

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges
Eigentum

Internationales Büro

(43) Internationales
Veröffentlichungsdatum
28. Februar 2013 (28.02.2013)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2013/026537 A2

(51) Internationale Patentklassifikation:
H01J 37/244 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2012/003414

(22) Internationales Anmeldedatum:
9. August 2012 (09.08.2012)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2011 052 924.1
23. August 2011 (23.08.2011) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme
von US): **UNIVERSITÄT REGENSBURG** [DE/DE];
Universitätsstr. 31, 93053 Regensburg (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **ZWECK, Josef**
[DE/DE]; Höflinger Ring 68, 93083 Obertraubling (DE).

(74) Anwalt: **BOEHMERT & BOEHMERT; LUCKE,**
Andreas, Pettenkoferstrasse 20-22, 80336 München (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,

AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW,
BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK,
DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM,
GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN,
KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD,
ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI,
NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW,
SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM,
TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM,
ZW.

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW,
GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ,
TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ,
RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY,
CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT,
LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE,
SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA,
GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu
veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz
2 Buchstabe g)

(54) Title: DEVICE AND METHOD FOR MEASURING THE BEAM DEFLECTION BY MEANS OF FREQUENCY
ANALYSIS

(54) Bezeichnung : VORRICHTUNG UND VERFAHREN ZUR MESSUNG DER STRAHLABLENKUNG MITTELS
FREQUENZANALYSE

(57) Abstract: The invention relates to a device for determining a deflection of the test beam caused by interaction with a sample, comprising an oscillator unit that periodically deflects the test beam and a detector unit relative to one another. The detector unit is designed in such a way that the sensitive surface of the detector covered by the test beam and thus the corresponding measurement signal changes in a non-linear manner as a function of the deflection in the event of relative deflection of the test beam and of the detector unit. An evaluation of the detector signal on the basis of a Fourier spectral analysis and the theory of second harmonics generation then enables the definition of the smallest beam shifts caused by interaction with the sample having high dynamics. In an alternative design, instead of the beam deflection the effect of the sample to be measured is periodically modulated.

(57) Zusammenfassung: Eine Vorrichtung zur Bestimmung einer durch Wechselwirkung mit einer Probe hervorgerufenen Ablenkung des Sondenstrahls umfasst eine Oszillatoreinheit, welche den Sondenstrahl und eine Detektoreinheit relativ zueinander periodisch auslenkt. Die Detektoreinheit ist derart eingerichtet, dass sich die von dem Sondenstrahl überdeckte sensitive Oberfläche der Detektoreinheit und damit das entsprechende Messsignal bei relativer Auslenkung des Sondenstrahls und der Detektoreinheit nichtlinear als Funktion der Auslenkung ändert. Eine Auswertung des Detektorsignals auf Basis einer Fourier-Spektralanalyse und der Theorie der Second Harmonics Generation ermöglicht dann die Bestimmung kleinster durch Wechselwirkung mit der Probe hervorgerufener Strahlverschiebungen mit hoher Dynamik. In einer alternativen Ausführung wird anstelle der Strahlauslenkung die zu vermessende Wirkung der Probe periodisch moduliert.

WO 2013/026537 A2

VORRICHTUNG UND VERFAHREN ZUR MESSUNG DER STRAHLABLENKUNG MITTELS FREQUENZANALYSE

Gebiet der Erfindung

Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf die Bestimmung einer durch Wechselwirkung mit einer Probe hervorgerufenen Ablenkung eines Sondenstrahls, um aus der Ablenkung des Sondenstrahls Rückschlüsse auf die Probe zu ziehen. Insbesondere bezieht sich die Erfindung auf die Bestimmung der Ablenkung eines Sondenstrahls in Mikroskopen, z.B. in Elektronenmikroskopen.

Grundlagen und Stand der Technik

In der Mikroskopie wird eine zu untersuchende Probe mit einem Sondenstrahl in Wechselwirkung gebracht, um aus der Wechselwirkung Rückschlüsse über die Natur der Probe zu ziehen. Die Wechselwirkung einer Sonde, beispielsweise eines Lichtstrahls oder eines Teilchenstrahls, mit der zu untersuchenden Probe wird im Allgemeinen vermessen, indem die Ablenkung, welche der Strahl aufgrund der Probe aus seiner Ruhelage erfährt, detektiert wird und aus der Ablenkung auf die physikalischen Eigenschaften der Probe rückgeschlossen wird. Dadurch lassen sich die physikalischen Eigenschaften der Probe am Ort des einfallenden Strahls aufklären.

Dieses Messprinzip wird schematisch in Fig. 1 veranschaulicht. Die zu untersuchende Probe 10 liegt im Strahlengang eines einfallenden Sondenstrahls 12. Fig. 1 zeigt eine Anordnung, bei der in Transmission gemessen wird. Der einfallende Sondenstrahl 12 wechselwirkt mit der Probe 10 und wird dadurch gegenüber einem Strahlverlauf, wie er sich ohne Probe 10 ergeben würde, abgelenkt. Der abgelenkte Sondenstrahl 14 trifft auf eine aktive Detektoroberfläche 16 und wird dort detektiert. Die Ablenkung Δx , welche der Sondenstrahl 12 gegenüber einem Strahlverlauf ohne Probe 10 erfährt, wird erfasst und gibt ein Maß für die Wechselwirkung des Sondenstrahls am Ort des einfallenden Strahls 12. Wird der einfallende Sondenstrahl 12

nacheinander auf unterschiedliche Orte auf der Probe 10 fokussiert und jeweils die Verschiebung Δx in der Detektorebene 16 gemessen, entsteht ein orts aufgelöstes Bild der Probe 10.

Ein illustratives Beispiel, welches jedoch keinerlei Einschränkung der beschriebenen Methode darstellen soll, ist die Wechselwirkung des Elektronenstrahls eines Transmissions-Elektronenmikroskops mit einer magnetischen Probe. Aufgrund der Lorenzkraft erfahren die Elektronen des einfallenden Sondenstrahls 12 in der Probe eine Ablenkung, welche durch einen positionsempfindlichen Detektor bestimmt werden kann. Bei bekannter Dicke der Probe lässt sich daraus auf die am Strahlort wirkende magnetische Induktion rückschließen. Anwendungen dieser sogenannten Lorenz-Elektronenmikroskopie sind beispielsweise in T. Uhlig und J. Zweck, „Direct Observation of Switching Processes in Permalloy Rings with Lorentz Microscopy“, Phys. Rev. Lett. 93 (2004) 047203 sowie T. Uhlig *et al.*, „Shifting and Pinning of a Magnetic Vortex Core and a Permalloy Dot By Magnetic Field“, Phys. Rev. Lett. 95 (2005) 237205 beschrieben.

Die in solchen Anwendungen erreichte Messauflösung ist davon abhängig, wie genau es gelingt, die durch die Probe hervorgerufene Verschiebung des Sondenstrahls in der Detektorebene zu bestimmen.

Derzeitige Verfahren verwenden als positionsempfindliche Detektoren häufig mehrfach sektorierte Halbleiterdetektoren, teils mit einer zentralen Lochöffnung. Die Verwendung solcher Detektoren in der Transmissions-Elektronenmikroskopie ist beispielsweise in J. N. Chapman *et al.*, „Mapping Induction Distributions by Transmission Electron Microscopy“, J. Appl. Phys. 69 (1991) 6078 beschrieben. Der Sondenstrahl wird in Ruhelage auf den Detektor zentriert, und die Differenzsignale diagonal gegenüberliegender Detektorsegmente A, C bzw. B, D werden registriert. Die Verbindungsachse gegenüberliegender Detektorsegmente definiert dabei die jeweilige Detektionsrichtung. Durch die Differenzbildung wird das Signal eines unabgelenkten Strahls, das zu gleich großen Anteilen auf die in Differenzschaltung zusammengeschalteten gegenüberliegenden Sektoren fällt, vollständig kompensiert. Bei Verschiebung des Sondenstrahls aus der Ruhelage durch Wechselwirkung mit der Probe wird die Signalkompensation aufgehoben, und das Messsignal zeigt die Strahlenverschiebung an.

Da die Verschiebungen der Sonde jedoch in der Regel klein sind und das Messsignal proportional zu der jeweils vom Strahl überdeckten sensitiven Detektorfläche ist, erfordert eine sol-

che Differenzbildung die präzise Detektion eines kleinen Signals, das additiv auf einem um ein Mehrfaches größeren Grundsignal liegt. Aus diesem Grund wird oft ein Detektor mit einem zentralen Loch eingesetzt, welches das nicht nutzbare Grundsignal stark reduziert und daher das Nutzsignal leichter zugänglich macht. Allerdings ist damit der Nachteil einer Reduktion der Höhe des Messsignals verbunden, wodurch das Rauschen des Signals, in der Elektronenmikroskopie beispielsweise in Form von Shot Noise, im Verhältnis zum Nutzsignal stärker hervortritt.

Eine Detektorkonfiguration mit zentralem Loch ist beispielhaft in Fig. 2 gezeigt. Teilbild 2a stellt die Situation für einen unabgelenkten Strahl dar. Der Sondenstrahl, welcher konvergent auf die Probe trifft, bildet in der Detektorebene (entspricht der Zeichenebene der Fig. 2) eine scheibchenförmige Ausleuchtung 18, welche sich durch Schnitt des Sondenstrahlkegels mit der Detektorebene 16 ergibt. Sie ist in Fig. 2a bezüglich der Detektorsensoren A, B, C und D zentriert, so dass das Ausleuchtungsscheibchen 18 gleichmäßig alle vier Sektoren beleuchtet. Wie in Fig. 2a gezeigt, sind die gegenüberliegenden Detektorsektoren A und C, bzw. B und D jeweils über Differenzglieder 20 bzw. 20' zusammengeschaltet. Da das in den Sektorelementen detektierte Signal proportional zur beleuchteten Detektorfläche ist, ergibt die Differenzbildung bei unabgelenktem Strahl gerade ein Nullsignal. Dadurch wird die Methode unempfindlich gegenüber Schwankungen der Strahlintensität, wie sie z.B. durch Emissionsschwankungen, lokal variable Probenabsorption oder ähnliche Effekte hervorgerufen werden können.

Bewirkt jedoch die Wechselwirkung des Sondenstrahls mit der Probe eine Verkipfung des Sondenstrahls, wie sie in Fig. 1 schematisch illustriert ist, so äußert sich diese in der Detektorebene als Verschiebung des Ausleuchtungsscheibchens 18. In Fig. 2b ist die Verschiebung durch einen Verschiebungsvektorpfeil x angezeigt. Die nach der Verschiebung gegenüber der unausgelenkten Konfiguration der Fig. 2a nicht mehr bzw. zusätzlich beleuchteten Sektorbereiche sind in Fig. 2b schraffiert dargestellt.

In dem Beispiel der Fig. 2b stimmt die Richtung der Verschiebung x mit der Diagonalrichtung $\overline{DB}$ überein. Daher stimmt die Überdeckung in Detektorsegment A auch nach der Verschiebung flächenmäßig mit der Überdeckung in Detektorsegment C überein, und das zugehörige Differenzglied 20 zeigt nach wie vor den Wert Null an. Dagegen ist nach der Verschiebung das Detektorsegment D kaum noch überdeckt, während das Detektorsegment B im

Vergleich mit Fig. 2a zu einem größeren Anteil überdeckt ist. Das entsprechende Differenzglied 20' zeigt daher, wie in Fig. 2b dargestellt, einen entsprechenden Spannungswert an.

Bei einer Verschiebung senkrecht zur Richtung x wäre die Situation gerade umgekehrt. Die Detektorsegmente B und D wären auch nach der Verschiebung zu gleichem Anteil bedeckt, so dass das Differenzglied 20' keine Spannung anzeigen würde. Die Überdeckung der Detektorsegmente A und C wäre dagegen unterschiedlich, so dass das Differenzglied 20 ein entsprechendes Differenzsignal anzeigen würde. Bei einer Verschiebung der Ausleuchtungsscheibe 18 in beliebiger Richtung werden im Allgemeinen beide Differenzglieder 20, 20' ein von Null verschiedenes Differenzsignal anzeigen, und die Stärke ihres Ausschlages und ihr Signalverhältnis gibt ein Maß für Betrag und Richtung der Verschiebung der Ausleuchtungsscheibe 18 in der Detektorebene 16, aus der sich auf die Wechselwirkung am Strahlort der Probe 10 schließen lässt.

Wie vorstehend beschrieben, kann das Verhältnis von Nutzsignal zu Grundsignal durch ein zentrales Loch 22 im Detektorkörper in vorteilhafter Weise verbessert werden. In der in Fig. 2 gezeigten Konfiguration ist das Lochelement 22 so gewählt, dass der Lochdurchmesser nur geringfügig kleiner ist als der Durchmesser der Ausleuchtungsscheibe 18 im unausgelenkten Zustand. Nur ein schmaler Kreisring der Ausleuchtungsscheibe 18 überlappt daher mit der aktiven Detektoroberfläche, während der weitaus größere Anteil des einfallenden Sondenstrahls durch das Lochelement 22 hindurch tritt und die sensitive Detektoroberfläche der Detektorsegmente A, B, C und D nicht aktiviert.

Ein Problem der vorangehend beschriebenen Konfiguration liegt darin, dass sich bei kleiner Verschiebung des Sondenstrahls nur eine sehr kleine Modulation des Grundsignals ergibt, welche zusätzlich mit einem ausgeprägten Rauschen, z.B. Shot-Noise-Rauschen, behaftet sein kann. Eine präzise Messung der Verschiebung wird dadurch erschwert. Das präzise Messen kleiner Verschiebungen bei hoher Dynamik stellt für konventionelle Detektorkonfigurationen eine große Herausforderung dar.

Ein weiteres Problem der Messkonfiguration des Standes der Technik liegt darin, dass die zu messende Wechselwirkung neben einer Strahlablenkung häufig auch eine Strahlabschwächung hervorruft, z.B. durch Bragg-Beugung am Objekt bei der Elektronenmikroskopie oder

durch lokal unterschiedliche Absorptionskoeffizienten bei der Lichtmikroskopie. Auch solche Strahlabschwächungen beeinflussen den Nutzsignalpegel.

Aus der Patentschrift US 6,888,138 B2 ist eine periodische Strahlablenkung in einem Raster-
5 Elektronenmikroskop als Mittel für die Messung einer modulierten Stromkomponente, welche
in dem zu vermessenden Objekt absorbiert wird, bekannt. Die Modulation erlaubt die Detek-
tion der von der Probe absorbierten Elektronen mit hoher Genauigkeit und hoher Dynamik.
Die Modulation des Strahls erfolgt unter Verwendung eines Schlitzes, welcher periodisch den
Strahlengang blockiert. Eine ähnliche Anwendung mit einem periodisch unterbrochenen
10 Elektronenstrahl als Referenz für einen Lock-in-Verstärker ist beschrieben in O. C. Wells, R.
J. Savoy, „Magnetic Domains in Thin-Film Recording Heads as Observed in the SEM by a
Lock-In Technique“, IEEE Transactions on Magnetics 17, Nr. 3, Mai 1981, S. 1253 ff.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Messvorrichtung bzw. ein Messverfahren
15 bereitzustellen, welches eine genauere und störungsunempfindlichere Bestimmung der durch
Wechselwirkung mit einer Probe hervorgerufenen Ablenkung eines Sondenstrahls ermöglicht.

Überblick über die Erfindung

20 Diese Aufgabe wird durch eine Vorrichtung zur Bestimmung einer durch Wechselwirkung
mit einer Probe hervorgerufenen Ablenkung eines Sondenstrahls nach Anspruch 1 und nach
Anspruch 18 bzw. durch ein entsprechendes Verfahren zur Messung einer durch Wechselwir-
kung mit einer Probe hervorgerufenen Ablenkung eines Sondenstrahls nach Anspruch 23 und
25 nach Anspruch 26 gelöst. Die abhängigen Ansprüche beziehen sich auf vorteilhafte Weiter-
bildungen.

Eine Vorrichtung zur Bestimmung einer durch Wechselwirkung mit einer Probe hervorgeru-
fenen Ablenkung eines Sondenstrahls nach einem ersten Aspekt der Erfindung umfasst eine
30 Detektoreinheit mit zumindest einem Detektorsegment mit einer sensitiven Oberfläche, wobei
das Detektorsegment dazu eingerichtet ist, ein Detektorsegmentsignal zu erzeugen, welches
einen Grad einer Überdeckung und/oder eine Änderung des Grads der Überdeckung seiner
Oberfläche mit einem zu detektierenden Sondenstrahl anzeigt, insbesondere zu dem Grad der
Überdeckung proportional ist, und wobei die Detektoreinheit dazu eingerichtet ist, ein Detek-

torsignal auszugeben, welches zumindest teilweise auf dem Detektorsegmentsignal basiert. Die Vorrichtung umfasst ferner eine Oszillatoreinheit, welche dazu eingerichtet ist, den Sondenstrahl und das zumindest eine Detektorsegment relativ zueinander periodisch mit einer vorbestimmten Frequenz entlang wenigstens einer ersten Richtung aus einer Ruhelage auszu-
lenken, wobei die Detektoreinheit und/oder die Oszillatoreinheit derart eingerichtet sind, dass
5 sich bei der relativen Auslenkung des Sondenstrahls und des zumindest einen Detektorsegments der von dem Sondenstrahl überdeckte Oberflächenbetrag des Detektorsegmentes nicht-linear mit der Auslenkung ändert. Die erfindungsgemäße Vorrichtung umfasst ferner eine Auswerteeinheit, welche dazu eingerichtet ist, ein Frequenzspektrum des Detektorsignals zu
10 erfassen und daraus eine durch die Wechselwirkung mit der Probe hervorgerufene räumliche Ablenkung des Sondenstrahls zu bestimmen.

Der Erfindung liegt die überraschende Erkenntnis zugrunde, dass sich durch Frequenzanalyse des Detektorsignals eines periodisch abgelenkten Sondenstrahls eine präzisere Bestimmung
15 auch sehr kleiner Verschiebungen des Sondenstrahls in der Detektorebene erreichen lässt. Durch Konfiguration der Detektoreinheit und/oder der Oszillatoreinheit, z.B. durch geeignete Strukturierung der sensitiven Oberfläche der Detektoreinheit oder durch eine geeignete Anordnung von Detektorsegmenten in dem Strahlengang, lässt sich erreichen, dass die Änderung
20 der von dem Sondenstrahl überdeckten Oberfläche der Detektoreinheit und damit das entsprechende Detektorsignal, insbesondere die an der Detektoreinheit bzw. dem Detektorsegment gemessene Strahlintensität, nichtlinear mit der relativen Auslenkung von Sondenstrahl und Detektoreinheit, z.B. nichtlinear mit dem Verschiebeweg des Sondenstrahls in der Detektorebene, variiert. In diesem Fall weist das Frequenzspektrum des Detektorsignals bei periodischer
25 relativer Auslenkung von Sondenstrahl und Detektoreinheit, z.B. periodischer Verschiebung des Sondenstrahls in der Detektorebene, mit der vorbestimmten Frequenz nach der Theorie der Second Harmonics Generation (SHG) neben dieser Grundfrequenz auch höhere Harmonische der Grundfrequenz auf. Eine zusätzliche laterale Verschiebung der Sondenscheibe bezüglich des Detektors aufgrund der Wechselwirkung des Sondenstrahls mit der
30 Probe führt zu einer Änderung des Frequenzspektrums. Beispielsweise können aufgrund der zusätzlichen lateralen Verschiebung neue harmonische Frequenzanteile entstehen oder die Amplituden der bereits bestehenden Frequenzanteile des Spektrums sowie das Amplitudenverhältnis der verschiedenen harmonischen Frequenzanteile des Spektrums variieren. Die Auswertung des Frequenzspektrums erlaubt daher eine Bestimmung des Betrags und/oder der

Richtung einer durch die Wechselwirkung mit der Probe hervorgerufenen räumlichen Ablenkung des Sondenstrahls.

Insbesondere kann die Auswerteeinheit dazu eingerichtet sein, aus dem Frequenzspektrum des Detektorsignals einen Betrag und/oder eine Richtung einer durch die Wechselwirkung mit der Probe hervorgerufenen räumlichen Ablenkung des Sondenstrahls zu bestimmen.

In einer bevorzugten Ausführungsform ist die Auswerteeinheit dazu eingerichtet, eine spektrale Amplitude des Detektorsignals, insbesondere eine Amplitude eines harmonischen Anteils des Detektorsignals, zu erfassen und daraus die durch die Wechselwirkung mit der Probe hervorgerufene räumliche Ablenkung des Sondenstrahls zu bestimmen. Eine spektrale Amplitude im Sinne der vorgenannten Ausführungsform kann der Absolutwert des Signals im Frequenzraum bei vorgegebener Frequenz, z.B. bei der Grundfrequenz oder den harmonischen Frequenzen, sein.

Vorzugsweise ist die Auswerteeinheit dazu eingerichtet, die durch die Wechselwirkung mit der Probe hervorgerufene räumliche Ablenkung des Sondenstrahls aus einer Ausbildung zusätzlicher harmonischer Frequenzanteile in dem Frequenzspektrum und/oder aus einer Modifikation von spektralen Amplituden harmonischer Frequenzanteile zu bestimmen, insbesondere aus der Modifikation des Verhältnisses der spektralen Amplituden der harmonischen Frequenzanteile.

