



CH 686 906 A5

19



SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
EIDGENÖSSISCHES INSTITUT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

11 CH 686 906 A5

51 Int. Cl.⁶: G 01 B 007/34
G 02 B 021/00

Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein
Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

12 PATENTSCHRIFT A5

21 Gesuchsnummer: 01332/95

22 Anmeldungsdatum: 05.05.1995

30 Priorität: 11.05.1994 GB A9409414.1

24 Patent erteilt: 31.07.1996

45 Patentschrift veröffentlicht: 31.07.1996

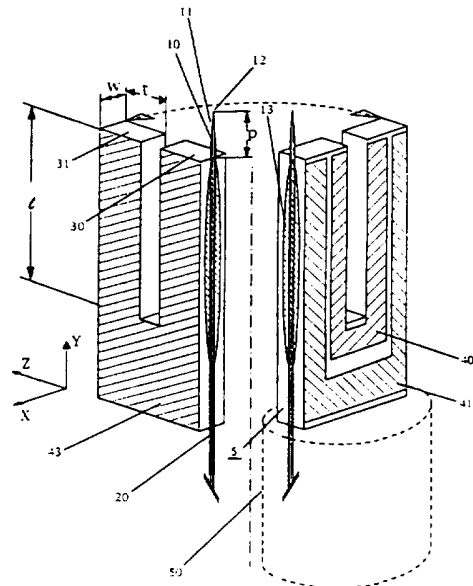
73 Inhaber:
Karrai-Haines GbR, Kobellstrasse 4,
D-80336 München (DE)

72 Erfinder:
Karrai, Khaled, Dr., München (DE)

74 Vertreter:
Elizabeth M. Holman, Alte Landstrasse 8,
5027 Herznach (CH)

54 Rastersondenmikroskop mit gekoppelter Oszillatoranordnung.

57 Ein Rastersondenmikroskop umfasst eine Spitze (10), die an einem, einen Oszillator (30) darstellenden, länglichen Teil piezoelektrischen Materials befestigt ist. Dieser Oszillator ist mit einem weiteren Oszillator (31) gekoppelt und bildet so eine gekoppelte Oszillatoranordnung. Die gekoppelte Oszillatoranordnung ist vorteilhaft eine piezoelektrische Stimmgabel aus Quarz. Während des Betriebs wird die Spitze (10) relativ zur Probe vibriert. Die Wechselwirkung zwischen Spitze (10) und Probe belastet das piezoelektrische Material (30, 31) und kann über auf dem piezoelektrischen Material angeordnete Kontakte (40, 41, 43) gemessen werden, die auf die durch Belastung induzierte piezoelektrische Ladung ansprechen. Die gekoppelte Oszillatoranordnung erlaubt die Realisierung von grossen Gütefaktoren von einigen Tausend oder mehr. Das Mikroskop ist durch die rein elektrische Signalkollektion einfach zu bedienen. Der Sondenkopf kann im Vakuum, bei tiefen Temperaturen oder in starken Magnetfeldern arbeiten.



CH 686 906 A5

Beschreibung

Die Erfindung bezieht sich auf ein Rastersondenmikroskop (SPM = Scanning Probe Microscope) gemäss dem Oberbegriff von Anspruch 1.

Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf Rastersondenmikroskope derart, dass die Spitze relativ zur Probe vibrierbar ist. Typischerweise wird entweder die Spitze oder die Probe mittels eines Treibermittels, das fachüblich als Dither oder auch als Wobbler bezeichnet wird, in eine periodische Bewegung versetzt. Die Kopplung zwischen Spitze und Probe wird durch dessen Wirkung auf die Vibrationen der Spitze gemessen.

Toledo-Crow et al offenbaren ein Rastersondenmikroskop der eingangs genannten Art in Applied Physics Letters, Band 60, Seiten 2957 bis 2959 (1992). Eine solche Vorrichtung ist in Fig. 1 gezeigt. Diese Vorrichtung umfasst einen Verschieber 117, auf welchem eine zu untersuchende Probe S montiert ist, eine optische Faser 20 mit Spitze 10, einen die Faserspitze vibrierenden Wobbelblock 50, Sammelloptik 116, Photonenvervielfacher 115, Computer 110, Lock-In-Verstärker 111 und Treiberschaltkreis 112. Um die Vibrationsamplitude der Spitze 10 zu messen, werden eine Laserquelle 100, ein Wollastonprisma 101, ein Strahlteiler 102, eine Objektivlinse 103, ein Polarisationsanalysator 104 und ein Lichtdetektor 105 verwendet. Eine solche Vorrichtung ist genau, schnell und empfindlich, ist aber kompliziert, nimmt wegen der Vielzahl von optischen Komponenten einen beträchtlichen Raum ein und benötigt auch eine Ausrichtung und Einstellung der optischen Komponenten, die aber durch mechanische Stösse gestört werden können. Eine weitere Vorrichtung der eingangs genannten Art, welche auch optische Mittel zum Messen der Vibration der Spitze benutzt, wird durch Betzig et al in Applied Physics Letters, Band 60, Seiten 2484 bis 2486 (1992) beschrieben.

