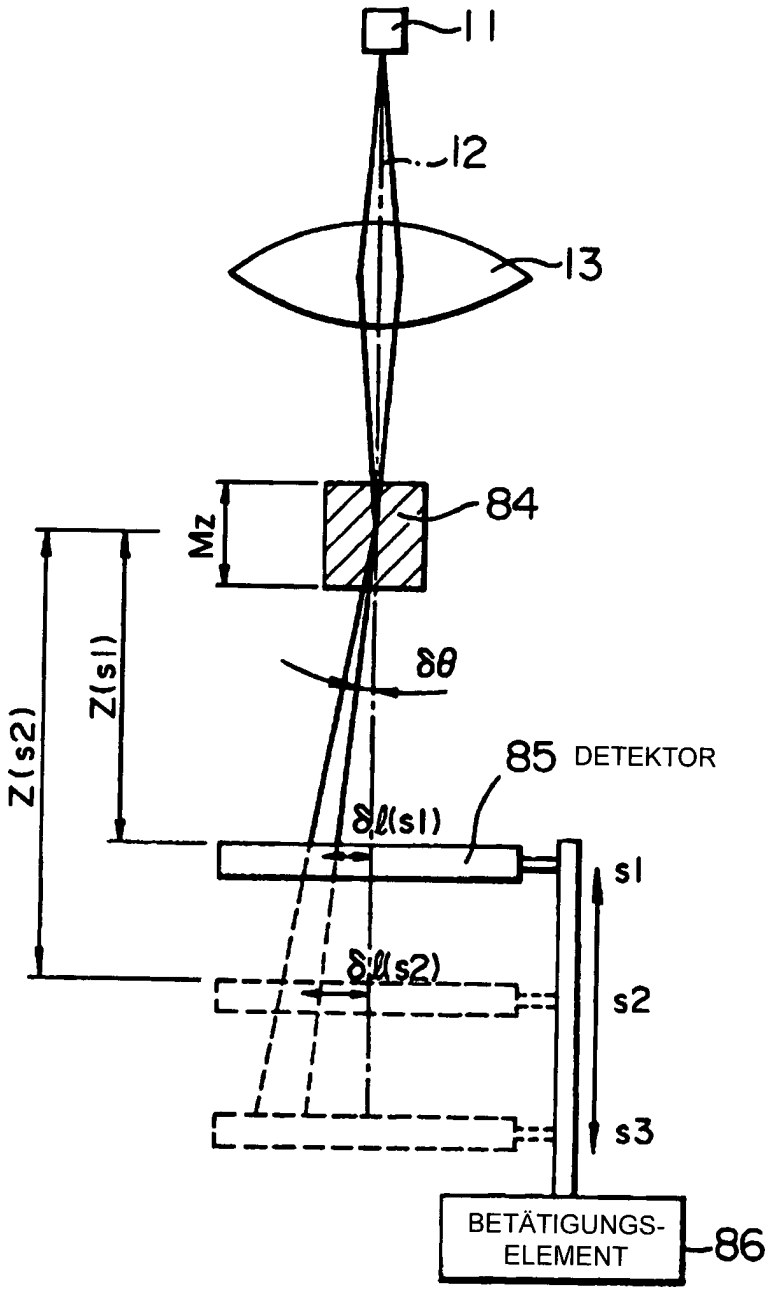
Figur 10D



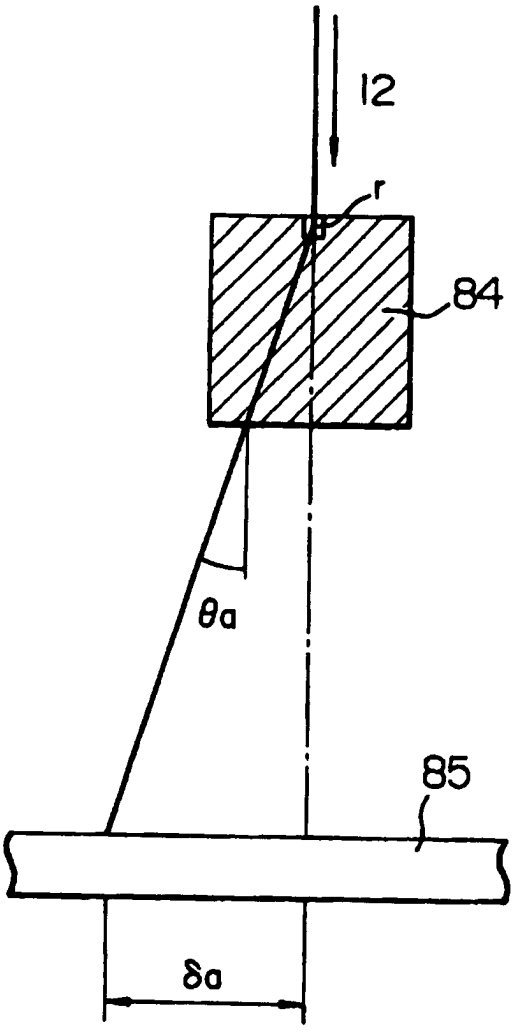
Figur 11


61
12a
15
26
161
16
16a
25
24
17
18
BILD-
VERARBEITUNGS-
ABSCHNITT
21
BETRIEBS-
ABSCHNITT
22
KAMERA
SPEICHER
ANZEIGE
19
20
23