In einer bevorzugten Ausführungsform wird die räumliche Ablenkung des Sondenstrahls unter Berücksichtigung mehrerer harmonischer Fourier-Komponenten ermittelt. Mehrere Fourier-Komponenten können dazu insbesondere komplexwertig vektoraddiert werden.

Wie in der Beschreibung der bevorzugten Ausführungsformen in weiteren Einzelheiten dargestellt wird, ist damit eine sehr präzise Bestimmung der Verschiebung des Sondenstrahls möglich, selbst bei hohem Rauschsignal. Dadurch lassen sich auch sehr kleine Ablenkungen des Sondenstrahls genau und mit sehr hoher Dynamik messen.

Das Detektorsegmentalsignal kann ein Intensitätssignal, welches eine Strahlintensität des auf das Detektorsegment fallenden Sondenstrahls anzeigt, umfassen oder sein.

In einer bevorzugten Ausführungsform ist der Sondenstrahl ein Teilchenstrahl, insbesondere ein Elektronenstrahl, oder eine elektromagnetische Welle, insbesondere ein Lichtstrahl.

Die Erfindung lässt sich mit Vorteil überall dort einsetzen, wo ein Sondenstrahl zur Abtastung einer zu untersuchenden Probe verwendet und die durch Wechselwirkung mit der Probe hervorgerufene Ablenkung des Sondenstrahls präzise bestimmt werden soll. Insbesondere kann die Erfindung sowohl in der Lichtmikroskopie als auch in der Teilchenmikroskopie eingesetzt werden, z.B. in einem Transmissions-Elektronenmikroskop (TEM), in einem Raster-Transmissions-Elektronenmikroskop (Scanning Transmission Electron Microscope, STEM) oder in einem konfokalen Lichtmikroskop.

Die Erfindung setzt gemäß dem ersten Aspekt eine periodische relative Auslenkung von Sondenstrahl und sensitiver Oberfläche zumindest eines Detektorsegments der Detektoreinheit voraus. Dazu kann bei ortsfester Detektoreinheit der Strahl periodisch ausgelenkt werden. Alternativ kann auch die Detektoreinheit bei (in unabgelenktem Zustand) ruhendem Sondenstrahl periodisch ausgelenkt werden. In anderen Ausführungsformen können sowohl der Sondenstrahl als auch die Detektoreinheit periodisch ausgelenkt werden.

Eine (periodische) Auslenkung des Sondenstrahls aus der Ruhelage im Sinne der Erfindung ist eine Auslenkung, bei der sich der Sondenstrahl in der Detektorebene bezüglich der sensitiven Detektoroberfläche verschiebt, so dass sich die von dem Sondenstrahl überdeckte Oberfläche der Detektoreinheit oder eines Detektorsegmentes derselben nichtlinear als Funktion der Auslenkung ändert. In einer bevorzugten Ausführungsform ist es eine Auslenkung, bei welcher zumindest eine Teilüberdeckung der sensitiven Oberfläche der Detektoreinheit mit dem Sondenstrahl erhalten bleibt, der Sondenstrahl in der Detektoroberfläche die sensitive Oberfläche also nicht vollständig verlässt.

Vorzugsweise ist die Oszillatoreinheit dazu eingerichtet und positioniert, den Sondenstrahl nach dessen Wechselwirkung mit der Probe abzulenken. Auf eine Ablenkung des Sondenstrahls vor dessen Wechselwirkung mit der Probe kann dann verzichtet werden. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass der Sondenstrahl zuverlässig auf die Probe fokussiert werden kann, um die Probe lokal abzutasten, während die für die Frequenzanalyse notwendige periodische Modulation dem abgelenkten Sondenstrahl, d.h. dem Sondenstrahl nach Wechselwirkung mit der Probe, aufgeprägt wird.

Für die Auslenkung von Teilchenstrahlen eignen sich insbesondere magnetische Felder und/oder elektrische Felder. Die Oszillatoreinheit umfasst daher in einer bevorzugten Ausführungsform ein magnetisches Ablenkelement, d.h. ein Ablenkelement, welches zum Ablenken magnetische Felder erzeugt, und/oder ein elektrisches Ablenkelement, d.h. ein Ablenkelement, welches zum Ablenken elektrische Felder erzeugt.

Als Oszillatoreinheit können auch konventionelle Strahlablenkspulen eines Elektronenmikroskops dienen, die durch einen Eingriff in die Steuerelektronik des Mikroskops zur Erzeugung der periodischen Strahlablenkung eingerichtet bzw. angesteuert sind. Auf separate Ablenkspulen kann dann verzichtet werden, so dass die Kosten und der zusätzliche apparative Aufwand gering gehalten werden. Zahlreiche konventionelle Elektronenmikroskope lassen sich auf diese Weise mit kleinen Eingriffen in die Steuerelektronik aufrüsten.

In einer alternativen Ausführungsform ist die Oszillatoreinheit dazu eingerichtet, das zumindest eine Detektorsegment periodisch mit der vorbestimmten Frequenz entlang der ersten Richtung auszulenken.

In einer bevorzugten Ausführungsform ist die Oszillatoreinheit dazu eingerichtet, den Sondenstrahl und das zumindest eine Detektorsegment relativ zueinander periodisch mit einer vorbestimmten Frequenz entlang einer zweiten Richtung aus der Ruhelage abzulenken, wobei die zweite Richtung mit der ersten Richtung nicht übereinstimmt.

Dabei kann wiederum der Sondenstrahl relativ zu der ortsfesten Detektoreinheit bewegt werden oder umgekehrt. Auch Mischformen, bei denen sowohl die Detektoreinheit als auch der Sondenstrahl periodisch ausgelenkt werden, sind möglich.

Jede der Oszillationsrichtungen des Strahls kann dann eine Richtungskomponente der detektierten Strahlverschiebung definieren. Durch aufeinanderfolgende Messungen in zwei nicht übereinstimmenden Richtungen ergibt sich eine Zerlegung der durch die Wechselwirkung mit der Probe hervorgerufenen räumlichen Ablenkung entlang der gewählten ersten bzw. zweiten Richtung. Betrag und Richtung einer beliebigen Ablenkung des Sondenstrahls in der Detektorebene lassen sich auf diese Weise genau bestimmen, ebenso wie es vorangehend mit Bezug auf die Konfiguration der Fig. 2 des Standes der Technik beschrieben wurde.

Die Frequenzanalyse aufgrund der bei Oszillation entlang der ersten und zweiten Richtung aufgenommenen Detektorsignale erlaubt eine zuverlässige Bestimmung der Ablenkung selbst bei im Vergleich zu dem Nutzsignal hohem Grundsignal. Eine Segmentierung der Detektoreinheit, wie sie im Stand der Technik zum Erreichen akzeptabler Ortsauflösungen erforderlich ist und in Fig. 2 dargestellt ist, kann in diesem Fall entbehrlich sein. Dies hat den Vorteil, dass auf Differenzglieder in der Detektoreinheit verzichtet werden und insbesondere auch strukturell sehr einfache, nicht segmentierte Detektoreinheiten verwendet werden können und dennoch eine sehr hohe Messpräzision und große Ortsauflösung erreicht wird.

Die erreichte Messpräzision ist umso höher, je weniger redundant die Messungen entlang der ersten und zweiten Richtung sind, d.h. je weniger die zweite Richtung mit der ersten Richtung übereinstimmt. Vorzugsweise bildet die zweite Richtung mit der ersten Richtung einen Winkel zwischen 80° und 100° , wobei insbesondere die zweite Richtung orthogonal zu der ersten Richtung gewählt werden kann (relativer Winkel 90°).

Ein Detektorsegment bzw. eine Detektoreinheit im Sinne der Erfindung kann jeder Detektor mit einer für den Sondenstrahl sensitiven Oberfläche sein, welcher ein Detektorsignal bzw. Detektorsegmentsignal erzeugt, welches der Überdeckung der Oberfläche mit dem Sondenstrahl proportional ist.

In einer bevorzugten Ausführungsform weist die Detektoreinheit kein zentrales Lochelement auf. Alternativ können jedoch auch Detektoreinheiten mit einem zentralen Lochelement verwendet werden.

Die Detektoreinheit in einer erfindungsgemäßen Vorrichtung kann insbesondere eine Photodiode und/oder ein Szintillatorelement und/oder ein Lichtleiterelement umfassen.

Photodioden sind für die Detektion sowohl von Teilchenstrahlung, insbesondere Elektronenstrahlung, als auch von Licht geeignet. Für die Detektion von Elektronen kann die Photodiode zusätzlich mit einer schützenden Metallschicht, insbesondere Aluminiumschicht, beschichtet sein.

Die Verwendung von Lichtleiterelementen erlaubt es, detektierte Photonen aus dem Strahlengang des Mikroskops heraus an eine Auswerteeinheit zu leiten, wo die Bestimmung der Ablenkung erfolgt.

5 Die Detektoreinheit der erfindungsgemäßen Vorrichtung kann insbesondere nur ein einziges Detektorsegment mit einer sensitiven Oberfläche bzw. einem sensitiven Volumen umfassen. Das Detektorsegment signal stimmt in diesem Fall mit dem Detektorsignal überein und zeigt einen Grad einer Überdeckung der Oberfläche des Volumens des Detektorsegments mit dem zu detektierenden Sondenstrahl an. Einsegmentige Detektoreinheiten sind besonders einfach,
10 klein und kostengünstig. Dennoch erlauben sie in Verbindung mit der erfindungsgemäßen Oszillatoreinheit und Auswerteeinheit durch Analyse des Frequenzspektrums eine präzise Bestimmung der räumlichen Ablenkung des Sondenstrahls.

In einer bevorzugten Ausführungsform umfasst die Detektoreinheit eine kreisförmige sensitive
15 Oberfläche, deren Fläche einer Ausdehnung eines Strahlkegels des Sondenstrahls in der Ruhelage entspricht.

Eine kleine Verschiebung des Strahlkegels des Sondenstrahls führt in diesem Fall zu einer deutlichen Reduzierung des Überlapps, wobei die Reduzierung des Überlapps nichtlinear mit
20 dem Betrag der Verschiebung des Sondenstrahls in der Detektorebene skaliert. Aus der Änderung des Frequenzspektrums des Detektorsignals lässt sich dann auf Betrag und Richtung der Ablenkung des Sondenstrahls schließen.

In einer bevorzugten Ausführungsform ist die Detektoreinheit derart ausgebildet und angeordnet,
25 dass die sensitive Oberfläche nicht rotationssymmetrisch bezüglich einer Achse senkrecht zu der sensitiven Oberfläche ist und/oder das sensitive Volumen nicht rotationssymmetrisch bezüglich einer Achse senkrecht zu einer Detektoroberfläche, vorzugsweise einer der Probe (10) zugewandten Detektoroberfläche, ist. Eine nicht rotationssymmetrische sensitive Oberfläche ist besonders geeignet, bei Verschiebung des Sondenstrahls relativ zu der Detektoroberfläche eine nichtlineare Änderung der von dem Sondenstrahl überdeckten Oberfläche
30 herbeizuführen.

Eine nicht rotationssymmetrische Oberfläche bzw. ein nicht rotationssymmetrisches Volumen im Sinne der Erfindung ist eine Oberfläche/ein Volumen, die bei einer gedachten Drehung

bezüglich einer Achse senkrecht zu der sensitiven Oberfläche bzw. Detektoroberfläche nicht für jeden Drehwinkel in eine mit dem Urbild übereinstimmende Konfiguration überführt werden. Vorzugsweise existiert kein Drehwinkel, unter dem die sensitive Oberfläche/das sensitive Volumen in eine mit dem Urbild übereinstimmende Konfiguration überführt wird.

5

Eine nicht rotationssymmetrische sensitive Oberfläche lässt sich beispielsweise erreichen, indem Teilbereiche einer aktiven Oberfläche eines Detektors passiviert werden, beispielsweise durch ein Belacken oder einen Metallüberzug auf diesen Teilbereichen. Durch gezielte Formgebung der sensitiven Detektorfläche lässt sich ein nichtlineares Antwortverhalten der

10 Signalamplitude in Abhängigkeit von der Verschiebung des Sondenstrahls einstellen.

Die Detektoreinheit kann eine rechteckförmige sensitive Oberfläche umfassen.

15

Die Detektoreinheit kann auch mehrere voneinander beabstandete Detektorsegmente umfassen, welche jeweils sensitive Oberflächen und/oder sensitive Volumina umfassen, die derart angeordnet sind, dass der Strahlkegel des Sondenstrahls in der Ruhelage die sensitiven Oberflächen bzw. sensitiven Volumina der Detektorsegmente jeweils zumindest teilweise überdeckt.

20

Bei Verwendung mehrerer Detektorsegmente, welche zusammengenommen die Detektoreinheit bilden, lässt sich ein geeignetes nichtlineares Antwortverhalten des Signals auch ohne eine aufwändige Formgebung der einzelnen Detektorsegmente erreichen, so dass für die Detektoreinheit ohne Einbußen der Messpräzision weitgehend auf Standardkomponenten zurückgegriffen werden kann. Dadurch werden die Fertigungskosten reduziert, und die Detektoreinheit ist einfacher und weniger wartungsintensiv. Die Verwendung von Standardkomponenten in der vorgenannten Ausführungsform hat den weiteren Vorteil, dass die Detektoreinheit oder einzelne Detektorsegmente bei Verschleiß kostengünstig ausgetauscht werden können.

25

30

Eine Beabstandung der einzelnen Detektorsegmente ist vorteilhaft, weil sich durch geeignete Positionierung der Detektorsegmente zueinander und bezüglich des Sondenstrahls das Verhältnis von Nutzsignal zu Grundsignal steigern lässt, so dass auch sehr kleine Verschiebungen präzise und mit hoher Dynamik gemessen werden können. Der Zwischenraum zwischen den

beabstandeten Detektorsegmenten kann effektiv wie ein Lochelement in der sensitiven Detektoroberfläche gemäß der Konfiguration der Fig. 2 wirken.

In einer Weiterbildung der Erfindung umfasst die Detektoreinheit vier voneinander beabstandete Detektorsegmente mit sensitiven Oberflächen und/oder sensitiven Volumina, welche
5 derart positioniert sind, dass die Zentren der sensitiven Oberflächen die Ecken eines Quadrates bilden.

In einer bevorzugten Ausführung umfasst die Detektoreinheit einen sensitiven Volumenbereich, dessen Durchmesser in einer Richtung parallel und/oder senkrecht zu einer Detektoroberfläche, vorzugsweise in einer Richtung parallel und/oder senkrecht zu einer der Probe zugewandten Detektoroberfläche, variiert. In einer solchen Detektoreinheit liegt ein unabhängiger Aspekt der Erfindung.

Durch eine gemäß der vorgenannten Ausführungsform dreidimensional gestaltete Detektor-
15 konfiguration lässt sich erreichen, dass beim Ablenken des Strahls aus seiner Ruhelage das von dem Strahl überdeckte und zu dem Detektorsignal beitragende Teilvolumen des Detektors nichtlinear mit der Auslenkung variiert.

Vorzugsweise umfasst die Detektoreinheit einen sensitiven Volumenbereich, welcher eine in
20 einer Richtung parallel und/oder senkrecht zu einer Detektoroberfläche, vorzugsweise in einer Richtung parallel und/oder senkrecht zu einer der Probe zugewandten Detektoroberfläche, sich verjüngende Spitze umfasst.

Der sensitive Volumenbereich kann die Form eines Kegels oder Kegelstumpfes oder auch die
25 Form einer Pyramide bzw. eines Pyramidenstumpfes aufweisen.

In einer Weiterbildung der Erfindung umfasst die Detektoreinheit mehrere Glasfaserelemente, insbesondere mehrere parallel zueinander verlaufende und/oder parallel geschaltete Glasfa-
30 serelemente.

Beim Auslenken des Detektorstrahls aus der Ruhelage werden die Glasfaserelemente der Reihe nach von dem Detektorstrahl überdeckt. Dadurch ergibt sich ein stufenförmiger und damit nichtlinearer Verlauf des Detektorsignals.

Eine besonders präzise Bestimmung einer Strahlablenkung gelingt mit einer Vorrichtung, bei welcher die Detektoreinheit eine sensitive Oberfläche umfasst, deren Randbereich durch eine Exponentialfunktion beschrieben oder approximierbar ist. Der Randbereich kann eine Trenn-
5 linie zwischen der sensitiven Oberfläche und einer umgebenden nicht-sensitiven Oberfläche, beispielsweise einer passivierten Oberfläche, der Detektoreinheit sein.

Um die erfindungsgemäße Wirkung zu erzielen, ist es hinreichend, dass der Randbereich in einem Teilabschnitt durch eine Exponentialfunktion beschrieben oder approximierbar ist,
10 wenn der aus der Ruhelage ausgelenkte Sondenstrahl diesen Teilabschnitt überstreicht.

In einer Detektoreinheit mit einer für den Sondenstrahl sensitiven Oberfläche, deren Randbereich zumindest abschnittsweise durch eine Exponentialfunktion beschrieben oder approximierbar ist, liegt ein unabhängiger Aspekt der Erfindung.

Die Erfinder haben erkannt, dass eine alternative Möglichkeit zur Steigerung der Messauflösung unter Verwendung der Frequenzanalyse und der Theorie der Second Harmonics Generation darin besteht, anstelle des Sondenstrahls die zu vermessende Wirkung in der Probe selbst periodisch zu modulieren.

Gemäß diesem zweiten unabhängigen Aspekt bezieht sich die Erfindung auf eine Vorrichtung zum Bestimmen einer durch eine Wechselwirkung mit einer Probe hervorgerufenen Ablenkung eines Sondenstrahls mit einer Oszillatoreinheit, welche dazu eingerichtet ist, am Ort der Probe ein periodisch mit einer vorbestimmten Frequenz variierendes Anregungssignal zu erzeugen, welches dazu geeignet ist, eine die Wechselwirkung mit dem Sondenstrahl beeinflussende physikalische Eigenschaft der Probe nichtlinear zu variieren. Die Vorrichtung umfasst ferner eine Detektoreinheit, welche zum Erfassen des Sondenstrahls nach dessen Wechselwirkung mit der Probe und zum Ausgeben eines Detektorsignals eingerichtet ist, sowie eine Auswerteeinheit, welche dazu eingerichtet ist, ein Frequenzspektrum des Detektorsignals zu erfassen und daraus eine durch die Wechselwirkung mit der Probe hervorgerufene räumliche Ablenkung des Sondenstrahls zu bestimmen.

Ändert sich die die Wechselwirkung mit dem Sondenstrahl beeinflussende physikalische Eigenschaft der Probe nichtlinear, insbesondere als nichtlineare Funktion des Anregungssignals,

lässt sich in gleicher Weise wie bei einer periodischen Auslenkung des Sondenstrahls, welche zu einer nichtlinearen Detektorüberdeckung führt, aus dem Frequenzspektrum des Detektorsignals unter Verwendung der Theorie der Second Harmonics Generation auf die räumliche Ablenkung des Sondenstrahls schließen.

5

Ein Vorteil dieser Konfiguration besteht darin, dass für die Aufnahme des Messsignals herkömmliche Detektoreinheiten verwendet werden können und eine spezielle Gestaltung der Detektoroberfläche nicht erforderlich ist.

10 In einer bevorzugten Ausführung umfasst die Detektoreinheit zumindest ein Detektorsegment mit einer sensitiven Oberfläche und/oder einem sensitiven Volumen, wobei das Detektorsegment dazu eingerichtet ist, ein Detektorsegmentsignal zu erzeugen, welches einen Grad einer Überdeckung seiner Oberfläche bzw. seines sensitiven Volumens mit einem zu detektierenden Sondenstrahl anzeigt, und wobei die Detektoreinheit dazu eingerichtet ist, ein Detektor-
15 signal auszugeben, welches zumindest teilweise auf dem Detektorsegmentsignal basiert. Jedoch können alternativ auch Detektoreinheiten Verwendung finden, bei denen das ausgegebene Detektorsignal nicht auf einer Überdeckungsmessung beruht.

Vorzugsweise ist die Oszillatoreinheit dazu eingerichtet, am Ort der Probe ein mit der vorbestimmten Frequenz variierendes Magnetfeld zu erzeugen. Aufgrund der Hysterese- und Sättigungseigenschaften der Probe ändert sich die Magnetisierung der Probe, welche die Wechselwirkung mit einem Elektronensondenstrahl beeinflusst, als nichtlineare Funktion der Anregung.
20

25 In einer alternativen Ausführung ist die Oszillatoreinheit dazu eingerichtet, in die Probe einen Strom spinpolarisierter Elektronen zu injizieren und am Ort der Probe ein mit der vorbestimmten Frequenz variierendes elektrisches Feld zu erzeugen. Bei nichtlinearer Änderung der magnetischen Eigenschaften der Probe lässt sich durch Anlegen eines periodisch variierenden elektrischen Feldes wiederum ein Effekt der Second Harmonic Generation erzielen.

30

Die erfindungsgemäße Vorrichtung gemäß dem zweiten Aspekt der Erfindung kann im Übrigen alle diejenigen Merkmale aufweisen, welche vorangehend mit Bezug auf die Vorrichtung und die Detektoreinheit gemäß dem ersten Aspekt der Erfindung beschrieben wurden.

Insbesondere kann die Auswerteeinheit dazu eingerichtet sein, eine spektrale Amplitude des Detektorsignals, insbesondere eine spektrale Amplitude eines harmonischen Anteils des Detektorsignals, zu erfassen und daraus die durch die Wechselwirkung mit der Probe hervorgerufene räumliche Ablenkung des Sondenstrahls zu bestimmen.