Daher ist es eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Rastersondenmikroskop der eingangs genannten Art zu schaffen, wobei Vibrationsänderungen der Spitze durch Mittel gemessen werden, die keine optische oder mechanische Ausrichtung und Einstellung erfordern, wobei Veränderungen des Vibrationszustandes der Spitze schnell, genau und mit grosser Empfindlichkeit gemessen werden können, wobei der Sondenkopf kompakt und leicht ist, wobei der Sondenkopf robust ist, wobei das SPM in aggressiven und eingeschränkten Umgebungen betrieben werden kann, wobei das SPM kostengünstig im Vergleich zu bekannten SPM mit vergleichbarer Leistung ist.

Die vorstehenden Aufgaben werden erfindungsgemäss in einem Rastersondenmikroskop der eingangs genannten Art durch die charakterisierenden Merkmale vom Anspruch 1 gelöst.

Für SPM der eingangs genannten Art bildet die Spitze einen Oszillator. Der Güte- bzw. Q-Faktor dieses Oszillators ist wichtig für die Leistung des SPM und kann mit einer erfindungsgemässen gekoppelten Oszillatoranordnung dramatisch erhöht werden. Das Signal ist rein elektrisch und kann daher sehr einfach erfasst und verarbeitet werden.

Das Instrument ist sehr empfindlich. Das Signal reagiert sehr schnell auf Veränderungen der Vibrationsfrequenz, -amplitude und -phase der Spitze. Weil keine optischen Komponenten für das Abtastmittel und kein optischer Zugang zum Sondenkopf mehr erforderlich sind, ist der Sondenkopf sehr kompakt, wobei hier der Sondenkopf als Sammelbegriff für die Komponenten des SPM benutzt wird, die eine Baueinheit mit der Spitze bilden.

Der Sondenkopf des erfindungsgemässen SPM ist eine kleine robuste Komponente, die aggressiven Umgebungen, wie Extremen von Temperaturen, widerstehen kann. Im Falle eines NSOM ist zusätzlich eine optische Kopplung, typischerweise eine optische Faser vorhanden. Die elektrischen Leitungen, sowie fakultativ die optische Faser sind flexibel und verlustfrei. Folglich kann der Sondenkopf in einem Kryostaten einschliesslich eines Magnetenkryostaten, in einer Vakuumkammer oder in einer abgetrennten radioaktiven Umgebung installiert werden.

In einer ersten Konstruktion des Wobbelmittels in einem SPM der Erfindung ist das Wobbelmittel eine physikalisch getrennte, als Wobbelblock bezeichnete Komponente aus piezoelektrischem Material. Elektrische Leitungen werden mit dem piezoelektrischen Wobbelblock in Berührung gebracht, der gewobbelt, d.h. in eine oszillatorische Bewegung versetzt wird, indem ein das Wobbeln treibendes, elektrisches Eingangssignal wie z.B. eine Sinusspannung von einem herkömmlichen Signalerzeuger angelegt wird. In dieser Konstruktion des Wobbelmittels ist es erwünscht, dass der piezoelektrische Wobbelblock rein als Treiberelement wirkt und nicht empfindlich auf die Wechselwirkung zwischen Spitze und Probe reagiert. Folglich wird es in dieser Konstruktion des Wobbelmittels vorgezogen, dass das für das Wobbelmittel verwendete Material aus einem keramischen, amorphen, polykristallinen oder anderen gleichartigen Material besteht, das insbesondere über die im Betrieb benutzten Frequenzbereiche schlechte mechanische Oszillationseigenschaften aufweist. Dies stellt sicher, dass Oszillationen der mechanischen Teile der gekoppelten Oszillatoranordnung, z.B. Resonanzoszillationen der Stimmgabel, keine oder zumindest keine starke Oszillation des Wobbelblocks hervorrufen.