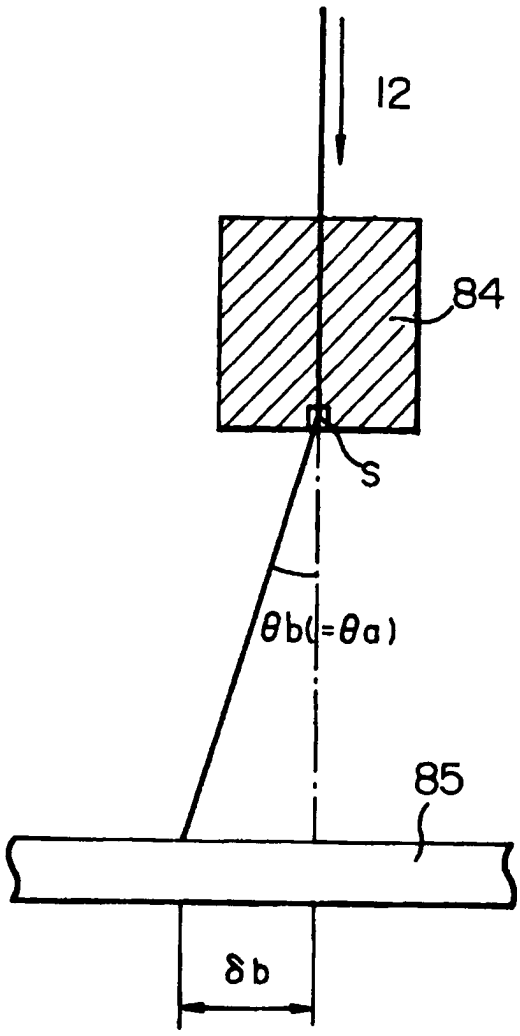
Figur 12


11
12
13
84
Mz
δθ
Z(s1)
Z(s2)
85 DETEKTOR
δℓ(s1)
δℓ(s2)
s1
s2
s3
BETÄTIGUNGS-
ELEMENT
86