5

In einer bevorzugten Ausführungsform ist die Auswerteeinheit dazu eingerichtet, die durch die Wechselwirkung mit der Probe hervorgerufene räumliche Ablenkung des Sondenstrahls aus einer Ausbildung zusätzlicher harmonischer Frequenzanteile in dem Frequenzspektrum und/oder aus einer Modifikation von spektralen Amplituden harmonischer Frequenzanteile zu bestimmen.

10

Der Sondenstrahl kann ein Teilchenstrahl, insbesondere ein Elektronenstrahl, oder eine elektromagnetische Welle, insbesondere ein Lichtstrahl, sein.

15 Eine Vorrichtung gemäß dem ersten oder zweiten Aspekt der Erfindung kann zusätzlich eine Quelle umfassen, welche den Sondenstrahl bereitstellt. Die Quelle kann insbesondere eine Lichtquelle oder eine Elektronenquelle sein.

Eine Vorrichtung gemäß dem ersten oder zweiten Aspekt der Erfindung kann auch einen Strahlengang zwischen der Quelle und der Detektoreinheit umfassen, welcher dazu eingerichtet ist, die Probe zur Wechselwirkung mit dem Sondenstrahl aufzunehmen.

20

Die Erfindung bezieht sich gemäß einem ersten Aspekt auch auf ein Verfahren zur Messung einer durch eine Wechselwirkung mit einer Probe hervorgerufenen Ablenkung eines Sondenstrahls mit den Schritten des Erfassens der Überdeckung einer sensitiven Oberfläche zumindest eines Detektorsegments einer Detektoreinheit mit einem durch Wechselwirkung mit der Probe abgelenkten Sondenstrahl und des Erzeugens eines einen Grad der Überdeckung des Detektorsegments und/oder eines eine Änderung des Grads der Überdeckung anzeigenden Detektorsegmentsignals, insbesondere eines zur Überdeckung proportionalen Detektorsegmentsignals, sowie des Ausgebens eines Detektorsignals, welches zumindest teilweise auf dem Detektorsegmentsignal basiert, durch die Detektoreinheit. Das erfindungsgemäße Verfahren umfasst ferner das periodische Auslenken des Sondenstrahls und des zumindest einen Detektorsegments relativ zueinander aus einer Ruhelage entlang wenigstens einer ersten Richtung derart, dass sich bei dem relativen Auslenken aus der Ruhelage der von dem Sonden-

25
30

strahl überdeckte Oberflächenbetrag und/oder das von dem Sondenstrahl überdeckte sensitive Volumen des zumindest einen Detektorsegments nichtlinear mit der Auslenkung ändert. Das erfindungsgemäße Verfahren umfasst auch das Erfassen eines Frequenzspektrums des Detektorsignals sowie das Bestimmen einer durch die Wechselwirkung mit der Probe hervorgerufenen räumlichen Ablenkung des Sondenstrahls aus dem erfassten Frequenzspektrum.

Insbesondere kann das erfindungsgemäße Verfahren das Bestimmen eines Betrages und/oder einer Richtung der räumlichen Ablenkung des Sondenstrahls umfassen.

Durch das erfindungsgemäße Verfahren ergeben sich die vorangehend mit Bezug auf die erfindungsgemäße Vorrichtung beschriebenen Vorteile. Insbesondere erlaubt das erfindungsgemäße Verfahren auf der Grundlage der Theorie der Second Harmonics Generation (SHG) eine Auswertung des Frequenzspektrums, welche genaue Rückschlüsse auf Betrag und Richtung der durch Wechselwirkung des Sondenstrahls mit der Probe hervorgerufenen Strahlablenkung gestattet.

In einer bevorzugten Ausführungsform umfasst das Verfahren den Schritt des Erfassens einer spektralen Amplitude des Detektorsignals, insbesondere einer spektralen Amplitude eines harmonischen Anteils des Detektorsignals, sowie den Schritt des Bestimmens einer räumlichen Ablenkung des Sondenstrahls aus der erfassten spektralen Amplitude.

Vorzugsweise wird die durch die Wechselwirkung mit der Probe hervorgerufene räumliche Ablenkung des Sondenstrahls aus einer Ausbildung zusätzlicher harmonischer Frequenzanteile in dem Frequenzspektrum und/oder aus einer Modifikation von Amplituden harmonischer Frequenzanteile bestimmt.

Vorzugsweise umfasst das Verfahren das periodische Auslenken des Sondenstrahls nach der Wechselwirkung des Sondenstrahls mit der Probe.

In einer Weiterbildung der Erfindung erfolgt das Auslenken des Sondenstrahls unter Verwendung magnetischer und/oder elektrischer Felder.

Alternativ kann die Detektoreinheit periodisch mit einer vorbestimmten Frequenz entlang der ersten Richtung aus der Ruhelage ausgelenkt werden.

Ein Verfahren gemäß der Erfindung umfasst vorzugsweise zusätzlich den Schritt des periodischen Auslenkens des Sondenstrahls und des zumindest einen Detektorsegments relativ zueinander entlang wenigstens einer zweiten Richtung derart, dass sich bei dem Auslenken die von dem Sondenstrahl überdeckte Oberfläche bzw. das überdeckte Volumen des Detektorsegments nichtlinear mit der Auslenkung ändert, wobei die zweite Richtung nicht mit der ersten Richtung übereinstimmt und wobei der Schritt des Auslenkens in die zweite Richtung nach dem Schritt des Auslenkens in die erste Richtung erfolgt.

Die zweite Richtung kann mit der ersten Richtung einen Winkel zwischen 80° und 100° aufspannen. Insbesondere kann die zweite Richtung orthogonal zu der ersten Richtung sein.

In einer Ausführungsform umfasst das Verfahren zusätzlich den Schritt des Bereitstellens eines Sondenstrahls zur Wechselwirkung mit der Probe.

Vorzugsweise kann das erfindungsgemäße Verfahren das Erfassen der Überdeckung einer sensitiven Oberfläche einer Detektoreinheit umfassen, wobei die Detektoreinheit eine kreisförmige sensitive Oberfläche umfasst, deren Fläche einer Ausdehnung eines Strahlkegels des Sondenstrahls in der Ruhelage entspricht.

Die Detektoreinheit kann auch derart ausgebildet und angeordnet sein, dass die sensitive Oberfläche nicht rotationssymmetrisch bezüglich einer Achse senkrecht zu der sensitiven Oberfläche ist.

Vorzugsweise umfasst die Detektoreinheit eine rechteckförmige sensitive Oberfläche.

In einer Ausführungsform umfasst die Detektoreinheit mehrere voneinander beabstandete Detektorsegmente, welche jeweils sensitive Oberflächen und/oder sensitive Volumina umfassen, die derart angeordnet sind, dass der Strahlkegel des Sondenstrahls in der Ruhelage die sensitiven Oberflächen bzw. sensitiven Volumina der Detektorsegmente jeweils zumindest teilweise überdeckt.

In einer Weiterbildung umfasst die Detektoreinheit vier voneinander beabstandete Detektorsegmente mit sensitiven Oberflächen und/oder sensitiven Volumina, welche derart positioniert sind, dass die Zentren der sensitiven Oberfläche die Ecken eines Quadrats bilden.

- 5 Die Detektoreinheit kann eine Photodiode und/oder ein Szintillatorelement und/oder ein Lichtleiterelement umfassen.

Gemäß einem weiteren unabhängigen Aspekt bezieht sich die Erfindung auch auf ein Verfahren zum Messen einer durch Wechselwirkung mit einer Probe hervorgerufene Ablenkung
10 eines Sondenstrahls mit den Schritten des Erzeugens eines periodisch mit einer vorbestimmten Frequenz variierenden Anregungssignals am Ort der Probe, wobei das Anregungssignal dazu eingerichtet, eine die Wechselwirkung der Probe mit dem Sondenstrahl beeinflussende physikalische Eigenschaft der Probe nichtlinear zu variieren, und des Erfassens des Sondenstrahls nach dessen Wechselwirkung mit der Probe mittels einer Detektoreinheit. Das Verfahren
15 umfasst ferner das Ausgeben eines Detektorsignals und sowie das Erfassen eines Frequenzspektrums des Detektorsignals sowie das Bestimmen einer durch die Wechselwirkung mit der Probe hervorgerufenen räumlichen Ablenkung des Sondenstrahls aus dem erfassten Frequenzspektrums.

- 20 Dadurch ergeben sich die vorangehend mit Bezug auf die Vorrichtung gemäß dem zweiten Aspekt der Erfindung beschriebenen Vorteile.

In einer bevorzugten Ausführung umfasst das Verfahren ferner das Erfassen einer Überdeckung einer sensitiven Oberfläche und/oder eines sensitiven Volumens zumindest eines Detektorsegments einer Detektoreinheit mit einem durch Wechselwirkung mit der Probe abgelenkten Sondenstrahl und das Erzeugen eines ein Grad der Überdeckung des zumindest einen Detektorsegments anzeigenden Detektorsegmentsignal, wobei das Detektorsignal zumindest teilweise auf dem Detektorsegmentsignal basiert.

- 30 Vorzugsweise umfasst das Verfahren das Erfassen einer spektralen Amplitude des Detektorsignals, insbesondere einer spektralen Amplitude eines harmonischen Anteils des Detektorsignals, und das Bestimmen einer räumlichen Ablenkung des Sondenstrahls aus der erfassten spektralen Amplitude.

In einer Weiterbildung wird die durch die Wechselwirkung mit der Probe hervorgerufene räumliche Ablenkung des Sondenstrahls aus einer Ausbildung zusätzlicher harmonischer Frequenzanteile in dem Frequenzspektrum und/oder aus einer Modifikation von spektralen Amplituden harmonischer Frequenzanteile des Frequenzspektrums bestimmt.

5

Das Verfahren gemäß dem zweiten Aspekt der Erfindung kann im Übrigen alle Merkmale und Schritte aufweisen, wie sie vorangehend mit Bezug auf das Verfahren gemäß dem ersten Aspekt der Erfindung beschrieben wurden.

10 Kurzbeschreibung der Figuren

Die Merkmale und zahlreichen Vorteile der Erfindung lassen sich am besten anhand einer detaillierten Beschreibung der Figuren verstehen, in denen:

- 15 Fig. 1 das Funktionsprinzip der Bestimmung der Wechselwirkung zwischen Probe und Sondenstrahl durch Messung der Strahlablenkung schematisch veranschaulicht;
- Fig. 2a die Lage des Sondenstrahls auf einem Viersegmentdetektor des Standes der Technik in unabgelenktem Zustand zeigt;
- 20 Fig. 2b die Lage des Sondenstrahls auf dem Viersegmentdetektor der Fig. 2a in abgelenktem Zustand zeigt;
- Fig. 3 eine Vorrichtung zur Messung der Strahlablenkung mittels Frequenzanalyse gemäß einer Ausführungsform der Erfindung in schematischer Darstellung zeigt;
- 25 Fig. 4a,4b,4c Konfigurationen einer Detektoreinheit gemäß alternativen Ausführungsformen der Erfindung in Aufsicht zeigen;
- Fig. 5 eine schematische Darstellung zeigt, welche die Bildung höherer Frequenzanteile unter dem Einfluss einer nichtlinearen Verschiebung illustriert;
- Fig. 6a, 6b, 6c alternative Ausführungsformen von aus mehreren Einzelementen zusammen-
- 30 gesetzten Detektoreinheiten gemäß der vorliegenden Erfindung zeigen;
- Fig. 7a, 7b eine Detektoreinheit gemäß einer weiteren Ausführungsform der vorliegenden Erfindung in Aufsicht zeigt;
- Fig. 8a in einer Simulation das zur periodischen Auslenkung verwendete Referenzsignal zeigt;

- Fig. 8b das resultierende stark verrauschte Messsignal in einer Simulation der Vorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung zeigt;
- Fig. 8c das aufmodulierte Rauschsignal in der Simulation der Fig. 8a und 8b zeigt;
- Fig. 9 den Zusammenhang zwischen Strahlverschiebung und Messsignal der Fourier-Auswertung in der simulierten Messung der Fig. 8a, 8b und 8c zeigt;
- Fig. 10a schematisch eine Konfiguration mit kreisförmigem Detektorelement und auf den Detektor zentriertem Sondenstrahl zeigt;
- Fig. 10b die Änderung des Amplitudensignals als Funktion der Auslenkung für die Grundfrequenz und die erste bis dritte Harmonische anhand einer Simulationsrechnung für die Konfiguration der Fig. 10a zeigt;
- Fig. 11a schematisch eine Detektorkonfiguration mit kreisförmigem Detektor und asymmetrisch zum Strahl verschobenem Detektor zeigt;
- Fig. 11b ein dem Diagramm der Fig. 10b entsprechendes Diagramm, aber für die Detektorkonfiguration der Fig. 11a zeigt;
- Fig. 12a schematisch eine Detektorkonfiguration mit rechteckigem Detektor, welcher zu einem kreisförmigen Strahlbild verschoben ist, zeigt;
- Fig. 12b ein dem Diagramm der Fig. 10b und 11b entsprechendes Diagramm, aber für die Konfiguration der Fig. 12a zeigt;
- Fig. 13a schematisch eine Detektorkonfiguration mit parallel angeordneten und geschalteten Glasfasern und kreisförmigem Strahl zeigt;
- Fig. 13b ein dem Diagramm der Fig. 10b, 11b und 12b entsprechendes Diagramm, aber für die Konfiguration der Fig. 13a zeigt;
- Fig. 14 schematisch eine Detektorkonfiguration mit einer aktiven Detektoroberfläche, deren Randbereich abschnittsweise durch eine Exponentialfunktion beschrieben ist, zeigt;
- Fig. 15a schematisch ein Detektorelement, dessen aktives Volumen die Form eines Pyramidenstumpfes aufweist, in einer perspektivischen Ansicht zeigt; und
- Fig. 15b die Detektorkonfiguration der Fig. 15a in einer schematischen Schnittansicht zeigt.

Beschreibung bevorzugter Ausführungsformen

Fig. 3 zeigt eine Vorrichtung zur Bestimmung der Strahlablenkung gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Erfindung am Beispiel eines Raster-

Transmissionselektronenmikroskops („Scanning Transmission Electron Microscope“, STEM). Die Erfindung ist jedoch nicht auf dieses Ausführungsbeispiel beschränkt, sondern kann in entsprechender Weise auch in Elektronenmikroskopen anderen Typs oder auch in optischen Mikroskopen eingesetzt werden.

5

Der in Fig. 3 schematisch gezeigte Aufbau folgt im wesentlichen dem mit Bezug auf Fig. 1 beschriebenen Messprinzip des Standes der Technik. Eine einfallende Strahlsonde 12, im Ausführungsbeispiel der Elektronenstrahl eines Raster-Transmissionselektronenmikroskops, wird auf die Oberfläche einer dünnen Probe 10 fokussiert und tastet sie lokal ab. Durch Wechselwirkung mit der Probe 10 wird der Sondenstrahl gegenüber dem Strahlverlauf, welcher sich ohne Probe 10 im Strahlengang ergäbe, abgelenkt. Diese Ablenkung soll unter Verwendung einer Detektoreinheit 24 im Strahlengang gemessen werden. In der Darstellung der Fig. 3 ist der Betrag der Ablenkung in der Detektorebene 26 wie in der Abbildung der Fig. 1 mit Δx bezeichnet. Aus der Ablenkung Δx lässt sich auf die Wechselwirkung der Strahlsonde mit der Probe und damit auf die Eigenschaften der Probe rückschließen. Das Messproblem besteht also darin, möglichst genau die Verschiebung Δx des Sondenstrahls nach Durchlaufen der Probe zu bestimmen.

Von der Messvorrichtung des Standes der Technik unterscheidet sich die bevorzugte Ausführungsform der Fig. 3 durch eine Oszillatoreinheit 28 im Strahlengang zwischen Probe 10 und Detektor 24. Bei der Oszillatoreinheit kann es sich um kleine Magnetfeldspulen auf einem Blendenhalter handeln, welche im Strahlengang des Mikroskops installiert sind. Durch Anlegen eines periodischen Spannungssignals einer Wechselspannungsquelle 30 an die Magnetfeldspulen der Oszillatoreinheit 28 wird im Strahlengang ein oszillatorisches magnetisches Feld erzeugt, welches auf die Elektronen der Strahlsonde eine Lorenzkraft auswirkt und den abgelenkten Sondenstrahl 14 relativ zu der Detektoreinheit 24 in Oszillation versetzt.

Alternativ kann die Oszillation des Elektronenstrahls auch unter Verwendung der bestehenden Strahlablenkspulen des Elektronenmikroskops bewirkt werden, ohne dass hierfür zusätzliche Einbauten vorgenommen werden müssen. Bestehende Elektronenstrahlmikroskope lassen sich auf diese Weise mit minimalem apparativen Aufwand aufrüsten.

Da für eine Messung vorzugsweise mehrere vollständige Oszillationsperioden gemessen werden, sollte die Oszillationsfrequenz möglichst hoch gewählt werden. Höhere Frequenzen er-

lauben kürzere Messdauern pro Probenpunkt, also eine insgesamt erhöhte Messgeschwindigkeit. Die bevorzugte Frequenz wird in der Praxis sowohl durch die räumlichen Gegebenheiten des verwendeten Aufbaus, insbesondere den für die Ablenkeinheiten zur Verfügung stehenden Bauraum, durch die Strahleigenschaften, insbesondere unter Berücksichtigung der erhöhten Strahlsteifigkeit bei höheren Strahlenergien aufgrund der relativistischen Massenzunahme,
5 und die technische Verfügbarkeit von geeigneten Oszillatoren und Messgeräten zur Datenaufnahme begrenzt. Unter Berücksichtigung dieser Faktoren erscheinen Frequenzen zwischen 10 kHz und einigen zehn MHz gut realisierbar. Bevorzugt liegt die Oszillationsfrequenz bei einigen 100 kHz.

10 Die Ablenkung des Elektronenstrahls kann anstelle oder zusätzlich zu den magnetischen Feldern auch unter Verwendung elektrischer Felder erfolgen. Durchlaufen die Elektronen auf ihrem Weg von der Probe 10 zu der Detektoreinheit 24 ein senkrecht zur Propagationsrichtung oszillierendes Feld, wird der abgelenkte Sondenstrahl 14 relativ zu der Detektorebene 26
15 in oszillatorische Bewegung versetzt.

In einem optischen Mikroskop kann ein Lichtstrahl nach Durchlaufen einer Probe beispielsweise mittels eines oszillierenden Spiegels in eine oszillatorische Bewegung versetzt werden.

20 Die Detektoreinheit 24 kann beispielsweise eine Photodiode mit einer sensitiven Oberfläche sein. Bei Verwendung in einem Elektronenmikroskop kann die Photodiode zusätzlich mit einer Aluminium-Schutzschicht versehen sein, um einem Verschleiß der sensitiven Oberfläche durch die einfallenden Elektronen hoher Energie vorzubeugen. In einem Lichtmikroskop ist eine solche Aluminium-Schutzschicht im Allgemeinen nicht erforderlich. Die Detektoreinheit 24 gibt ein Detektorsignal 32 aus, welches einen Grad einer Überdeckung der sensitiven
25 Detektoroberfläche mit dem Sondenstrahl 24 anzeigt, wie vorangehend mit Bezug auf Fig. 1 und Fig. 2 für den Stand der Technik in weiteren Einzelheiten beschrieben.

Im Unterschied zum Stand der Technik erfährt das Detektorsignal aufgrund der von der Oszil-
30 latoreinheit 28 hervorgerufenen oszillatorischen Bewegung des abgelenkten Sondenstrahls 24 in der Detektorebene 26 eine zusätzliche periodische Modulation. Sie wird in einer Auswerteeinheit 34 gemessen, wobei ein von der Wechselspannungsquelle 30 bereitgestelltes Signal 36 als Referenz dient. Die Auswerteeinheit 34 ist dazu eingerichtet, ein Frequenzspektrum des Detektorsignals 32 zu erfassen.

Ein erstes Beispiel einer Detektorkonfiguration für eine Detektoreinheit 24 gemäß der vorliegenden Erfindung ist in Fig. 4a in Aufsicht gezeigt. Die aktive Detektoroberfläche 16 bildet ein Quadrat. Die durch den Sondenstrahl ausgeleuchtete Fläche 18 der Detektorebene ist kreisförmig und entsteht durch Schnitt des Strahlkegels der Strahlsonde mit der Detektorebene. In der in Fig. 4a gezeigten Konfiguration sind die Abbildungseigenschaften des Mikroskops und die Detektoreinheit derart gewählt, dass die ausgeleuchtete Kreisscheibe 18 in der Ruhelage (linkes Teilbild) der quadratischen sensitiven Oberfläche 16 der Detektoreinheit 24 als Innkreis eingeschrieben ist.

Bei Ablenkung der Strahlsonde durch Wechselwirkung des einfallenden Sondenstrahls 12 mit der Probe 10 und/oder durch Einwirkung der Oszillatoreinheit 28 wird die ausgeleuchtete Fläche 18 in der Detektorebene 26 relativ zu der Detektoroberfläche 16 verschoben. Das rechte Teilbild der Fig. 4a zeigt eine Verschiebung entlang einer Richtung x. In Abhängigkeit von den Eigenschaften der Probe 10 bzw. der Oszillatoreinheit 28 kann die Verschiebung auch entlang einer zur Richtung x orthogonalen Richtung y oder allgemein entlang jeder Richtung in der durch die orthogonalen Richtungen x und y aufgespannten Ebene der Detektoroberfläche 16 erfolgen.