In einer zweiten Konstruktion des Wobbelmittels in einem SPM der Erfindung kann auf einen getrennten Wobbelblock verzichtet werden, indem das piezoelektrische Oszillatormaterial auch für die Erzeugung der Wobbelbewegung eingesetzt wird. In diesem Fall ist das Wobbelmittel zusammen mit mindestens dem ersten Teil piezoelektrischen Materials gebaut und umfasst mindestens einen elektrischen Kontakt, der auf mindestens dem ersten Teil piezoelektrischen Materials angeordnet ist. Um Wobbelbewegungen hervorzurufen, wird analog zur vorstehend beschriebenen ersten Konstruktion des Wobbelmittels ein elektrisches Signal angelegt. Dieses die Wobbelbewegung treibende, elektrische Eingangssignal verformt mindestens den ersten Teil piezoelektrischen Materials, um die erwünschte oszillatorische Bewegung der Spitze hervorzurufen. In Ausführungsformen dieser Art mit erstem und zwei-

tem Oszillatormittel aus piezoelektrischem Material, insbesondere Stimmgabel- und Doppelbimorphausführungsformen wird bevorzugt, dass das Wobbelmittel einen elektrischen Kontakt umfasst, der auf dem ersten Teil piezoelektrischen Materials, d.h. auf der ersten Zinke der Stimmgabel angeordnet ist, sowie einen weiteren elektrischen Kontakt, der auf dem zweiten Teil piezoelektrischen Materials, d.h. auf der zweiten Zinke der Stimmgabel angeordnet ist. Die symmetrische Wirkung des Wobbeltriebers wird dadurch sichergestellt.

In der ersten Konstruktion muss das Wobbelmittel nicht Teil des Sondenkopfes sein. Mit anderen Worten, da das Wobbelmittel nur relative Bewegung zwischen Spitze und Probe zu erzeugen hat, kann das Wobbelmittel so eingesetzt werden, dass die Probe anstatt der Spitze gewobbelt wird. Die zweite Konstruktion des Wobbelmittels mit integralen Wobbel- und Oszillatormittel ist dagegen nicht zum Probewobbeln geeignet.

Das erfindungsgemässe SPM ist besonders gut geeignet zur Benutzung als Nahfeldmikroskop (NSOM = Near Field Scanning Optical Microscope), Atomkraftmikroskop (AFM = Atomic Force Microscope), Reibungskraftmikroskop (FFM = Friction Force Microscope) oder als SPM, das fähig ist, in zwei oder mehr der vorstehenden SPM-Typen entweder gleichzeitig (parallel) oder nacheinander (seriell) verwendet zu werden. Besonders bevorzugte Kombinationen sind sowohl NSOM und FFM, als auch NSOM und AFM.

Die Erfindung wird nun beispielhaft anhand der Figuren näher beschrieben. Die Figuren zeigen:

Fig. 1 ein schematisches Blockdiagramm eines aus Toledo-Crow et al bekannten SPM mit optischem Abtastmittel;

Fig. 2 ein schematisches Blockdiagramm eines erfindungsgemässen SPM;

Fig. 3 eine schematische Detailansicht des Sondenkopfes des SPM gemäss einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung mit zwei Ansichten, wobei eine um 90 Grad in bezug zur anderen gedreht ist;

Fig. 4 schematisch und stark übertrieben, die Ladungsverteilung in einer piezoelektrischen Stimmgabel, wobei die strichpunktierten Linien die Ebenen mit Nulldehnung darstellen: Fig. 4A im Ruhezustand; Fig. 4B in einem Resonanzmodus oszillierend; und Fig. 4C ausserhalb der Resonanz;

Fig. 5 eine Stimmgabel, die geeignet zur Benutzung mit einem getrennten Wobbelblock ist, mit einem Paar eingefädelter Kontakte für das Abtastsignal (aber keinem Erdkontakt), wobei die weissen Bereiche freiliegendes Quarz und die zwei grauen Schattierungen die zwei eingefädelten Kontakte anzeigen;

Fig. 6 eine Stimmgabel mit integriertem Wobbelmittel.

Fig. 7 verschiedene Eigenschaften eines SPM mit einer Stimmgabel gemäss Fig. 5 und einer daran befestigten optischen Faser gemäss Fig. 3; Fig. 7A Abtastsignal als eine Funktion der Wobbelfrequenz beim Fehlen der Wechselwirkung zwischen Spitze und Probe; Fig. 7B Abtastsignal als

eine Funktion der Wobbelfrequenz für verschiedene Pegel der Spitze-Probe Reibungskraft; Fig. 7C Abtastsignal als eine Funktion der Wobbelfrequenz, wobei der Effekt des Festklebens der Spitze an der Stimmgabel auf die Oszillatoreigenschaften der Stimmgabel gezeigt wird.