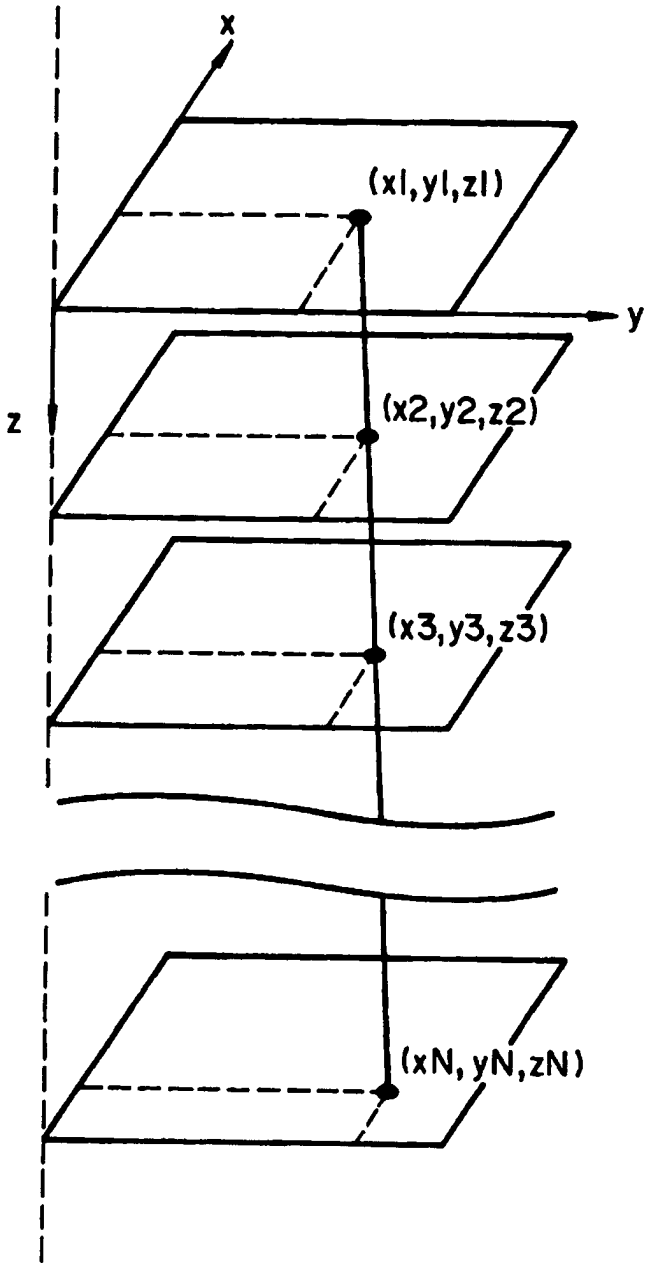
Figur 13A



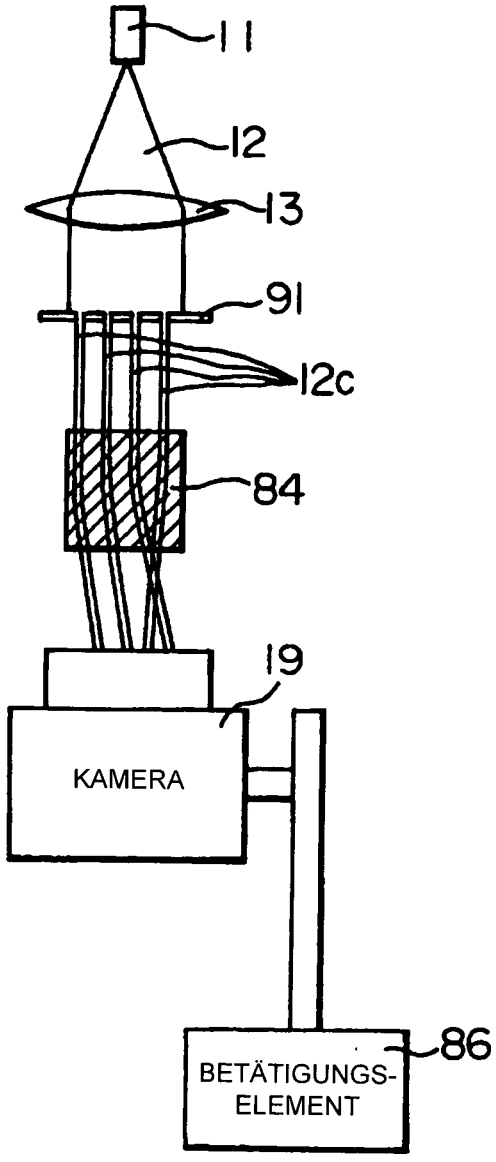
Figur 13B



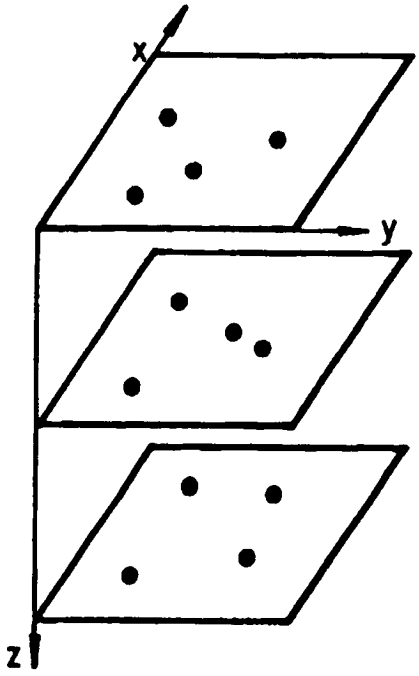
Figur 14



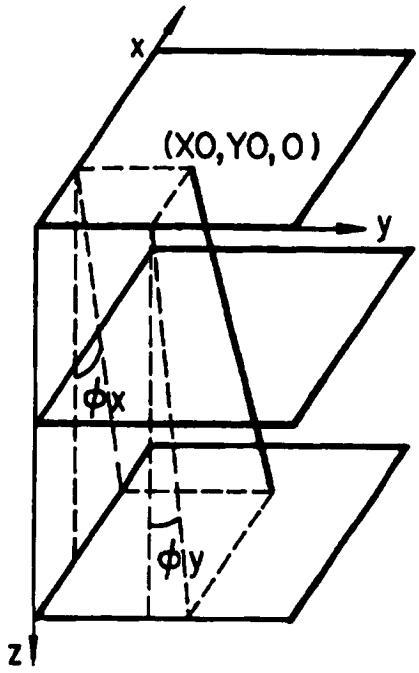
Figur 15



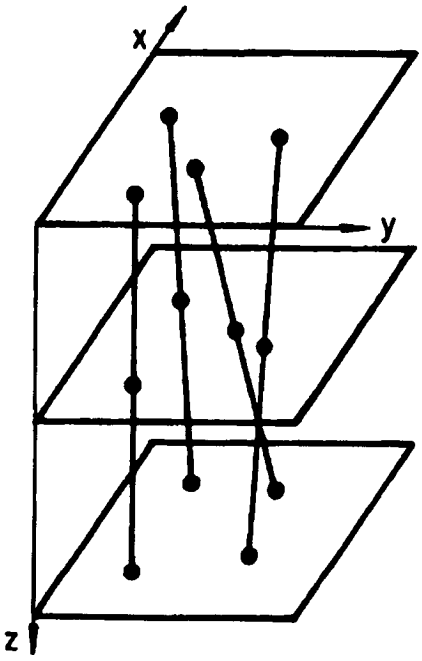
Figur 16A



Figur 16B



Figur 16C



Figur 17