Durch die Verschiebung der ausgeleuchteten Fläche 18 relativ zu der Detektoroberfläche 16 ändert sich der Grad der Überdeckung der Detektoroberfläche 16 mit dem zu detektierenden Sondenstrahl, und das zum Überdeckungsgrad proportionale oder antiproportionale Detektorsignal 32 ändert sich entsprechend.

Die Detektoreinheit der Fig. 4a ist derart eingerichtet, dass sich bei Ablenkung des Sondenstrahls aus der im linken Teilbild gezeigten Ruhelage der von dem Sondenstrahl überdeckte Oberflächenbetrag der Detektoreinheit (und damit das die Überdeckung anzeigende bzw. zur Überdeckung proportionale Detektorsignal) nichtlinear als Funktion der Verschiebung des Sondenstrahls in der Detektorebene ändert. Die bei einer Verschiebung entlang der Richtung x gegenüber dem linken Teilbild der Fig. 4a nicht mehr überdeckte sensitive Detektoroberfläche ist in dem rechten Teilbild schraffiert gezeichnet. Der Betrag dieser Fläche ist eine nicht-lineare Funktion des Betrags der Verschiebung.

Bei periodischer relativer Auslenkung von sensitiver Detektoroberfläche 16 und Sondenstrahl 14 variiert das Detektorsignal 32 in der Folge ebenfalls periodisch. Bei nichtlinearer Änderung der Messintensität mit dem Verschiebeweg weist das Fourier-Spektrum des oszillierenden Signals 32 neben der Grundfrequenz, welche dem periodischen Ablenksignal der Oszillatoreinheit 28 entspricht, auch höhere Harmonische der Grundfrequenz auf. Eine durch Wechselwirkung des Sondenstrahls 12 mit der Probe 10 hervorgerufene zusätzliche laterale Verschiebung ΔX des Sondenstrahls relativ zur Detektoroberfläche führt zu einer Modifikation des Frequenzspektrums. Beispielsweise können zusätzliche harmonische Oberschwingungen hinzutreten oder sich die relativen Verhältnisse der spektralen Amplituden der Harmonische ändern. Durch Analyse des Frequenzspektrums des Detektorsignals 32 lassen sich auf diese Weise Rückschlüsse auf die Strahlablenkung Δx und damit auf die Wechselwirkung der einfallenden Strahlsonde 12 mit der Probe 10 treffen.

Das Auftreten zusätzlicher Frequenzen im Frequenzspektrum in Abhängigkeit von Betrag und Richtung der nichtlinearen Verschiebung lässt sich mit der Theorie der Second Harmonics Generation (SHG) verstehen. Dies ist in Fig. 5 an einem einfachen Beispiel veranschaulicht. Eine einem harmonischen Sinussignal 38 überlagerte nichtlineare Kennkurve 40 führt im Allgemeinen zu einem resultierenden Signal 42, welches von der Sinusform abweicht. Das resultierende Signal 42 wird im Frequenzspektrum daher nicht mehr ausschließlich durch die (Grund-)Frequenz des Sinussignals 38 beschrieben. Vielmehr entstehen neue harmonische Frequenzanteile bzw. eine Modifikation der Amplituden der bereits bestehenden harmonischen Frequenzanteile, aus denen sich auf die nichtlineare Kennkurve 40 rückschließen lässt.

Durch geeignete Verfahren wird die messbare Intensität, bestehend aus dem Grundsignal und dem Nutzsignal, periodisch mit einer festen Frequenz f_0 moduliert, z.B. durch eine seitlich gerichtete Ablenkung des Sondenstrahls nach Durchlaufen der Probe, wie sie mit Bezug auf Fig. 3 beschrieben wurde. Zur Ablenkung können mechanische Vorrichtungen, elektrische und magnetische Felder sowie deren Kombinationen dienen. Die Oszillatoreinheiten können in das Mikroskop integriert sein, durch eine geeignete Öffnung in das Mikroskop eingebracht werden oder extern angebracht werden. Dadurch wird der Strahl mit der Referenzfrequenz f_0 relativ zu der ortsfesten Detektoroberfläche 16 periodisch verschoben.

Alternativ kann auch bei ortsfestem Strahl der Detektor in laterale Oszillationen versetzt werden. Dadurch ergibt sich ebenfalls eine oszillatorische Relativbewegung von Sondenstrahl

und Oszillatoreinheit, welche bei nichtlinearer Änderung des Grades der Überdeckung der Oberfläche mit dem zu detektierenden Sondenstrahl gleichfalls zur Ausbildung höherer Harmonischer der Grundfrequenz führt.

- 5 Wenn durch die Probe keine Strahlablenkung stattfindet, ist die Oszillation vorzugsweise symmetrisch zu der sensitiven Oberfläche 16 der Detektoreinheit 24 einzustellen. Die Fourier-Transformation des Detektorsignals 32 zeigt dann die Grundfrequenz, welche der durch die Oszillatoreinheit bewirkten relativen Oszillation von Sondenstrahl 12, 14 und Detektoreinheit 24 zueinander entspricht, sowie höhere Harmonische. Der Kanal bei $f = 0$, welcher das Zeit-
- 10 mittel der Verschiebung anzeigt, erhält in unabgelenktem Zustand den Wert Null.

- Eine durch eine Wechselwirkung mit der Probe 10 hervorgerufene zusätzliche Strahlverschiebung äußert sich in dem Frequenzspektrum durch eine Komponente ungleich Null im Kanal $f = 0$. Sie erlaubt auch bei stark verrauschtem Signal eine Bestimmung der relativen Verschiebung Δx von Oszillatoreinheit und Sondenstrahl. Beispielsweise kann die Vorrichtung
- 15 derart kalibriert werden, dass die Veränderung des Frequenzspektrums in Abhängigkeit von Betrag und Richtung der Verschiebung Δx gemessen und aufgezeichnet wird. Aus den Kalibrierungsdaten lässt sich dann bei Analyse einer Probe 10 aus dem Frequenzspektrum mit hoher Präzision auf die Verschiebung Δx rückschließen.

- 20 Der Erfindung liegt folglich die Erkenntnis zugrunde, dass sich unter Verwendung einer Oszillatoreinheit, welche den Sondenstrahl periodisch aus einer Ruhelage ablenkt, und einer Auswerteeinheit, welche ein Frequenzspektrum eines nichtlinearen Detektorsignals erfasst, Verschiebungen der Ruhelage des Sondenstrahls relativ zur Detektoroberfläche mit großer
- 25 Genauigkeit und hoher Dynamik messen lassen. Da die Messung auf einer Frequenzanalyse beruht, lässt sich ein störendes Rauschen weitgehend eliminieren, so dass noch kleinste Strahlverschiebungen zuverlässig gemessen werden können.

- In der in Fig. 4a gezeigten Konfiguration kann die Oszillationsamplitude, welche den Sondenstrahl über die Detektorfläche hinaus verschiebt, direkt gemessen werden. Weist der Sondenstrahl in der Detektionsebene den gleichen Durchmesser auf wie der Detektor, werden auch
- 30 kleinste Strahlverschiebungen in Intensitätsschwankungen umgesetzt.

In Fig. 4a ist die sensitive Detektoroberfläche 16 aus vier identischen, einander benachbarten quadratischen Detektorsegmenten zusammengesetzt. In gleicher Weise lässt sich die vorangehend beschriebene Messung auch bei einem kreisringförmigen Detektor mit Innenloch ausführen, wie er einleitend mit Bezug auf den Stand der Technik beschrieben wurde. In diesem Fall ist vorteilhaft, wenn der Durchmesser der Sondenscheibe exakt an den Durchmesser des Innenlochs angepasst ist, so dass der Sondenstrahl die aktive Detektoroberfläche im Ruhezustand nur geringfügig überlappt. Kleine Verschiebungen des Sondenstrahls 14 relativ zu Detektoroberfläche 16 erzeugen dann ein im allgemeinen nichtlineares Signal. Oszilliert der Strahl zusätzlich relativ zur Oszillatoreinheit, entstehend wiederum Änderungen der Amplituden der höheren Harmonischen, welche in der Auswerteeinheit 34 ausgewertet und aus welchen auf Betrag und Richtung der Verschiebung zurückgeschlossen werden kann.

In welchem Maße bei der Ablenkung des Sondenstrahls in der Probe höhere harmonische Frequenzanteile auftreten bzw. das relative Amplitudenverhältnis der bestehenden harmonischen Frequenzanteile modifiziert wird, hängt von der Ausprägung der Nichtlinearität ab. Das nichtlineare Antwortverhalten der Signalamplitude lässt sich insbesondere durch gezielte Formgebung der sensitiven Oberfläche 16 der Detektoreinheit 24 einstellen. Beispielsweise können, ausgehend von der Detektorkonfiguration der Fig. 4a, Teilflächen der Detektoroberfläche passiviert werden, z.B. durch einfaches Belacken. Die zur passivierten Detektoroberfläche komplementäre Detektoroberfläche ist dann die sensitive Oberfläche 16, deren Überdeckungsgrad mit dem detektierten Sondenstrahl 12, 14 das Detektorsignal 32 bestimmt. Durch geeignete Formgebung lässt sich eine bei Verschiebung des Sondenstrahls relativ zu der Detektoroberfläche stark nichtlineare Kennlinie erreichen.

Beispiele sind in der Fig. 4b und der Fig. 4c gezeigt, wobei die sensitive Detektoroberfläche 16 jeweils dunkel schraffiert ist und die passive Detektoroberfläche 44 heller schraffiert ist. Fig. 4b zeigt eine Konfiguration, bei welcher die aktive Detektoroberfläche 16 im Zentralbereich im wesentlichen quadratisch ausgebildet und so dimensioniert ist, dass ihr die ausgeleuchtete Fläche 18 in der Ruhelage als Inkreis einbeschrieben ist. In Richtung auf die vier Ecken der Detektoreinheit läuft die sensitive Oberfläche jedoch jeweils spitz zu. Bei relativer Verschiebung von Detektoreinheit 24 und Sondenstrahl 18, wie sie in dem rechten Teilbild der Fig. 4b gezeigt ist, ändert sich der Grad der Überdeckung der sensitiven Oberfläche 16 mit dem zu detektierenden Sondenstrahl 18 dann stark nichtlinear.

Bei der alternativen Konfiguration der Fig. 4c sind die nicht-aktiven Detektorbereiche 44 der sensitiven Oberfläche 16 in Form von vier einander im Zentrum der Detektoroberfläche berührenden Keulen einbeschrieben. Aus dem rechten Teilbild der Fig. 4c, welches wiederum die relative Lage von Sondenstrahl 18 und Detektoreinheit nach erfolgter Ablenkung entlang der Richtung x zeigt, lässt sich ersehen, dass die von dem Sondenstrahl 18 überdeckte sensitive Oberfläche 16 der Detektoreinheit wiederum stark nichtlinear mit der Ablenkung variiert.

Sowohl bei der Detektorkonfiguration der Fig. 4b als auch bei der Detektorkonfiguration der Fig. 4c ist also die Signalhöhe nichtlinear zur Verschiebung des Sondenscheibchens 18. Bei einer zunächst symmetrischen Oszillation des Sondenstrahls um das Detektorzentrum, welches der Nullmessung entspricht, ergibt sich aus dem Fourier-Spektrum eine Komponente, die der Oszillationsgrundfrequenz entspricht, sowie höhere harmonische Frequenzanteile. Bei einer zusätzlichen lateralen Verschiebung des Sondenscheibchens 18 relativ zu dem Detektorzentrum durch die Wechselwirkung mit der Probe, wie sie in dem jeweils rechten Teilbild der Fig. 4b und der Fig. 4c gezeigt ist, wird der Signalhub wie in der Ausführung der Fig. 4a auf der nichtlinearen Kennlinie verschoben. Es entstehen neue harmonische Frequenzanteile bzw. eine Modifikation der Amplituden der bereits bestehenden Frequenzanteile. Durch die Auswertung dieser Frequenzanteile wird es wiederum möglich, die Verschiebung des Sondenstrahls relativ zu der Detektoroberfläche auch bei hohem Rauschsignal mit großer Präzision zu bestimmen.

Weitere vorteilhafte Detektorkonfigurationen, welche bei relativer Verschiebung des Sondenscheibchens 18 zu der Detektoroberfläche 16 zu einem nichtlinearen Signal führen, sind in Fig. 6 gezeigt.

Fig. 6a zeigt eine Detektoreinheit, welche vier Detektorsegmente 46a, 46b, 46c und 46d umfasst, die sensitive Oberflächen 48a, 48b, 48c, 48d aufweisen, voneinander beabstandet sind und derart zueinander angeordnet sind, dass sie die Ecken eines Quadrats bilden. In der in dem linken Teilbild der Fig. 6a gezeigt Ruhelage überlappt die ausgeleuchtete Fläche 18 in der Detektorebene mit jedem der Detektorsegmente 46a, 46b, 46c und 46d teilweise. Eine durch Wechselwirkung des Sondenstrahls mit der Probe hervorgerufene relative Verschiebung des Sondenstrahls zur Detektoroberfläche entlang der Richtung x ist im rechten Teilbild der Fig. 6a gezeigt. Wiederum ergibt sich eine nichtlineare Änderung der von dem Sondenstrahl überdeckten sensitiven Oberfläche 48a, 48b, 48c, 48d der Detektoreinheit.

Ein entsprechender Effekt lässt sich auch erzielen mit einer Detektoreinheit, welche lediglich zwei voneinander beabstandete Detektorsegmente 46a und 46b mit sensitiven Oberflächen 48a, 48b umfasst, wie in Fig. 6b gezeigt. Die Detektorsegmente 46a und 46b sind derart angeordnet, dass sie in der in dem linken Teilbild der Fig. 6b gezeigten Ruhelage jeweils teilweise mit dem Sondenscheibchen 18 überlappen. Die Verbindungslinie des Zentrums der Detektorsegmente 46a und 46b verläuft dabei nicht durch das Zentrum des Sondenscheibchens 18 in Ruhelage. Bei Auslenkung entlang der Richtung x, wie sie in dem mittleren Teilbild der Fig. 6b gezeigt ist, oder entlang der Richtung $-x$, wie sie in dem rechten Teilbild der Fig. 6b gezeigt ist, ändert sich der Betrag der von dem Sondenstrahl 14 überdeckten sensitiven Oberfläche 48a, 48b der Detektoreinheit wiederum stark nichtlinear. Eine Auswertung der Änderung des Frequenzspektrums zeigt Betrag und Richtung der Verschiebung an.

Die Konfiguration der Fig. 6c entspricht im wesentlichen der Konfiguration der Fig. 6b, wobei die Detektoreinheit 24 wiederum zwei quadratische Detektorsegmente 46a und 46b mit sensitiven Oberflächen 48a, 48b umfasst. Die Verbindungslinie des Zentrums der Detektorsegmente 46a und 46b verläuft wiederum nicht durch den Mittelpunkt des ausgeleuchteten Sondenscheibchens 18 in Ruhelage, ebenso wie vorangehend mit Bezug auf die Konfiguration der Fig. 6b beschrieben. Von der Konfiguration der Fig. 6b unterscheidet sich die Konfiguration der Fig. 6c darin, dass die Detektorsegmente 46a und 46b nicht voneinander beabstandet sind, sondern sich entlang einer gemeinsamen Kante berühren. Bei relativer Auslenkung des Sondenstrahls 12, 14 zu der Detektoroberfläche 48a, 48b ändert sich die von dem Sondenstrahl 12, 14 überdeckte sensitive Oberfläche der Detektoreinheit wiederum nichtlinear mit der Auslenkung. Das mittlere Teilbild der Fig. 6c zeigt die Änderung der Überdeckung der sensitiven Oberfläche 48a, 48b bei Verschiebung entlang der Richtung x, das rechte Teilbild der Fig. 6c bei Verschiebung entlang der Richtung $-x$. Aus der Änderung des Frequenzspektrums lassen sich Betrag und Richtung der Verschiebung rekonstruieren und daraus auf die Wechselwirkung des Sondenstrahls mit der Probe rückschließen.

In allen vorgenannten Detektorkonfigurationen können für die Messung einzelne Punkte der Probe, Liniengeometrien oder auch ganze Bildmatrizen punktweise abgetastet werden. Dabei kann dann für jeden einzelnen Probenpunkt der Strahl so lange auf der Probe stationär gehalten werden, bis eine ausreichend hohe Zahl von Oszillationen am Detektor 34 gemessen wurde. Das Detektorsignal 32 sowie das Ablenksignal und das Referenzsignal 36 werden von

einem schnellen Analog-Digital-Konverter erfasst und für jeden Messpunkt abgespeichert. Die Oszillationsrichtung des Strahls definiert dabei auch die Richtungskomponente der Strahlverschiebung, welche zu diesem Zeitpunkt detektiert wird. Vorzugsweise wird die Messung für jeden Messpunkt je zweimal unter orthogonalen Oszillationsrichtungen durchgeführt.

5 Die eigentliche Auswertung der Daten erfolgt dann nach der Datenerfassung mit Hilfe eines Rechners und geeigneter Software.

Die Richtungsselektivität kann in einer solchen Konfiguration, bei welcher der Sondenstrahl oszillierend in zwei vorzugsweise orthogonalen Richtungen über die sensitive Detektoroberfläche 16 geführt wird, allein und vollständig durch die relative Oszillation von Sondenstrahl und Detektoroberfläche bereitgestellt werden. Eine Strukturierung oder Segmentierung der sensitiven Detektoreinoberfläche 16, wie sie mit Bezug auf den Stand der Technik beschrieben wurde, kann dann entfallen. Unter Verwendung der vorangehend beschriebenen Auswertetechnik lassen sich aus dem Frequenzspektrum Betrag und Richtung der relativen Verschiebung direkt bestimmen.

Ein großer Vorteil dieser Ausführungsform liegt darin, dass keine aufwändige Strukturierung des Detektors mehr vorgenommen werden muss, um eine Richtungsselektivität des positionsempfindlicher Detektors zu erzielen. Dadurch ergibt sich sowohl eine Kostenersparnis als auch eine deutliche Vereinfachung des Fertigungsprozesses.

Zudem können in der vorgenannten Ausführungsform quadratische oder kreisscheibenförmige Detektoreinheiten eingesetzt werden, wie sie in vorbekannten Mikroskopen standardmäßig Verwendung finden. Solche Mikroskope des Standes der Technik lassen sich daher verhältnismäßig einfach zu einer Vorrichtung zur Bestimmung der Ablenkung gemäß der vorliegenden Erfindung aufrüsten, da keine Anpassung der Detektorkonfiguration nötig ist.

Diese Ausführungsform hat weiterhin den Vorteil, dass nahezu ohne Verlust an Präzision das gesamte Messsignal aufgenommen werden kann, ohne dass das Grundsignal kompensiert werden muss. Die Separation des Nutzsignals von dem Grundsignal kann allein bei der Datenauswertung erfolgen. Damit gelingt auch bei lokalen Intensitätsänderungen beim Durchlaufen der Probe, beispielsweise durch Bragg-Beugung oder Absorption, eine präzise Vermessung der Verschiebung mit sehr hoher Dynamik.

Ein Beispiel für die vorgenannte Ausführungsform unter Verwendung eines kreisförmigen STEM-Hellfelddetektors, wie er in vielen Elektronenmikroskopen und Lichtmikroskopen standardmäßig implementiert ist, ist schematisch in der Abbildung der Fig. 7 gezeigt. Der Durchmesser des divergenten Sondenstrahls 12, 14 in der Detektorebene ist dabei genau an die Größe des verwendeten kreisförmigen Detektors angepasst, so dass in der nicht verschobenen Ruhelage die kreisförmige ausgeleuchtete Fläche 18 in der Detektorebene 26 die sensitive Detektoroberfläche 16 genau abdeckt. Dies ist in Fig. 7a gezeigt und kann durch entsprechende Anpassung der abbildeten Optik sichergestellt werden. Der in Fig. 7a dargestellte maximale Überlapp ergibt ein maximales Signal U_1 .

Jede kleine Verschiebung des Sondenstrahls 12, 14 relativ zur Detektoroberfläche führt dann zu einer nichtlinearen Verringerung des Überlapps zwischen sensibler Detektoroberfläche 16 und Sondenscheibchen 18, wie in Fig. 7b dargestellt. Aufgrund der Verschiebung des Sondenscheibchens 18 relativ zu der sensiblen Detektoroberfläche 16 (entlang des Pfeils) ist der Überlapp reduziert, so dass sich ein kleineres Messsignal $U_2 < U_1$ ergibt.

Durch zwei orthogonale Oszillatoreinheiten 28 wird der Sondenstrahl 12, 14 oszillierend in zwei Richtungen über den Detektor geführt und dabei jeweils die Änderung des Frequenzspektrums des Detektorsignals 32 erfasst. Wie vorangehend beschrieben, lassen sich daraus Betrag und Richtung der durch Wechselwirkung des Sondenstrahls mit der Probe hervorgerufenen Verschiebung des Sondenstrahls bestimmen.

Die unter Verwendung der erfindungsgemäßen Vorrichtung erreichbare hochpräzise Messung der Strahlverschiebung konnte für die Anordnung der bevorzugten Ausführungsform der Fig. 3 mit der Detektorkonfiguration der Fig. 7 in Simulationsrechnungen bestätigt werden. Fig. 8a zeigt für eine solche Simulationsrechnung das Oszillator-Referenzsignal der Oszillatoreinheit 28. Das resultierende stark verrauschte Messsignal ist in Fig. 8b gezeigt, das aufmodulierte Rauschsignal in Fig. 8c.