Fig. 2 zeigt einen SPM-Aufbau nach einer Ausführungsform der Erfindung. Gezeigt wird ein Verschiebertisch 117, auf welchem eine zu untersuchende Probe S montiert ist, eine optische Faser 20 mit Spitze 10, ein die Faserspitze vibrierender Wobbelblock 50, Sammelloptik 116, Photonenvervielfacher 115, Computer 110, Lock-In-Verstärker 111 und Treiberschaltkreis 112. Erfindungsgemäss wird eine Stimmgabel 5 in der Nähe der Faserspitze 10 angeordnet, die im folgenden mit Verweis auf Fig. 3 näher beschrieben wird.

Fig. 3 zeigt den Sondenkopf gemäss einer ersten Ausführungsform der Erfindung. Eine Kristallquartzstimmgabel 5 ist mit einer optischen Faser 20 verbunden. Die Stimmgabel 5 ist an einem zylindrisch geformten Wobbelblock 50 aus keramischem piezoelektrischem Material angebracht, wie durch die gebrochenen Linien gezeigt ist. Die Stimmgabel 5 ist ein gekoppelter Oszillator mit einem ersten, durch die Zinke 30 ausgebildeten Oszillator, und einem zweiten, durch die Zinke 31 ausgebildeten Oszillator. Der Endabschnitt der optischen Faser 20 bildet die Spitze 10 aus. Die Spitze 10 ragt über das Ende der Stimmgabel um eine Länge «p» hinaus, die vorzugsweise mit einem Wert zwischen 0,5 bis 1,0 mm gewählt wird. Die Spitze 10 ist vorzugsweise sich verjüngend ausgebildet und weist ein verengtes Ende auf. Die Verjüngung kann z.B. durch ein übliches optisches Faserzugverfahren ausgebildet werden. Die Spitze weist vorzugsweise eine reflektive Aluminium-Beschichtung 11 auf. Das Aluminium kann z.B. durch ein übliches Bedampfungsverfahren aufgebracht werden. Das Ende des Spitzenabschnitts bildet eine optisch durchlässige Öffnung 12, durch die zwecks nahfeldoptischer Mikroskopie die Photonen gelangen können. Die optische Faser 20 ist mit Verbindungsmittel 13, z.B. Klebstoff oder Lack, entlang der Länge einer Seite der Stimmgabel geklebt.

Die Stimmgabel 5 besitzt ein Abtastkontaktpaar 40, 41. In der Fig. 3 sind beide Abtastkontakte 40, 41 auf derselben, in der rechten Ansicht ersichtlichen Seitenfläche der Stimmgabel angeordnet, während ein Masse- bzw. Erdkontakt 43 auf der in der linken Ansicht ersichtlichen rückseitigen Fläche der Stimmgabel angeordnet ist. Fig. 5 zeigt eine alternative Anordnung für die Kontakte, die auch für einen Sondenkopf mit einem getrennten Wobbelblock 50 gemäss Fig. 3 geeignet ist. In dieser Anordnung verlaufen die Abtastkontakte 40, 41 auf beiden Seitenflächen der Stimmgabel durch eine etwas aufwendige geometrische Anordnung. Die ungeschattierten, weissen Bereiche stellen freiliegendes Quarz dar, und die zwei verschiedenen schraffierten Bereiche stellen die zwei eingefädelten Kontakte 40 bzw. 41 dar. Kein Erdkontakt 43 ist vorgesehen. Diese aus der Elektronikindustrie bekannte Kontaktanordnung ist besonders wirksam bei der Umwand-

lung von deformationsinduzierter piezoelektrischer Ladung in ein Abtastsignal.

Eine weitere Anordnung ist in der Fig. 6 gezeigt. Zwei Kontaktpaare, nämlich ein erstes Abtastkontaktpaar 40, 41, das in Verbindung mit Aufnahmeelektronik 47 steht, und ein zweites zusätzliches Kontaktpaar 44, 45, das in Verbindung mit Oszillator 48 steht, sind vorgesehen. Wie nachstehend beschrieben ist, stellt das Kontaktpaar 44, 45 das Wobbelmittel dar, wobei Potentialunterschiede zwischen den Kontakten 44 und 45 angelegt werden, um die Verformung der Stimmgabelzinken hervorzurufen.