Bei der in den bevorzugten Ausführungsformen verwendeten Fourier-Filtertechnik wird das Grundsignal der durch die Oszillatoreinheit hervorgerufenen Oszillation auf die Fourier-Komponente der Frequenz $f = f_0$ abgebildet. Im Kanal für $f = 0$ hingegen findet man das über die Anzahl der Messperioden gemittelte Grundsignal, welches durch die Wechselwirkung der Strahlsonde 12, 14 mit der Probe 10 entsteht. Fig. 9 zeigt für die Simulation der Fig. 8 diese

Komponente in Abhängigkeit von der Verschiebung des Sondenstrahls. Wie der Fig. 9 zu entnehmen ist, ergibt sich trotz des hohen Rauschens eine Linearität zwischen Strahlverschiebung und entsprechender Fourier-Komponente. Aus der Fourier-Komponente lässt sich daher die Strahlverschiebung mit großer Genauigkeit bestimmen.

5

Die unter Bezugnahme auf die Fig. 7 bis 9 beschriebene Detektorkonfiguration mit kreisförmigen Detektor 16 und einem in Ruhelage auf den Detektor zentrierten Sondenstrahl 14 ist schematisch nochmals in Fig. 10a gezeigt. Fig. 10b zeigt für diese Konfiguration den Verlauf der Fourier-Komponenten für die Frequenz $f = 0$ ($w0$) sowie für die erste Harmonische ($w1$),
10 zweite Harmonische ($w2$) und dritte Harmonische ($w3$) als Funktion der Verschiebung des Sondenstrahls aus der Ruhelage (in willkürlichen Einheiten). Wie aus der Abbildung der Fig. 10b zu entnehmen ist, zeigt in Bestätigung der Simulationsrechnung der Fig. 9 insbesondere die Komponente der ersten Frequenz $f = 0$ einen (schwach) linearen Verlauf. Die Komponente der ersten Harmonischen ($w1$) und die Komponente der dritten Harmonischen ($w3$) verläuft
15 in Abhängigkeit von der Verschiebung des Sondenstrahls sogar noch stärker linear und ist daher besonders gut für eine Bestimmung der Ablenkung des Sondenstrahls aus der Ruhelage geeignet.

Fig. 11b zeigt ein entsprechendes Diagramm für die Konfiguration der Fig. 11a, in welcher
20 die sensitive Detektoroberfläche 16 wiederum kreisförmig ausgebildet ist, wobei der Durchmesser der sensitiven Detektoroberfläche 16 dem Durchmesser des kreisförmigen Strahlbildes 14 entspricht, der Sondenstrahl 14 und die sensitive Detektoroberfläche 16 jedoch in der Ruhelage gegeneinander verschoben sind, so dass sie nur teilweise überlappen. Aus dem Diagramm der Fig. 11b ergibt sich, dass insbesondere die Komponente der zweiten Harmonischen ($w2$) einen linearen Verlauf als Funktion der Verschiebung aufweist und daher für die
25 genaue Bestimmung der Strahlverschiebung gut geeignet ist.

Fig. 12 b zeigt ein entsprechendes Diagramm für die Konfiguration der Fig. 12a, in welcher im Vergleich zur Konfiguration der Fig. 11a der kreisförmige Detektor durch einen rechteckigen Detektor ersetzt ist, welcher wiederum in der Ruhelage teilweise mit dem Sondenstrahl
30 14 überlappt. Für die Frequenz $f = 0$ ($w0$), die erste Harmonische ($w1$), die zweite Harmonische ($w2$) und die dritte Harmonische ($w3$) ergibt sich als Funktion der Verschiebung des Sondenstrahls 14 der in der Fig. 12b gezeigte Verlauf, welcher dem Verlauf der entsprechenden Komponente im Diagramm der Fig. 11b ähnlich ist. Wiederum zeigt die zweite Harmoni-

sche (w_2) einen annähernd linearen Verlauf, welcher für eine genaue Bestimmung der Strahlverschiebung gut geeignet ist.

Auch die erste Harmonische (w_1) und die dritte Harmonische (w_3) variieren in den Diagrammen der Fig. 11b und 12b stark in Abhängigkeit von der Verschiebung des Sondenstrahls und sind daher prinzipiell geeignet, aus dem Betrag der entsprechenden Komponente auf die Verschiebung des Sondenstrahls zu schießen.

Die Erfinder haben erkannt, dass sich durch geeignete Kombination mehrerer harmonischer Fourier-Komponenten, welche proportional zur Verschiebung sind, eine deutliche Verbesserung des Signal-/Rauschverhältnisses erreichen lässt. Beispielsweise kann ein resultierender Vektor durch Vektoraddition der komplexwertigen einzelnen Fourier-Komponenten erhalten werden.

Während messtechnisch eine einzelne Fourier-Komponente durch eine Amplitude plus Phasenwinkel beschrieben werden kann, weisen mehrere Fourier-Komponenten durch messtechnische Unsicherheiten unterschiedliche Phasenwinkel auf. Werden die komplexwertigen Komponenten vektoriell addiert, so wird durch die Addition mehrerer Komponenten eine Mittelung in der komplexen Ebene erreicht, wodurch die Länge und der Phasenwinkel des resultierenden Vektors genauer bestimmbar sind als bei einer Einzelmessung nur einer harmonischen Komponente. Durch die Verknüpfung mehrerer harmonischer Komponenten lässt sich auf diese Weise die Signalthöhe und dadurch die Messgenauigkeit weiter verbessern.

Neben den vorangehend beschriebenen Detektorkonfiguration mit einfach zusammenhängender aktiver Oberfläche können erfindungsgemäß auch Detektoren zum Einsatz kommen, bei denen die aktive Oberfläche von mehreren räumlich voneinander getrennten Streifen gebildet wird. Ein Beispiel ist schematisch in der Abbildung der Fig. 13a gezeigt. Die Detektoreinheit umfasst in dieser Konfiguration mehrere parallel zueinander angeordnete, beabstandete Glasfaserstreifen 50, welche zusammengenommen die aktive Detektoroberfläche bilden. In Abhängigkeit von der Position des Sondenstrahls 14 wird jeweils ein Teil der Glasfaserstreifen 50 überdeckt, während der komplementäre Teil unbedeckt ist. Verschiebt sich der Strahl 14 in der Detektorebene, werden sukzessive zuvor unbedeckte Glasfaserstreifen 50 von dem Sondenstrahl 14 überdeckt bzw. zuvor überdeckte Glasfaserstreifen 50 freigelegt. Das Detektor-

signal steigt dabei sprunghaft an bzw. fällt sprunghaft ab, so dass sich wiederum ein stark nichtlinearer Signalverlauf ergibt.

Der sich für die Konfiguration der Fig. 13a ergebende Verlauf der Fourier-Komponenten für die Frequenz $f = 0$ (w_0), die erste Harmonische (w_1), die zweite Harmonische (w_2) und die dritte Harmonische (w_3) ist in Fig. 13b gezeigt. Wie aus der Darstellung der Fig. 13b zu entnehmen ist, variieren sowohl die erste Harmonische (w_1) als auch die dritte Harmonische (w_3) deutlich als Funktion der Verschiebung des Sondenstrahls 14. Aus diesen Komponenten lässt sich also auf die Verschiebung des Sondenstrahls zurückschließen.

Die Erfinder haben festgestellt, dass sich gute Ergebnisse insbesondere auch mit einer Detektorconfiguration erzielen lassen, in welcher der Detektor eine aktive Detektoroberfläche und eine nicht-aktive, beispielsweise passivierte, Oberfläche aufweist, wobei die Trennlinie zwischen der aktiven Detektoroberfläche und der nicht-aktiven Detektoroberfläche zumindest abschnittsweise einer Exponentialfunktion folgt. Die Verschiebung des Sondenstrahls erzeugt in diesem Randbereich dann ein stark nichtlinear sich änderndes Detektorsignal, so dass die Änderung der harmonischen Anteile des Detektorsignals stark ausgeprägt ist und sich daraus mit großer Genauigkeit auf die durch Wechselwirkung mit der Probe hervorgerufene räumliche Ablenkung des Sondenstrahls schließen lässt.

Zur Erzielung dieser Wirkung ist es dabei nicht zwingend erforderlich, dass die gesamte Trennlinie zwischen dem aktiven Bereich und dem nicht-aktiven Bereich der Detektoroberfläche durch eine Exponentialfunktion beschrieben ist. Vielmehr reicht es aus, dass die Detektoreinheit in demjenigen Teilbereich, in welchem eine Änderung der Überdeckung mit dem Sondenstrahl zu erwarten ist, so ausgebildet ist.

Auch ist es nicht erforderlich, dass der Randbereich exakt den Verlauf einer Exponentialfunktion folgt. Vielmehr ist es ausreichend, wenn dieser Randbereich sich durch einen exponentialen Verlauf gut approximieren lässt, beispielsweise die Abweichung zwischen dem tatsächlichen Verlauf der Trennlinie zwischen aktivem und nicht-aktivem Bereich und einem einer Exponentialfunktion folgenden Verlauf relativ weniger als 10 % beträgt.

Ein Detektorelement mit einem aktiven Detektorbereich 16, welcher von einer umgebenden inaktiven Detektoroberfläche 44 abschnittsweise durch eine exponential verlaufende Trennli-

nie getrennt ist, ist beispielsweise in Fig. 4b gezeigt. In dieser Konfiguration ist die aktive Detektoroberfläche 16 im Zentralbereich im Wesentlichen quadratisch ausgebildet, läuft jedoch in Richtung auf die vier Ecken der Detektoreinheit jeweils spitz zu. In diesem Randbereich, welcher bei der Verschiebung entlang der orthogonalen Richtungen x und y jeweils zu unterschiedlichen Graden überdeckt ist, verläuft die Trennlinie zwischen der aktiven Detektoroberfläche 16 und der umgebenden inaktiven Detektoroberfläche 44 exponentiell.

Eine alternative Konfiguration mit exponentiell verlaufendem Randbereich ist in der Abbildung der Fig. 14 gezeigt. Bei diesem Detektorelement ist die aktive Detektoroberfläche 16 im Gegensatz zu der Konfiguration der Fig. 4b im Außenbereich angeordnet (schraffiert). Die in Fig. 14 geschwärzten Bereiche sind passiviert und bilden zusammengekommen die inaktive Detektoroberfläche 44, welche von der umgebenden aktiven Detektoroberfläche 16 durch eine Trennlinie getrennt ist, welche sich wiederum abschnittsweise durch eine Exponentialfunktion beschreiben lässt.

Die Erfinder haben erkannt, dass sich ein nichtlineares Detektorsignal vorzugsweise auch unter Verwendung von dreidimensionalen Detektorkonfigurationen erreichen lässt, wobei die Detektoreinheit einen sensitiven Volumenbereich umfasst, dessen Durchmesser in einer Richtung senkrecht und/oder parallel zu einer Detektoroberfläche variiert und wobei das Detektor-segmentssignal auf dem Grad der Überdeckung des sensitiven Volumenbereichs mit dem Sondenstrahl basiert.

Eine solche Konfiguration ist beispielhaft in der perspektivischen Ansicht der Fig. 15a gezeigt. Das aktive Detektorvolumen 52 hat in diesem Beispiel die Form eines Pyramidenstumpfes, dessen abgeflachte Spitze (in Richtung $-y$) seitwärts nach außen gerichtet ist (z bezeichnet die Richtung der Probe 10 bzw. der Strahlenquelle). Das aktive Detektorvolumen 52 kann in ein umgebendes nicht-aktives Detektorvolumen eingebettet sein und mit diesem zusammen die Detektoreinheit 24 bilden. Die Detektoreinheit 24 kann auch mehrere voneinander räumlich getrennte aktive Detektorvolumina 52 umfassen. Beispielsweise kann eine Detektoreinheit 24 vier der in Fig. 15a gezeigten aktiven Detektorvolumina 52 umfassen, welche jeweils um 90° um die z -Achse zueinander gedreht sind und zusammengekommen das gesamte aktive Detektorvolumen ergeben. Das Messsignal ist jeweils proportional zum bestrahlten Szintillatorvolumen.

Ein Schnitt durch die Konfiguration der Fig. 15a (entlang der Richtung y) ist schematisch in Fig. 15b gezeigt. Wird der zu messende Strahl 14 in y Richtung verschoben, ändert sich das Messsignal proportional zu y^3 und damit nichtlinear. Im allgemeinen ändert sich das Signal entsprechend der Formänderung des Detektors sowohl in der Breite als auch in der Tiefe nichtlinear. Aus der Änderung des Frequenzspektrums lässt sich dann nach der Theorie der Second Harmonics Generation wiederum auf Betrag und Richtung der Verschiebung rückschließen.

In den vorangehend beschriebenen Ausführungen wurde das nichtlineare Antwortsignal durch eine relative Verschiebung von Strahl und Detektor unter Verwendung einer Detektoreinheit, deren aktive Oberfläche sich nichtlinear mit der Auslenkung ändert, erzeugt. Ein entsprechender Effekt lässt sich jedoch auch dann erzielen, wenn weder die Probe noch der Strahl als solche abgelenkt werden, sondern stattdessen die Probeneigenschaften periodisch variiert werden. Beispielsweise kann ein mit einer harmonischen Grundfrequenz oszillierendes Signal eine nichtlineare Änderung der Probeneigenschaften, welche die Wechselwirkung mit dem Sondenstrahl beeinflussen, bewirken. Durch Frequenzanalyse des Detektorsignals, wie sie für die vorangehenden Ausführungsformen beschrieben wurde, kann dann wiederum auf die räumliche Ablenkung des Sondenstrahls geschlossen werden.

Wenn die Probe magnetisch ist, kann beispielsweise am Ort der Probe ein harmonisch oszillierendes Magnetfeld erzeugt werden, das auf die Probe einwirkt. Aufgrund der nichtlinearen Hysteresekurve bzw. der nichtlinearen Sättigungseigenschaften der Probe ändert sich die Magnetisierung der Probe anharmonisch. Wird der Sondenstrahl 12, 14 dazu benutzt, die Magnetisierung der Probe über eine Sondenstrahlablenkung aufgrund der Lorentz-Kraft zu bestimmen, lässt sich aus der Verteilung der anharmonischen Frequenzanteile auf den Betrag und die Richtung der Ablenkung des Sondenstrahls und daraus wiederum auf die Form der Hysteresekurve rückschließen.

Zusätzlich besteht die Möglichkeit, auch die Amplitude der die Wirkung erzeugenden Grundoszillation zu variieren und auf diese Weise den Beginn der anharmonischen Effekte, also die Abweichung von einer linearen Antwortfunktion des zu untersuchenden Systems detailliert zu analysieren.

Entsprechend lässt sich mit dem erfindungsgemäßen Verfahren auch eine Probe mit einer Sandwich-Struktur, in welcher sich magnetische und nicht-magnetische Schichten abwechseln, analysieren, indem ein Strom spinpolarisierter Elektronen an der Grenzfläche zwischen einer nicht-magnetischen und einer magnetischen Schicht injiziert wird. Die Injektion führt dazu, dass sich in der nicht-magnetischen Schicht eine (zeitlich abklingende) Magnetisierung einstellt, wobei sich die magnetischen Eigenschaften der Probe im Allgemeinen nichtlinear ändern. Durch Erzeugen eines periodisch variierenden elektrischen Feldes im Ort der Probe und Messen der Ablenkung eines Sondenstrahls lässt sich wiederum auf die Probeneigenschaften rückschließen.

Vorangehend wurde die Erfindung am Beispiel der konventionellen Mikroskopie, insbesondere der Transmissionselektronenstrahlmikroskopie magnetischer Proben, beschrieben. Die Erfindung ist jedoch weder auf die Mikroskopie noch auf materielle Proben beschränkt. Beispielsweise kann die Erfindung auch bei der Detektion von Gravitationsfeldern eingesetzt werden. In einer solchen Anwendung gibt es keine materielle Probe. Ein Lichtstrahl verläuft in dem zu untersuchenden Gravitationsfeld von einer Quelle zu einem Detektor, wobei das durchstrahlte Raumvolumen, welches einem Gravitationsfeld ausgesetzt ist, die Probe darstellt. Wird der Lichtstrahl periodisch ausgelenkt und ändert sich bei einer relativen Auslenkung des Sondenstrahls und des Detektorsegments die von dem Sondenstrahl überdeckten Oberfläche des Detektorsegments nichtlinear mit der Auslenkung, kann unter Verwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens eine durch Wechselwirkung des Lichtstrahls mit dem Gravitationsfeld hervorgerufene Lichtstrahlablenkung mit hoher Auflösung vermessen werden. Dadurch wird es möglich, die Auswirkung selbst kleinster Änderungen des Gravitationsfeldes, wie sie beispielsweise von Hohlräumen im Untergrund hervorgerufen werden können, zu detektieren.

Die beschriebenen Ausführungsformen der Erfindung und die Figuren dienen allein der Veranschaulichung und Erläuterung der Erfindung, sollen die Erfindung jedoch in keiner Weise beschränken. Der Umfang der Erfindung ist allein durch die anliegenden Ansprüche bestimmt.

5 Bezugszeichen

	10	Probe
	12	einfallender Sondenstrahl
	14	abgelenkter Sondenstrahl
10	16	sensitive Detektoroberfläche
	18	ausgeleuchtete Fläche in Detektorebene
	20, 20'	Differenzglieder
	22	Lochelement
	24	Detektoreinheit
15	26	Detektorebene
	28	Oszillatoreinheit
	30	Wechselspannungsquelle
	32	Detektor(segment)signal
	34	Auswerteeinheit
20	36	Referenzsignal
	38	Sinussignal
	40	nichtlineare Kennkurve
	42	resultierendes Signal
	44	inaktive Detektoroberfläche
25	46a,b,c,d	Detektorsegmente
	48a,b,c,d	sensitive Oberflächen der Detektorsegmente 46a,b,c,d
	50	Glasfaserstreifen
	52	aktives Detektorvolumen

Ansprüche

1. Vorrichtung zum Bestimmen einer durch eine Wechselwirkung mit einer Probe (10) hervorgerufenen Ablenkung eines Sondenstrahls (12, 14) mit:

einer Detektoreinheit (24) mit zumindest einem Detektorsegment (46a, 46b, 46c, 46d) mit einer sensitiven Oberfläche (16; 48a, 48b, 48c, 48d) und/oder einem sensitiven Volumen (52), wobei das Detektorsegment (46a, 46b, 46c, 46d) dazu eingerichtet ist, ein Detektorsegmentsignal (32) zu erzeugen, welches einen Grad einer Überdeckung seiner Oberfläche (16; 48a, 48b, 48c, 48d) und/oder seines Volumens (52) mit einem zu detektierenden Sondenstrahl (12, 14) anzeigt, und wobei die Detektoreinheit (24) dazu eingerichtet ist, ein Detektorsignal auszugeben, welches zumindest teilweise auf dem Detektorsegmentsignal (32) basiert;

einer Oszillatoreinheit (28), welche dazu eingerichtet ist, den Sondenstrahl (12, 14) und das zumindest eine Detektorsegment (46a, 46b, 46c, 46d) relativ zueinander periodisch mit einer vorbestimmten Frequenz (f_0) entlang wenigstens einer ersten Richtung (x) aus einer Ruhelage auszulenken;

wobei die Detektoreinheit (24) und/oder die Oszillatoreinheit (28) derart eingerichtet sind, dass sich bei einer relativen Auslenkung des Sondenstrahls (12, 14) und des Detektorsegments (46a, 46b, 46c, 46d) die von dem Sondenstrahl (12, 14) überdeckte Oberfläche (16; 48a, 48b, 48c, 48d) bzw. das von dem Sondenstrahl (12, 14) überdeckte Volumen (52) des Detektorsegments (46a, 46b, 46c, 46d) nichtlinear mit der Auslenkung ändert; und

einer Auswerteeinheit (34), welche dazu eingerichtet ist, ein Frequenzspektrum des Detektorsignals zu erfassen und daraus eine durch die Wechselwirkung mit der Probe (10) hervorgerufene räumliche Ablenkung des Sondenstrahls (12, 14) zu bestimmen.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, bei welcher die Auswerteeinheit (34) dazu eingerichtet ist, eine spektrale Amplitude des Detektorsignals, insbesondere eine spektrale

Amplitude eines harmonischen Anteils des Detektorsignals, zu erfassen und daraus die durch die Wechselwirkung mit der Probe (10) hervorgerufene räumlichen Ablenkung des Sondenstrahls (12, 14) zu bestimmen.

3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, bei welcher die Auswerteeinheit (34) dazu eingerichtet ist, die durch die Wechselwirkung mit der Probe (10) hervorgerufene räumliche Ablenkung des Sondenstrahls (12, 14) aus einer Ausbildung zusätzlicher harmonischer Frequenzanteile in dem Frequenzspektrum und/oder aus einer Modifikation von spektralen Amplituden harmonischer Frequenzanteile zu bestimmen.
4. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei welcher der Sondenstrahl (12, 14) ein Teilchenstrahl, insbesondere ein Elektronenstrahl, oder eine elektromagnetische Welle, insbesondere ein Lichtstrahl, ist.
5. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei welcher die Oszillatoreinheit (28) dazu eingerichtet und positioniert ist, den Sondenstrahl (12, 14) nach dessen Wechselwirkung mit der Probe (10) relativ zu der Detektoreinheit (24) auszulenken.
6. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei welcher die Oszillatoreinheit (28) ein magnetisches Ablenkelement und/oder ein elektrisches Ablenkelement umfasst.
7. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei welcher die Oszillatoreinheit (28) dazu eingerichtet ist, das zumindest eine Detektorsegment (46a, 46b, 46c, 46d) der Detektoreinheit (24) periodisch mit der vorbestimmten Frequenz (f_0) entlang der ersten Richtung (x) aus der Ruhelage auszulenken.
8. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei welcher die Oszillatoreinheit (28) dazu eingerichtet ist, den Sondenstrahl (12, 14) und das zumindest eine Detektorsegment (46a, 46b, 46c, 46d) relativ zueinander periodisch mit einer vorbestimmten Frequenz entlang einer zweiten Richtung (y) aus einer

Ruhelage auszulenken, wobei die zweite Richtung (y) mit der ersten Richtung (x) nicht übereinstimmt, insbesondere orthogonal zu der ersten Richtung (x) ist.

9. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei welcher die Detektoreinheit (24) eine kreisförmige sensitive Oberfläche (16) umfasst, deren Fläche einer Ausdehnung eines Strahlkegels des Sondenstrahls (12, 14) in der Ruhelage entspricht.
10. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 8, bei welcher die Detektoreinheit (24) derart ausgebildet und angeordnet ist, dass die sensitive Oberfläche (16; 48a, 48b, 48c, 48d) nicht rotationssymmetrisch bezüglich einer Achse senkrecht zu der sensitiven Oberfläche (16; 48a, 48b, 48c, 48d) ist und/oder das sensitive Volumen (52) nicht rotationssymmetrisch bezüglich einer Achse senkrecht zu einer Detektoroberfläche ist.
11. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei welcher die Detektoreinheit (24) mehrere voneinander beabstandete Detektorsegmente (46a, 46b, 46c, 46d) umfasst, welche jeweils sensitive Oberflächen (48a, 48b, 48c, 48d) umfassen, die derart angeordnet sind, dass der Strahlkegel des Sondenstrahls (12, 14) in der Ruhelage die sensitiven Oberflächen (48a, 48b, 48c, 48d) der Detektorsegmente (46a, 46b, 46c, 46d) jeweils zumindest teilweise überdeckt.
12. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei welcher die Detektoreinheit (24) einen sensitiven Volumenbereich (52) umfasst, dessen Durchmesser in einer Richtung parallel und/oder senkrecht zu einer Detektoroberfläche variiert.
13. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei welcher die Detektoreinheit (24) einen sensitiven Volumenbereich (52) umfasst, welcher eine in einer Richtung parallel und/oder senkrecht zu einer Detektoroberfläche sich verjüngende Spitze umfasst.
14. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei welcher die Detektoreinheit (24) mehrere parallel zueinander verlaufende Glasfaserelemente (50) umfasst.

15. Vorrichtung nach einem der vorangehenden Ansprüche, bei welcher die Detektoreinheit (24) eine sensitive Oberfläche (16) umfasst, deren Randbereich zumindest abschnittsweise durch eine Exponentialfunktion beschrieben oder approximierbar ist.
16. Detektoreinheit (24) für eine Vorrichtung zur Bestimmung einer durch eine Wechselwirkung mit einer Probe (10) hervorgerufenen Ablenkung eines Sondenstrahls (12, 14) mit einer für den Sondenstrahl (12, 14) sensitiven Oberfläche, deren Randbereich zumindest abschnittsweise durch eine Exponentialfunktion beschrieben oder approximierbar ist.
17. Detektoreinheit (24) für eine Vorrichtung zur Bestimmung einer durch eine Wechselwirkung mit einer Probe (10) hervorgerufenen Ablenkung eines Sondenstrahls (12, 14) mit einem für den Sondenstrahl (12, 14) sensitiven Volumenbereich (52), dessen Durchmesser in einer Richtung parallel und/oder senkrecht zu einer Detektoroberfläche variiert.
18. Vorrichtung zum Bestimmen einer durch eine Wechselwirkung mit einer Probe (10) hervorgerufenen Ablenkung eines Sondenstrahls (12, 14) mit:

einer Oszillatoreinheit (28), welche dazu eingerichtet ist, am Ort der Probe (10) ein periodisch mit einer vorbestimmten Frequenz (f_0) variierendes Anregungssignal zu erzeugen, welches dazu geeignet ist, eine die Wechselwirkung mit dem Sondenstrahl (12, 14) beeinflussende physikalische Eigenschaft der Probe (10) nichtlinear zu variieren;

einer Detektoreinheit (24), welche zum Erfassen des Sondenstrahls (12, 14) nach dessen Wechselwirkung mit der Probe (10) und zum Ausgeben eines Detektorsignals eingerichtet ist; und

einer Auswerteeinheit (34), welche dazu eingerichtet ist, ein Frequenzspektrum des Detektorsignals zu erfassen und daraus eine durch die Wechselwirkung mit der Probe (10) hervorgerufene räumliche Ablenkung des Sondenstrahls (12, 14) zu bestimmen.

19. Vorrichtung nach Anspruch 18, bei welcher die Oszillatoreinheit dazu eingerichtet ist, am Ort der Probe (10) ein mit der vorbestimmten Frequenz (f_0) variierendes Magnetfeld zu erzeugen.
20. Vorrichtung nach Anspruch 18 oder 19, bei welcher die Oszillatoreinheit dazu eingerichtet ist, in die Probe (10) einen Strom spinpolarisierter Elektronen zu injizieren und am Ort der Probe (10) ein mit der vorbestimmten Frequenz (f_0) variierendes elektrisches Feld zu erzeugen.
21. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 18 bis 20, bei welcher die Auswerteeinheit (34) dazu eingerichtet ist, eine spektrale Amplitude des Detektorsignals (32), insbesondere eine spektrale Amplitude eines harmonischen Anteils des Detektorsignals, zu erfassen und daraus die durch die Wechselwirkung mit der Probe (10) hervorgerufene räumliche Ablenkung des Sondenstrahls (12, 14) zu bestimmen.
22. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 18 bis 21, bei welcher die Auswerteeinheit (34) dazu eingerichtet ist, die durch die Wechselwirkung mit der Probe (10) hervorgerufene räumliche Ablenkung des Sondenstrahls (12, 14) aus einer Ausbildung zusätzlicher harmonischer Frequenzanteile in dem Frequenzspektrum und/oder aus einer Modifikation von spektralen Amplituden harmonischer Frequenzanteile zu bestimmen.
23. Verfahren zum Messen einer durch eine Wechselwirkung mit einer Probe (10) hervorgerufenen Ablenkung eines Sondenstrahls (12, 14) mit folgenden Schritten:

Erfassen einer Überdeckung einer sensitiven Oberfläche (16; 48a, 48b, 48c, 48d) und/oder eines sensitiven Volumens (52) zumindest eines Detektorsegments (46a, 46b, 46c, 46d) einer Detektoreinheit (24) mit einem durch Wechselwirkung mit der Probe (10) abgelenkten Sondenstrahl (12, 14) und Erzeugen eines einen Grad der Überdeckung des zumindest einen Detektorsegments (46a, 46b, 46c, 46d) anzeigenden Detektorsegmentsignals (32);

Ausgeben eines Detektorsignals, welches zumindest teilweise auf dem Detektorsegmentsignal (32) basiert;

periodisches Auslenken des Sondenstrahls (12, 14) und des Detektorsegments (46a, 46b, 46c, 46d) relativ zueinander aus einer Ruhelage mit einer vorbestimmten Frequenz (f_0) entlang wenigstens einer ersten Richtung (x) derart, dass sich die von dem Sondenstrahl (12, 14) überdeckte Oberfläche (16; 48a, 48b, 48c, 48d) und/oder das von dem Sondenstrahl (12, 14) überdeckte Volumen (52) des Detektorsegments (46a, 46b, 46c, 46d) nichtlinear mit der Auslenkung ändert;

Erfassen eines Frequenzspektrums des Detektorsignals; und

Bestimmen einer durch die Wechselwirkung mit der Probe (10) hervorgerufenen räumlichen Ablenkung des Sondenstrahls (12, 14) aus dem erfassten Frequenzspektrum.

24. Verfahren nach Anspruch 23, bei welchem das zumindest eine Detektorsegment (46a, 46b, 46c, 46d) periodisch mit der vorbestimmten Frequenz (f_0) entlang der ersten Richtung (x) aus der Ruhelage ausgelenkt wird.
25. Verfahren nach Anspruch 23 oder 24 mit dem Schritt des periodisches Auslenkens des Sondenstrahls (12, 14) und des zumindest einen Detektorsegments (46a, 46b, 46c, 46d) relativ zueinander entlang einer zweiten Richtung (y) derart, dass sich bei dem Auslenken die von dem Sondenstrahl (12, 14) überdeckte Oberfläche (16; 48a, 48b, 48c, 48d) des zumindest einen Detektorsegments (46a, 46b, 46c, 46d) nichtlinear mit der Auslenkung ändert, wobei die zweite Richtung (y) nicht mit der ersten Richtung (x) übereinstimmt, insbesondere orthogonal zu der ersten Richtung (x) ist, und wobei der Schritt des Auslenkens in die zweite Richtung (y) nach dem Schritt des Auslenkens in die erste Richtung (x) erfolgt.
26. Verfahren zum Messen einer durch eine Wechselwirkung mit einer Probe (10) hervorgerufenen Ablenkung eines Sondenstrahls (12, 14) mit folgenden Schritten:

Erzeugen eines periodisch mit einer vorbestimmten Frequenz (f_0) variierenden Anregungssignals am Ort der Probe (10), wobei das Anregungssignal dazu eingerichtet ist, eine die Wechselwirkung der Probe (10) mit dem Sondenstrahl (12, 14) beeinflussende physikalische Eigenschaft der Probe (10) nichtlinear zu variieren;

Erfassen des Sondenstrahls (12, 14) nach dessen Wechselwirkung mit der Probe (10) mittels einer Detektoreinheit (24);

Ausgeben eines Detektorsignals;

Erfassen eines Frequenzspektrums des Detektorsignals; und

Bestimmen einer durch die Wechselwirkung mit der Probe (10) hervorgerufenen räumlichen Ablenkung des Sondenstrahls (12, 14) aus dem erfassten Frequenzspektrum.

27. Verfahren nach einem der Ansprüche 23 bis 26 mit den Schritten des Erfassens einer spektralen Amplitude des Detektorsignals, insbesondere einer spektralen Amplitude eines harmonischen Anteils des Detektorsignals, und des Bestimmens einer räumlichen Ablenkung des Sondenstrahls (12, 14) aus der erfassten spektralen Amplitude.
28. Verfahren nach einem der Ansprüche 23 bis 27, bei welchem die durch die Wechselwirkung mit der Probe (10) hervorgerufene räumliche Ablenkung des Sondenstrahls (12, 14) aus einer Ausbildung zusätzlicher harmonischer Frequenzanteile in dem Frequenzspektrum und/oder aus einer Modifikation von spektralen Amplituden harmonischer Frequenzanteile des Frequenzspektrums bestimmt wird.
29. Verfahren nach einem der Ansprüche 23 bis 28, wobei die Detektoreinheit (24) eine Detektoreinheit gemäß einem der Ansprüche 9 bis 17 ist.

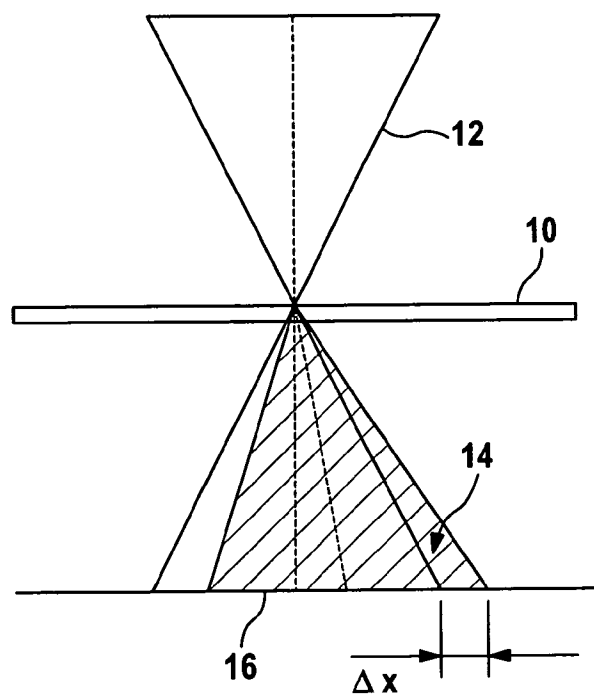


Fig. 1

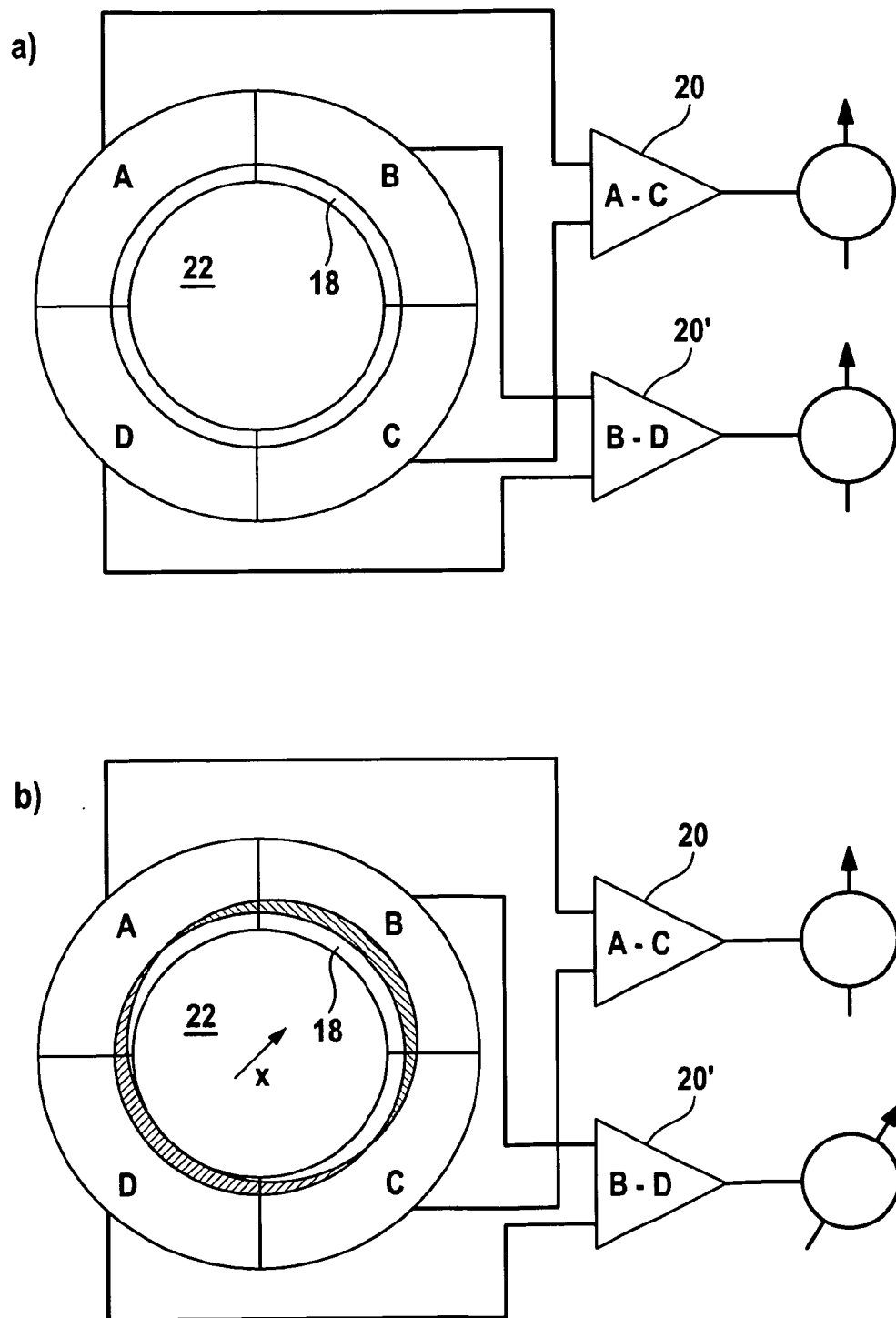


Fig. 2

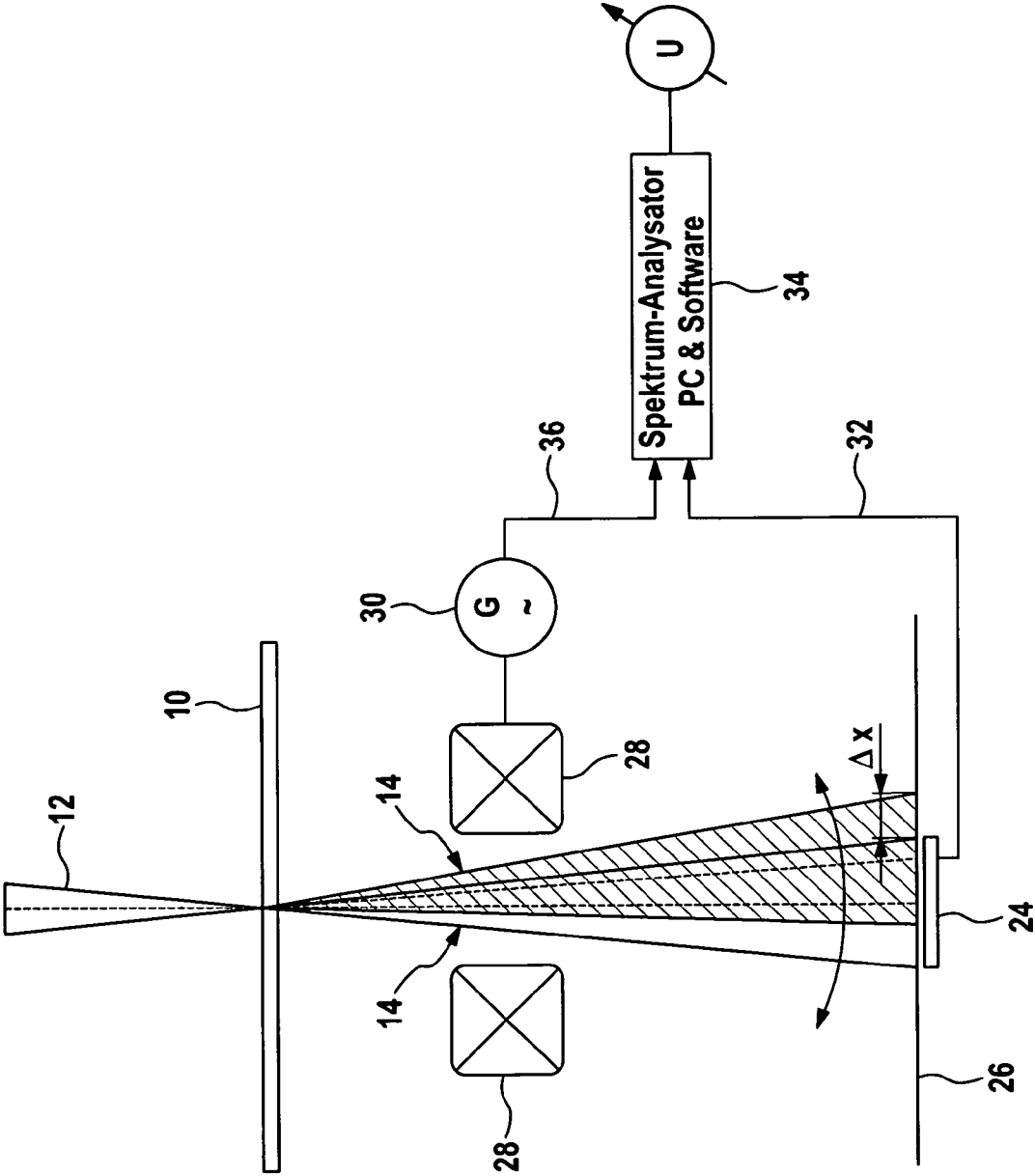
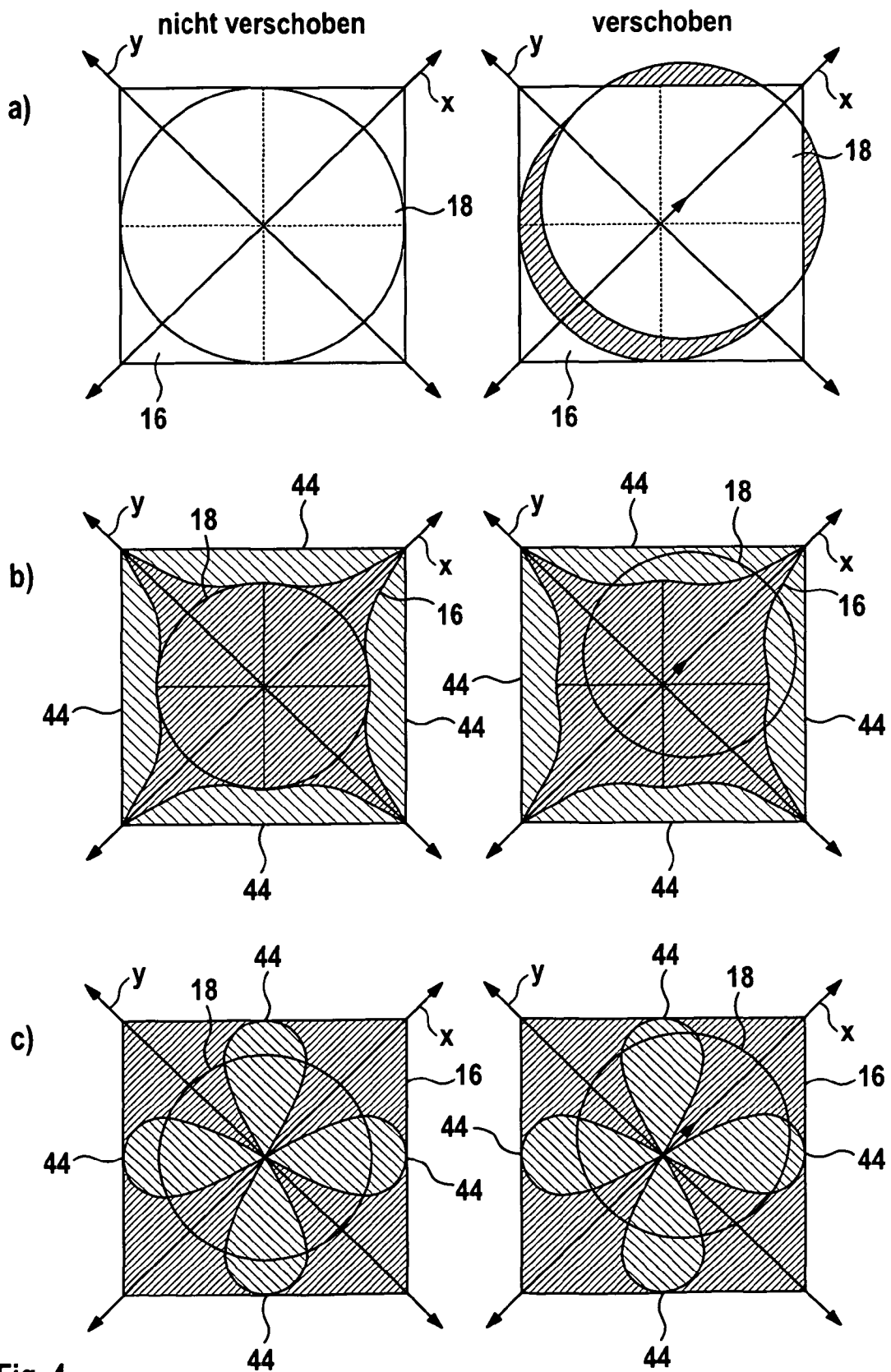