Die Abtastkontakte sind an der Basis der Zinken jeweils an den inneren und äusseren Seiten angeordnet, da diese die Ebenen maximaler Dehnung während der Vibration sind und folglich das grösste Abtastsignal liefern. Anders gesagt, führt die Stimmgabel eine duale Funktion im Wobbeln und Erfassen aus. Der offensichtliche Vorteil dieser Konstruktion ist, dass auf einen getrennten Wobbelblock gemäss Fig. 3 verzichtet werden kann, was wiederum ein noch kompakteres und einfacheres SPM zur Folge hat. Bei dieser Konstruktion ist es wünschenswert, den die Wobbelbewegung treibenden Schaltkreis und den Abtastschaltkreis physikalisch möglichst weit auseinander zu halten, um eine kapazitive Kopplung zwischen den beiden zu vermeiden. Die Kopplung zwischen den Schaltkreisen sollte nämlich im Idealfall ausschliesslich piezoelektrisch sein.

Die Konstruktion der Stimmgabel 5 selbst ist auch massgebend für die Leistung eines erfindungsgemässen SPM und wird nun genauer erklärt. Sowohl die Abmessungen als auch die Materialeigenschaften sind wichtig. Eine ideale Stimmgabel für SPM Anwendungen hätte eine hohe Resonanzfrequenz, um schnelles Rastern von Proben zu erlauben, eine niedrige Zinkensteifigkeit d.h. Federkonstante und würde eine grosse piezoelektrische Reaktion auf eine kleine Deformation hervorrufen.

Die für die Konstruktion einer Stimmgabel für solche Anwendungen wichtigen Parameter sind die Abmessungen der Zinken 30, 31, nämlich deren Länge «l», Breite «w» und Dicke «t», und die Eigenschaften des benutzten Materials, nämlich das Elastizitätsmodul «E», die Dichte ρ , der piezoelektrische Spannungstensor d_{ij} und die Kristallachsen, entlang derer die Stimmgabel ausgebildet ist. Bei der Anwendung von Quarz stellen die in den Figuren gezeigten Richtungen X und Y die «a» und «c» Achsen der hexagonalen Gitterbasis von Quarz dar (unter Benutzung üblicher Schreibweise).

Ein zweckmässiger Anfangspunkt zur Bestimmung der Abmessungen der Stimmgabel ist die Auswahl eines gewünschten Wertes für die Frequenz «f». Typischerweise ist eine Frequenz von 10 bis 100 kHz ein guter Kompromiss zwischen Auflösung und Rastergeschwindigkeit. Diese Auswahl ist jedoch extrem anwendungsbedingt.

Eine gewünschte Steifigkeit « k_{eff} » bei Resonanz sollte für die Zinken gewählt werden. Ein Wert für « k_{eff} » in der Grössenordnung von 1 Newton pro Meter oder weniger ist im Allgemeinen wünschenswert. Dieser Wert wird gewählt, da die typische ef-

fektive Federkonstante für ein in einem Festkörper gebundenes Atom in der Grössenordnung von 10 Newton pro Meter liegt und, zumindest bei Abbildungsanwendungen will man vermeiden, dass die Spitze Atombindungen im Festkörper bricht.

Unter Benutzung der Theorie der elastischen Deformation von Materialien habe ich die folgenden Formeln abgeleitet:

$$l = \frac{1}{2\pi f} \left(4 \frac{k}{wE} \right)^{1/3} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

$$t = \frac{1}{2\pi f} \left(4 \frac{k}{wE} \right)^{2/3} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

wobei «k» die statische Steifigkeit und durch die Gleichung $k_{\text{eff}} = k/Q$ mit dem vorher genannten « k_{eff} » verwandt ist, wobei «Q» der Q-Faktor oder die Schärfe der Resonanz ist, was durch das Verhältnis $f/\Delta f$ der Resonanzfrequenz «f» und seiner Breite « Δf » definiert ist. Aus der vorstehenden Formel wird klar, dass die Länge «l» durch die Materialparameter E und ρ und die gewünschten Raster-eigenschaften f und k fixiert ist.

Das durch die Deformation der Stimmgabel induzierte elektrische Feld ist auch ein wichtiger Parameter und wird jetzt diskutiert. Ich habe den folgenden Ausdruck für das lokale elektrische Feld «F» hergeleitet, das an jedem Punkt (y, z) in der durch die Kontaktelektroden 40, 41 definierten Ebene (Y, Z) den Wert « δF » aufweist:

$$\delta F(y, z) = \frac{3}{\epsilon_0 \epsilon_s} d_{11} E \frac{(1-y)z}{l^3} \delta t$$

wobei « d_{11} » die longitudinale piezoelektrische Konstante des Kristalls, « ϵ_0 » die dielektrische Konstante im Vakuum und « ϵ_s » die statische relative dielektrische Konstante des piezoelektrischen Materials ist. Ich habe dabei angenommen, dass der piezoelektrische Kristall eine trigonale oder hexagonale Symmetrie aufweist. Entsprechende Ausdrücke können aber auf analoge Weise für andere Kristallklassen hergeleitet werden.

Nun kann die Abtastsignalspannung durch das über die Breite «w» abfallende Potential approximiert werden, das durch das elektrische Feld, welches unter der Gesamtfläche jeder Kontaktelektrode gemittelt wird, verursacht wird. Sie ist gegeben durch:

$$\delta V = \frac{1,5}{\epsilon_0 \epsilon_s} d_{11} E \frac{wt}{l^2} \delta t$$

Aus der vorstehenden Formel wird ersichtlich, dass die Breite «w» der Stimmgabel in einem gewissen Rahmen frei gewählt werden kann. In den bisher beschriebenen Ausführungsformen wurde «w» so gewählt, dass eine typische wobbleinduzierte Verschiebung von 0,1 nm eine induzierte Spannung der Grösse von Mikrovolt zur Folge hat. Mit einer Spannung dieser Grösse kann das Abtastsignal einwandfrei mit üblichen Instrumenten gemessen werden. Die Grösse der Spannung bedeutet auch, dass typische Interferenzquellen keine Schwierigkeiten bereiten.

Es werden im folgenden zwei Beispiele für Stimmgabel umfassende, für NSOM/FFM/AFM Anwendungen geeignete Sondenköpfe näher beschrieben.

Beispiel 1

Eine Quarzplatte wird mit einer Dicke von 100 μm und einer Orientierung von (XYt)-5° gewählt, wobei diese Bezeichnung der IEEE Norm für Piezoelektrizität ANSI/IEEE Norm 176 (1987) entspricht. Eine solche Orientierung ergibt eine hohe Signalempfindlichkeit. Eine Stimmgabelform wird aus dieser Quarzplatte mit den Abmessungen: $w = 100 \mu\text{m}$, $t = 300 \mu\text{m}$ und $l = 2,75 \text{ mm}$ herausgeschnitten. Die Materialparameter betragen $E = 6 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, $\rho = 2650 \text{ kg/m}^3$ und $d_{11} = 2,31 \times 10^{-12} \text{ Coulomb pro Newton}$. Die resultierende Gabel besitzt eine Frequenz, $f = 30 \text{ 000 Hz}$ und $k_{\text{eff}} = 1 \text{ N/m}$. Nach Herstellung des Sondenkopfes, d.h. nach Klebung der optischen Faser an die Stimmgabel, wurde eine Schärfe von $Q = 2000$ erhalten.

Es ist die optische Faser 20, die in erster Linie die Verringerung des Q-Faktors des Sondenkopfes von dem Wert der einfachen Stimmgabel verursacht. Folglich nähert sich für AFM Anwendungen, in denen keine optische Faser nötig ist, der Q-Faktor des Sondenkopfes dem der freien Stimmgabel und kann einen Wert von $Q = 10 \text{ 000}$ oder mehr in der Luft aufweisen. Die Empfindlichkeit der Stimmgabel kann durch die an den Kontakten durch eine Inkrementaldehymung am Ende des Zinkens der Stimmgabel induzierte Spannung spezifiziert werden. Die beispielhafte Stimmgabel besitzt einen Wert von $\delta V/\delta t = 93 \text{ Millivolt pro nm}$. Eine typische, durch die Wobbelmittel erzeugte Deformationsgrösse an den Zinkenenden beträgt 5 pm. Dies entspricht einer induzierten piezoelektrischen Spannung an den Kontakten 40, 41 von ca. 10 Mikrovolt. Hierbei wurde angenommen, dass die Spannung als das Abtastsignal benutzt wird. Es können aber andere Abtastsignale, beispielsweise die Impedanz, verwendet werden.