Fig. 3



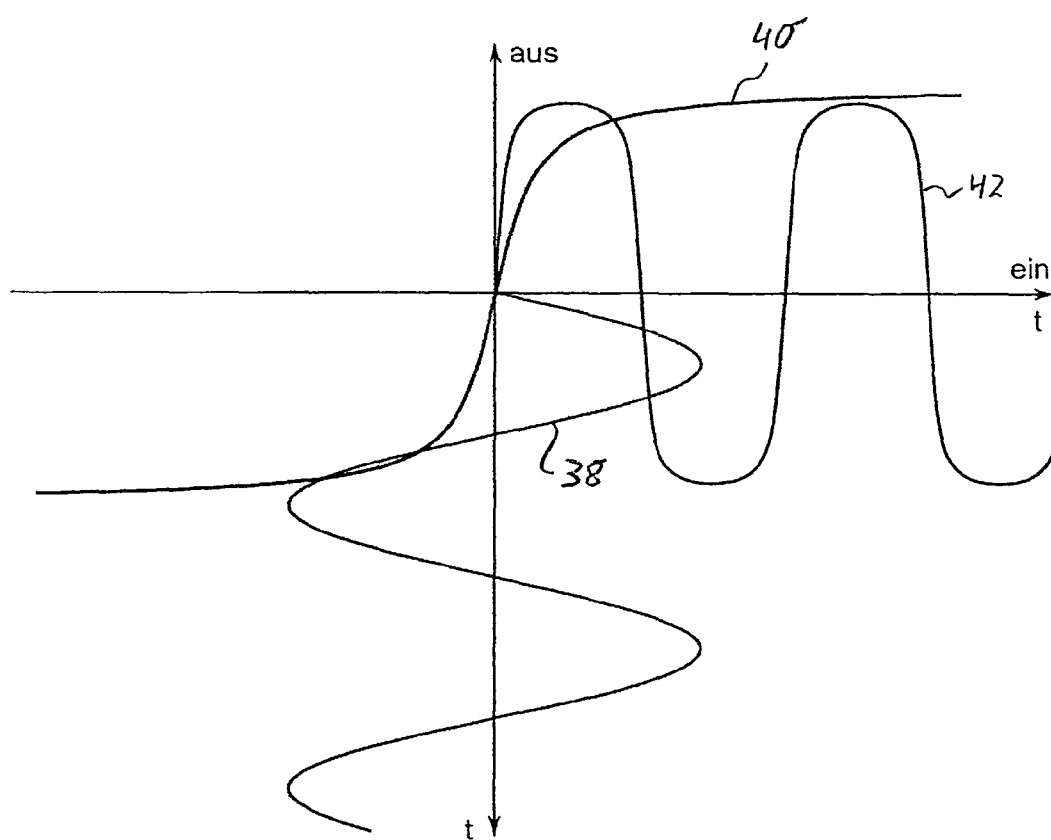


Fig. 5

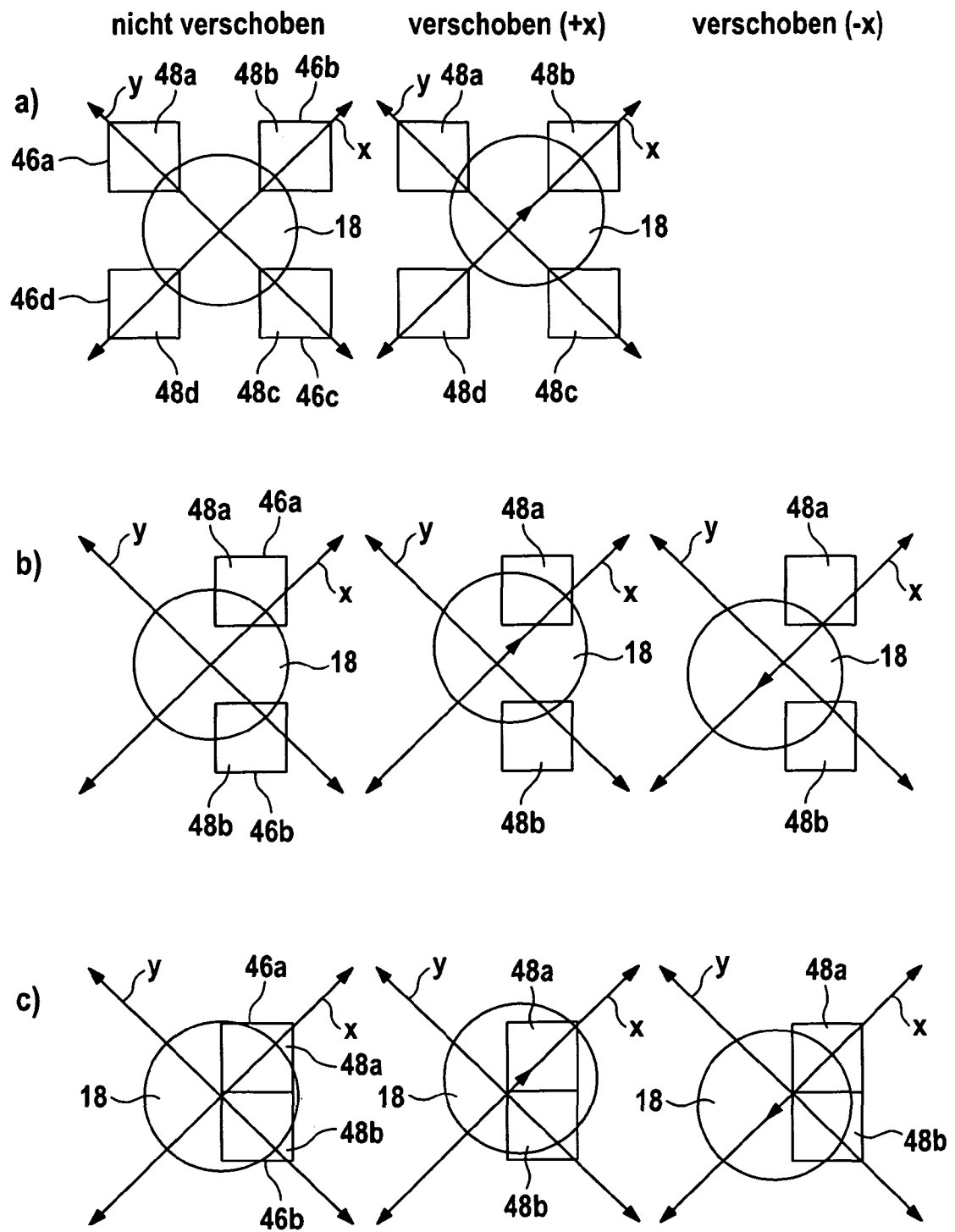


Fig. 6

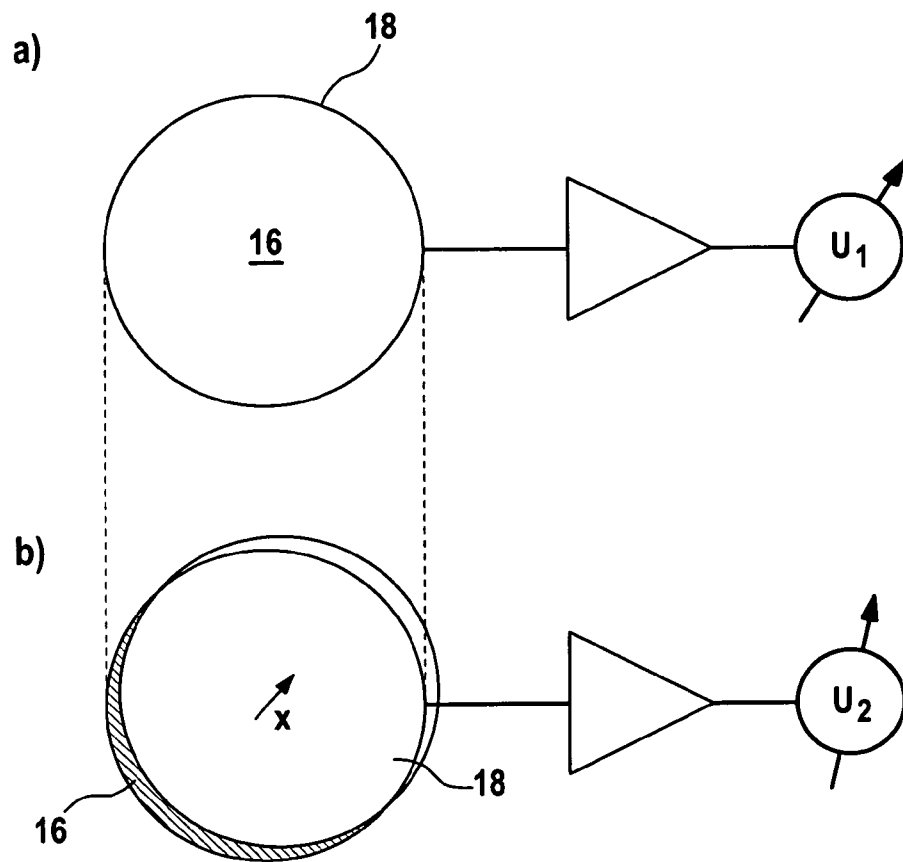


Fig. 7

Oszillator-Referenzsignal

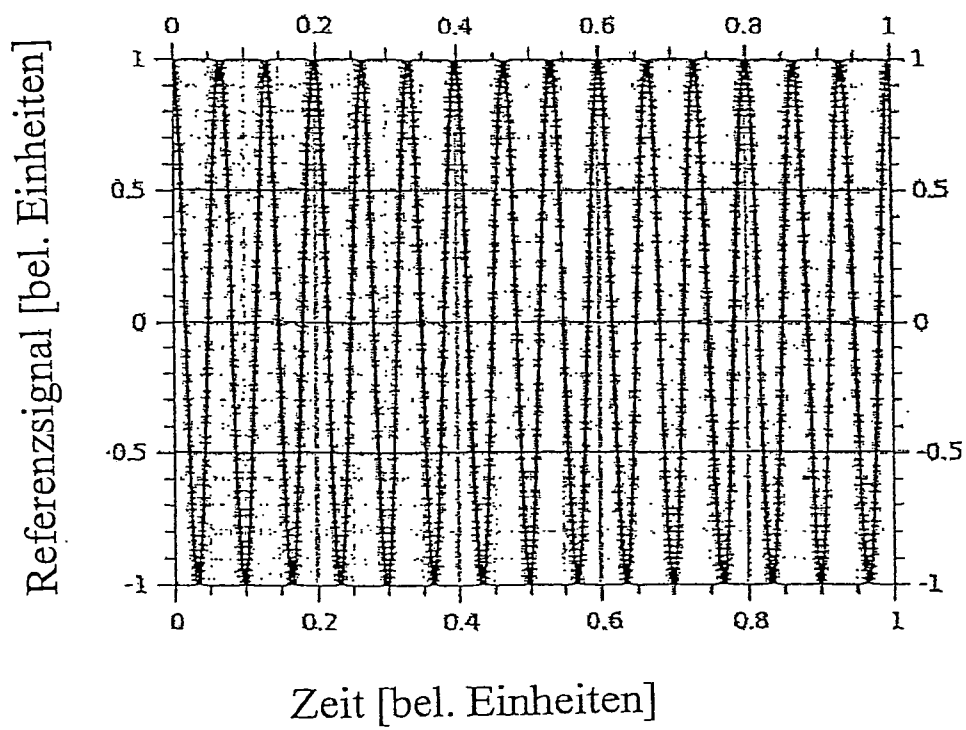


Fig. 8a

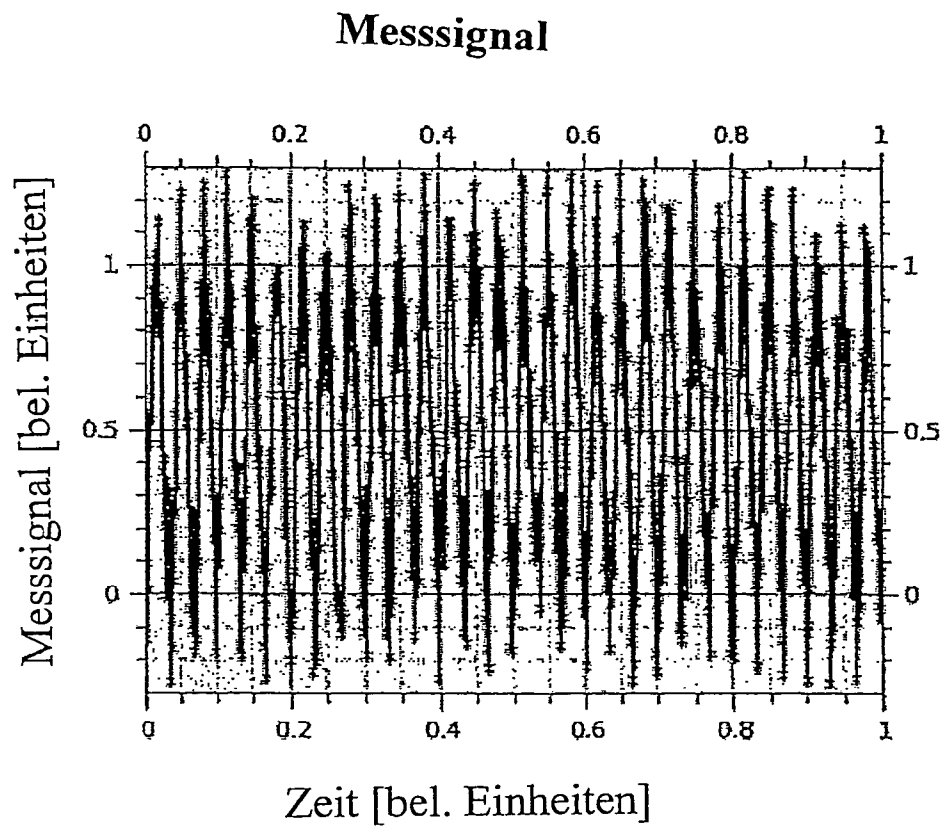


Fig. 8b

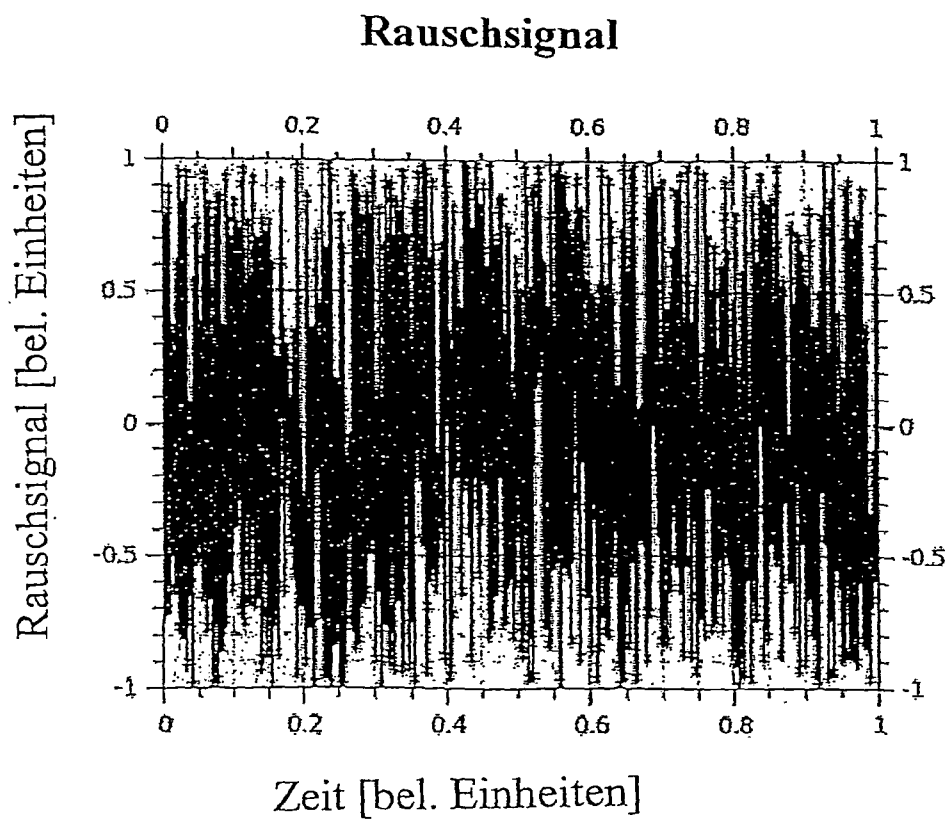


Fig. 8c

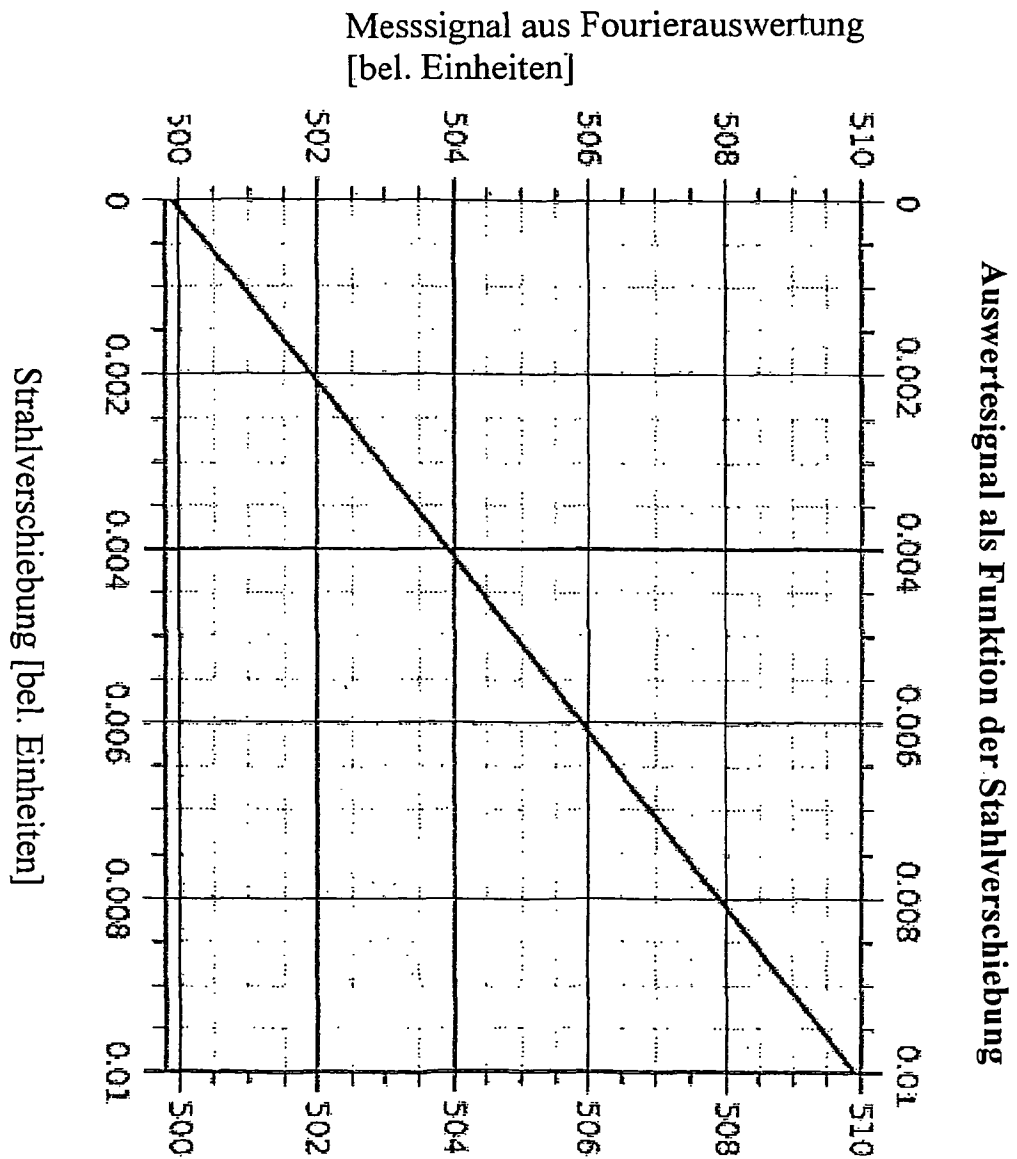


Fig.

9

Fig. 10a

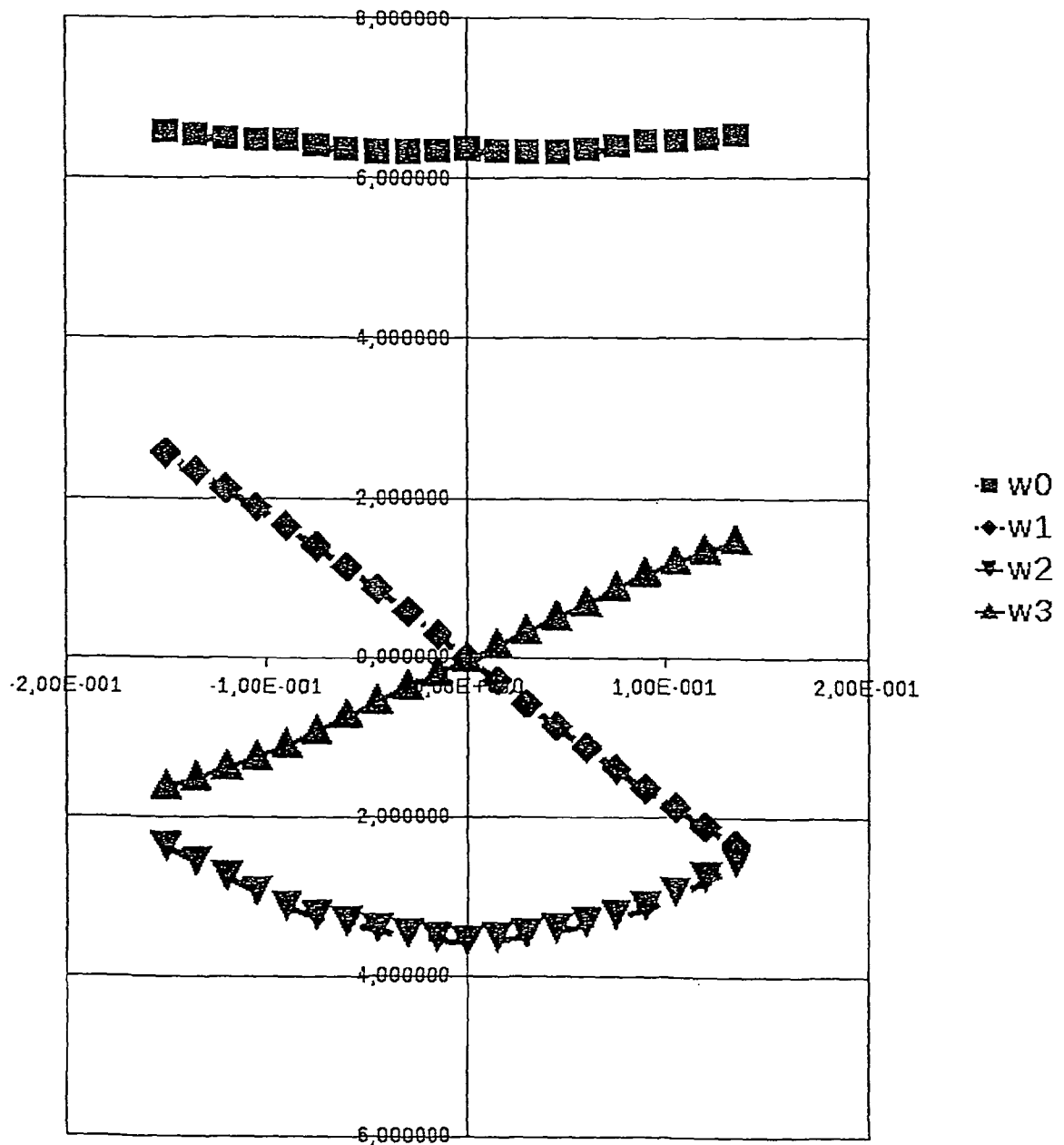
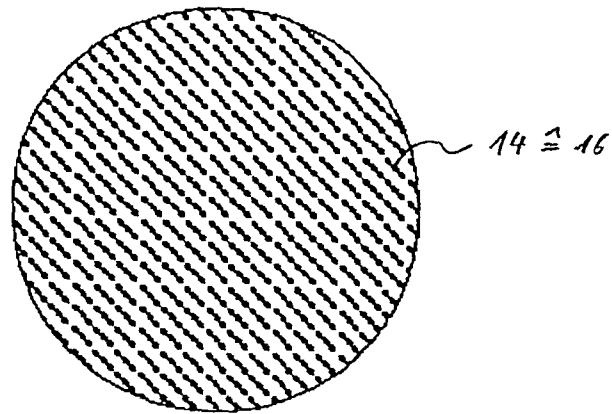


Fig. 10 b

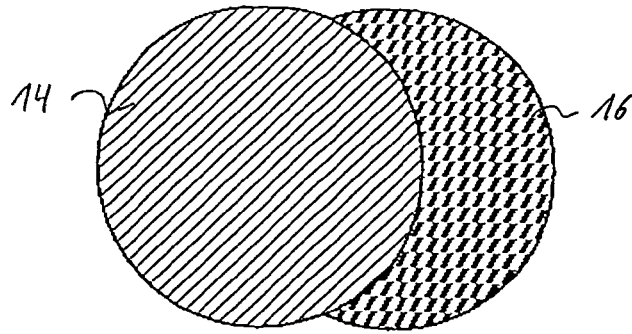


Fig. 11a

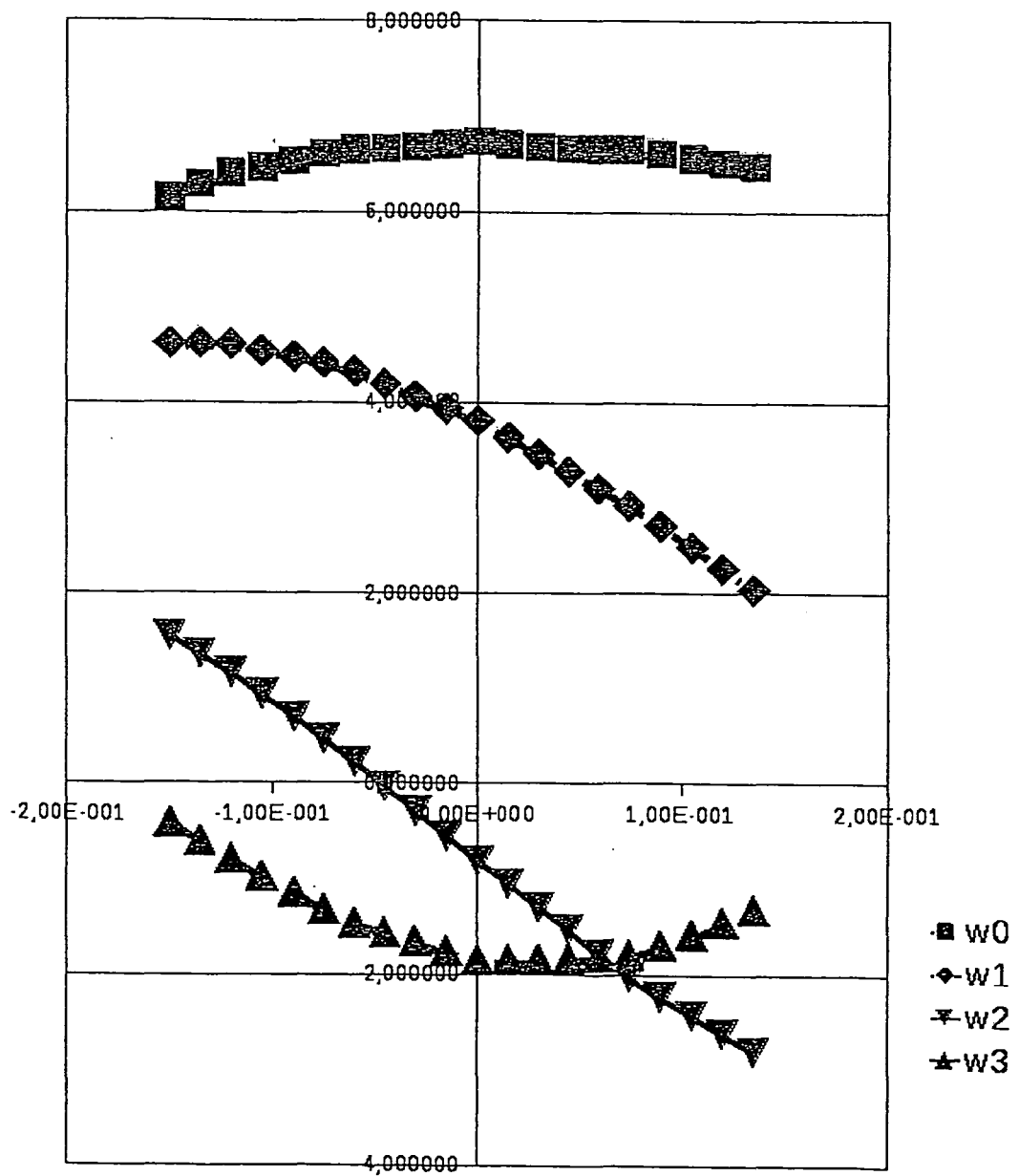


Fig. 11b

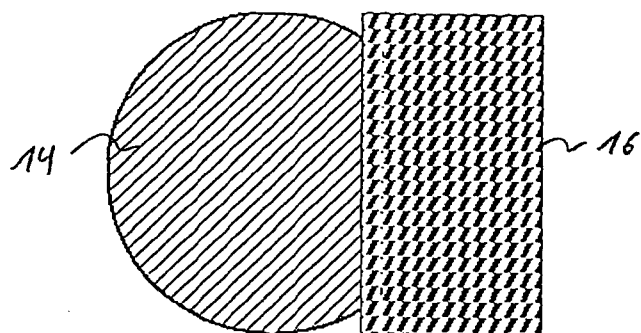


Fig. 12a

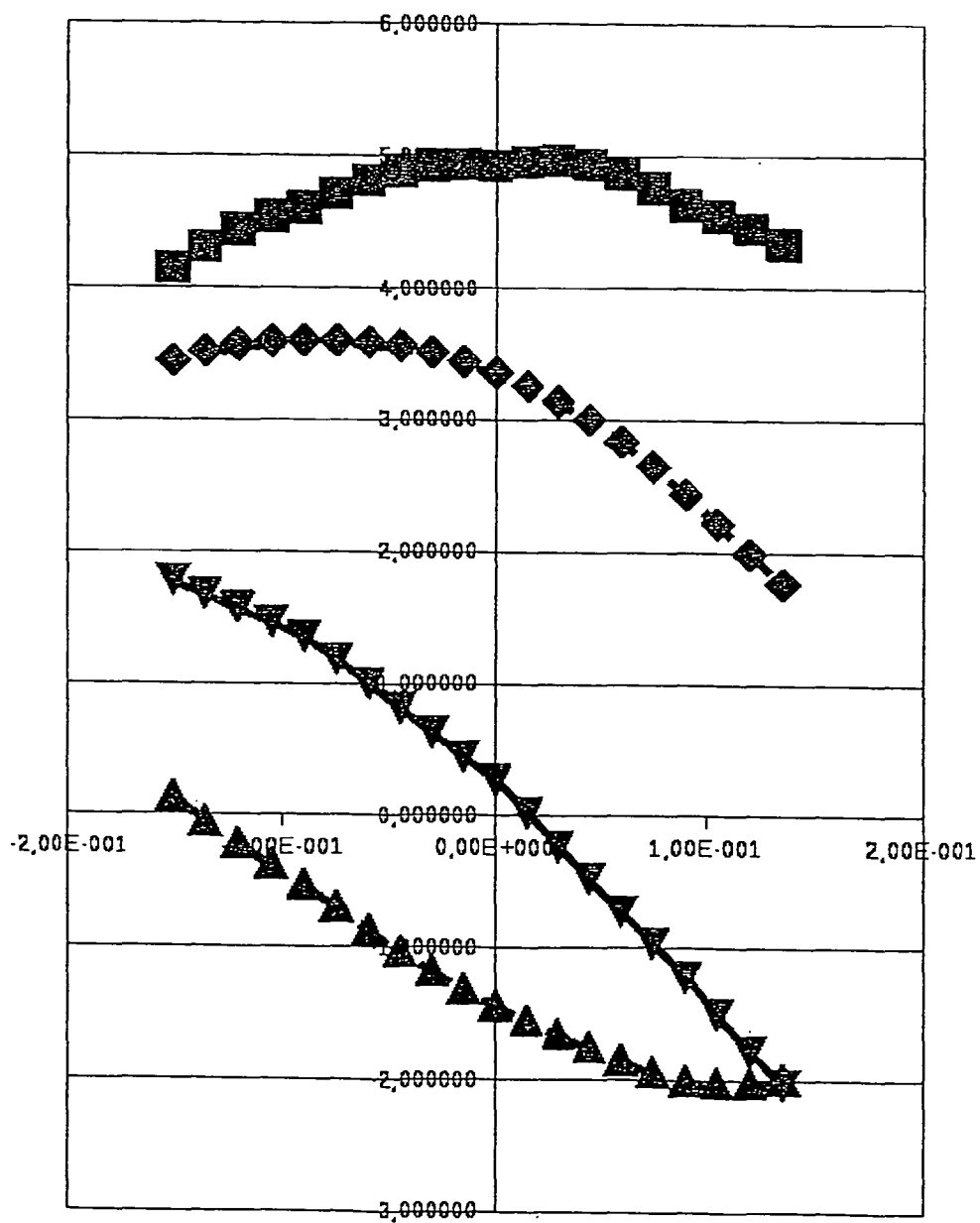


Fig. 12b

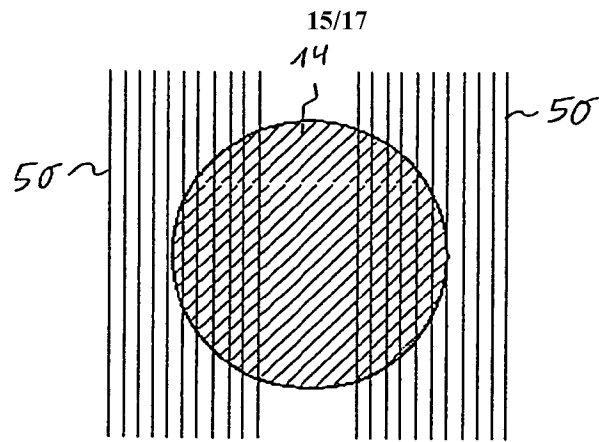


Fig. 13 a

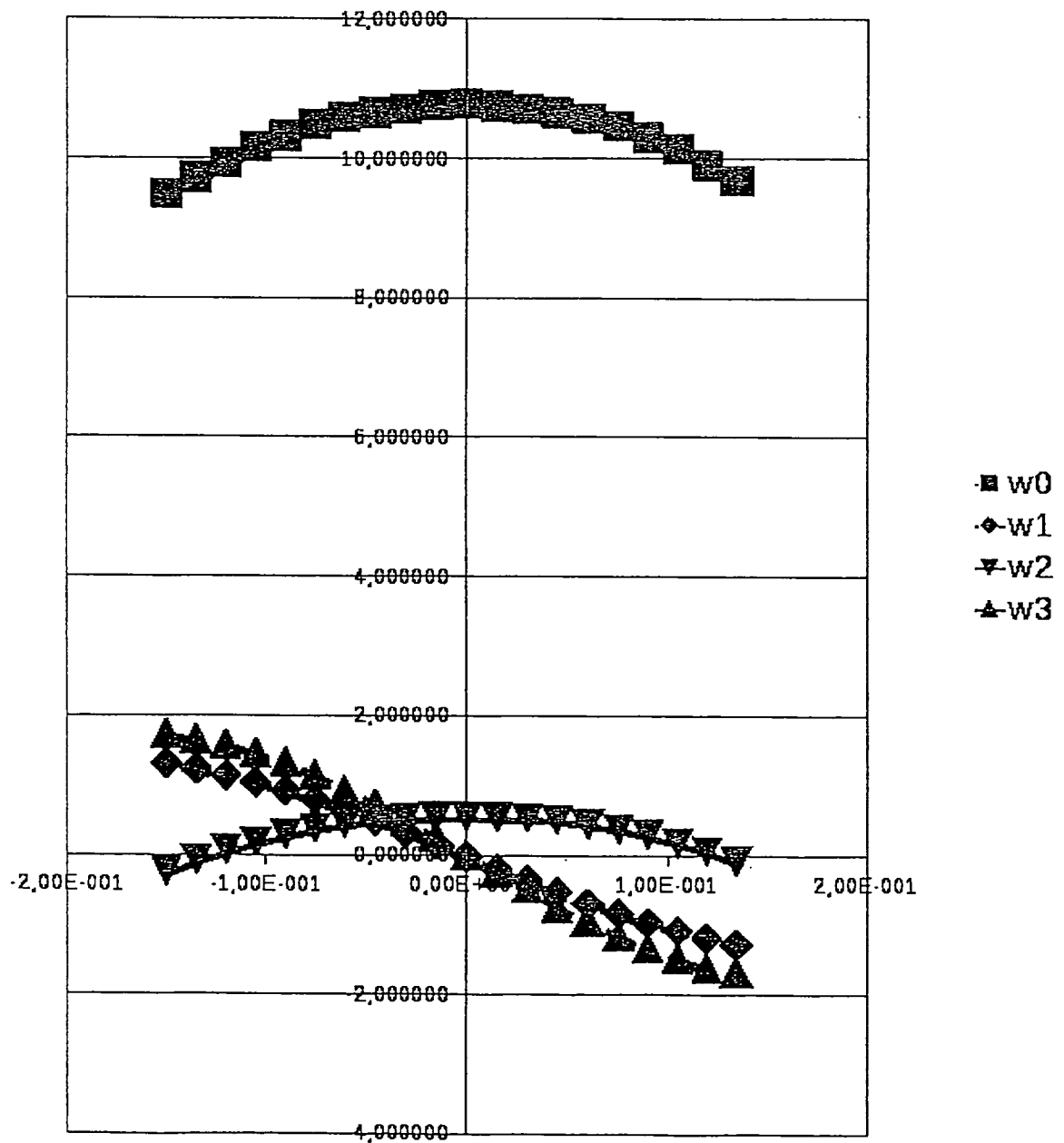


Fig. 13 b

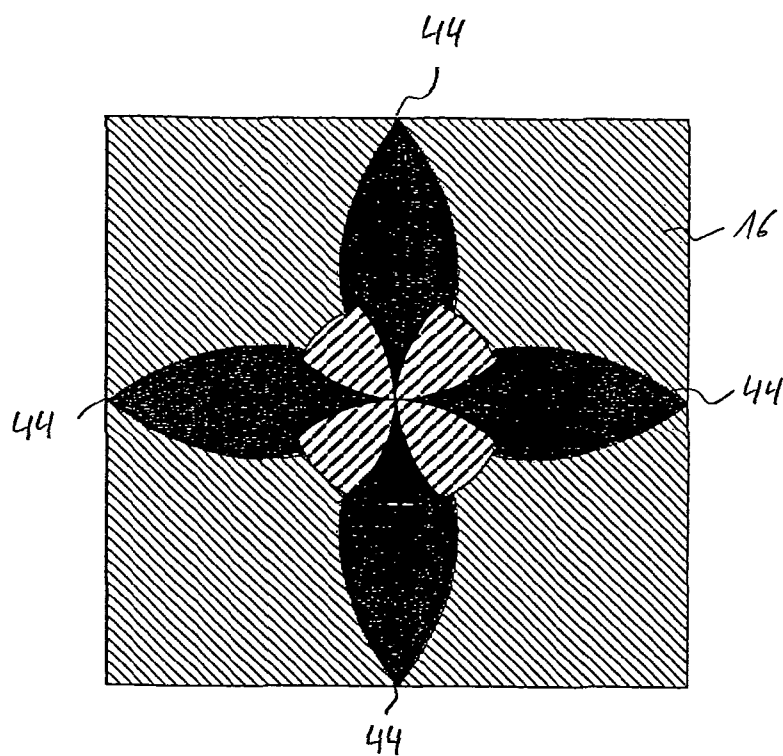


Fig. 14