Zum besseren Verständnis des Abtastsignals wird auf die Fig. 4 verwiesen. Die Fig. 4 zeigt auf stark übertriebene Art die piezoelektrisch induzierte Ladungsverteilung über die Zinken einer Stimmgabel bei verschiedenen Deformationen. Fig. 4A zeigt die Verteilung für Nullbiegung, d.h. im Ruhezustand. Fig. 4B zeigt die Situation für eine gleiche und entgegengesetzte Biegung der zwei Zinken der Stimmgabel, wie sie auftritt, wenn die Stimmgabel mit ihrer primären Resonanzfrequenz getrieben d.h.

gewobbelt wird. Fig. 4C zeigt die Situation, wenn sich die zwei Zinken zusammen biegen. Wenn z.B. die Kontaktanordnung der Fig. 3 benutzt wird, trägt das Abtastsignal fast Null für gleiche und entgegengesetzte Biegung (Fig. 4B), da sich die Beiträge von den zwei Kontakten aufheben. Das Abtastsignal steigt dann als Reaktion auf nichtspiegelsymmetrische Verformung der Zinken 30, 31 an. Eine solche nichtspiegelsymmetrische Verformung wird durch die Wechselwirkung zwischen Probe und Spitze erzeugt, da die Wechselwirkung überwiegend denjenigen Zinken dämpft, an welchem die Spitze angebracht ist. Mit einer solchen Kontaktanordnung ist das Signal daher ein Mass der differentiellen Biegung der zwei Zinken, wobei das maximale Signal bei exakt gleicher Biegung der Zinken auftritt, wie in Fig. 4C gezeigt ist. Es ist dieser Mechanismus, der für die Kopplung der mechanischen Oszillationen der zwei Zinken verantwortlich ist, was wiederum der Grund für die grossen Q-Faktoren ist. Das Abtastsignal wird typischerweise dazu benutzt, die Wechselwirkung zwischen Spitze und Probe beim Rastern auf einem konstanten Niveau zu halten, indem es geeigneter Reglungssoftware bzw. -hardware zugeleitet wird.

Beispiel 2

Quarzstimmgabeln werden für die Elektronikindustrie massenproduziert. Quarzstimmgabeln mit einer Hauptoszillationsfrequenz $f = 215 = 327 \text{ 68 Hertz}$ sind leicht erhältlich. Eine solche Stimmgabel wurde zum Bau eines erfindungsgemässen SPM verwendet. Die Stimmgabel hat die Abmessungen: $l = 3,9 \text{ mm}$, $t = 600 \mu\text{m}$ und $w = 400 \mu\text{m}$. Im fertigen SPM hatte der Sondenkopf einen Gütefaktor von $Q = 3000$. Dies hat einen zweckmässigen Wert für die Steifigkeit von $k_{\text{eff}} = 7 \text{ N/m}$ zur Folge.

Fig. 7 zeigt das Signal als eine Funktion der Wobbelfrequenz für eine Ausführungsform, in der ein Sondenkopf mit einer Stimmgabel gemäss Fig. 5 benutzt wird. Die Stimmgabel ist an einem wie im Zusammenhang mit Fig. 3 beschriebenen keramischen Wobbelblock 50 befestigt. Eine optische Faser 20 ist an der Stimmgabel auf die in z.B. Fig. 3 gezeigte Art befestigt. Das gemessene Signal ist die Amplitude der Wechsellspannung, die von den Kontakten 40, 41 abgetastet oder aufgenommen wurde, wobei dieses Signal durch die Biegung der Stimmgabelzinken gemäss Fig. 4 induziert ist.

In Fig. 7A wird das Abtastsignal gemessen, während die Wobbelfrequenz verändert wird. Die Messung wurde in der Luft durchgeführt, wobei sich die Spitze fern jeglicher Probe befand, d.h. beim Fehlen der Wechselwirkung zwischen Spitze und Probe. In der Fig. stellen die Punkte gemessene Daten dar, während die Linien aus einem angetriebenen harmonischen Oszillatormodell errechnet und gefittet wurden. Die Resonanzfrequenz wurde als 33 683 Hertz und der Q-Faktor als 1410 gemessen. Die Frequenzauflösung beträgt 1,94 Hertz. Ein Maximalsignal von ca. 7,5 Mikrovolt wurde gemessen. Bei meinen Untersuchungen hat sich herausgestellt, dass die freie Länge «p» des Vorstehens der Spit-

ze vorteilhaft so zu wählen ist, dass die Resonanzfrequenz dieses freien Endes höher als die der Stimmgabel ist. Dies stellt sicher, dass Spitze-Probe Wechselwirkungskräfte wirksam zum relevanten Zinken der Stimmgabel übertragen werden. Diese Anforderung wird dadurch erreicht, indem die Länge «p» genügend kurz gemacht wird. Zum Beispiel wird ein «p» von weniger als 1 mm für eine optische Faser mit einem Durchmesser von 100 μm vorgezogen.

Fig. 7B zeigt die Wirkung der Wechselwirkung zwischen Spitze und Probe auf die Sondenkopfreaktion. Der höchste, schärfste Spitzenwert entspricht der in Fig. 7A gezeigten Situation, wenn nämlich keine Wechselwirkung zwischen Probe und Spitze vorhanden ist. Die Reaktion wird dann mit progressiv zunehmender Wechselwirkung gemessen. In der Fig. von rechts nach links wurde die Spitze-Probe Reibungskraft oder «Reibung» bei 0, 0,6, 1,2 und 3 Nanonewton gemessen, wodurch die Oszillationen zunehmend stark gedämpft werden. Die Punkte stellen gemessene Daten dar, während die Linien aus einem angetriebenen harmonischen Oszillatormodell errechnet und gefittet wurden. Die Frequenzauflösung beträgt 1,94 Hertz. Hieraus wird ersichtlich, dass das Signal, gemessen bei der Maximalfrequenz für keine Wechselwirkung, die in der Fig. 7B ca. 31 700 Hz beträgt, empfindlich auf die Wechselwirkung zwischen Spitze und Probe reagiert. Zusätzlich wird die durch die Reibungskraft verursachte Frequenzverschiebung der Reaktionspitze von einer Abnahme des Q-Faktors begleitet, so dass das Signal, gemessen bei der Maximalfrequenz für keine Wechselwirkung, über einen weiten Bereich der Spitze-Probe Reibungskraft messbar bleibt. Folglich ist für ein erfindungsgemässes SPM ein einfaches Wobbeltreibersignal mit konstant gehaltenen Frequenz in vielen Fällen völlig ausreichend, d.h. in den meisten Fällen ist es nicht notwendig, die Abhängigkeit der Resonanzfrequenz auf die Stärke der Wechselwirkung zu berücksichtigen. Im typischen Betrieb wird das Signal dazu benutzt, einen konstanten Abstand zwischen Spitze und Probe zu wahren. Regelungsabstände im Bereich von 0 bis 200 nm sind üblich.

Fig. 7C zeigt die Wirkung, die das Kleben der optischen Faser an die Stimmgabel auf die Oszillatoreigenschaften hat. Der rechte Scheitel zeigt die Stimmgabelreaktion vor dem Kleben der Faser an die Stimmgabel. Das Messsystem war nicht genau genug, den Q-Faktor oder den wahren Maximalsignalwert zu messen, da die Resonanz zu spitz ist. Jedoch konnte festgestellt werden, dass der Q-Faktor mindestens 5000 beträgt, wobei dies wahrscheinlich eine beträchtliche Unterschätzung darstellt. Der linke Scheitel zeigt eine gleichartige Reaktion nach dem Kleben der Faser an die gleiche Stimmgabel, d.h. in einem zusammengesetzten Sondenkopf. Der Q-Faktor ist auf einen Wert von 3560 gefallen. Die Frequenzauflösung beträgt 1,94 Hertz.

Die übliche Weise zur Regulierung des Abstands zwischen Probe und Spitze in SPM ist die Benutzung der Signalamplitude in einer Rückkopplungsschleife mit einem, den Spitze-Probe-Abstand steu-

ernden piezoelektrischen Verschieber. Eine solche Betriebsart ist auch für ein erfindungsgemässes SPM geeignet. Jedoch habe ich eine andere Weise zur Regulierung des Abstands zwischen Probe und Spitze entwickelt, die ich als neu erachte und die ich nun näher im Zusammenhang mit einer Kontaktanordnung gemäss Fig. 3 beschreibe. Der Sondenkopf wird durch das Anlegen einer Wechselspannung der passenden Frequenz über die Kontakte 44, 45 zur Resonanz getrieben. Die Reaktion einer Stimmgabel kann als das elektrische Äquivalent einer Kapazität betrachtet werden, die seriell mit einer Kapazität, einer Induktanz und einem Widerstand geschaltet ist. Zusätzlich erreicht diese Impedanz ein Maximum bei der Resonanzfrequenz der Stimmgabel. Da sich die Wechselwirkung zwischen Spitze und Probe auf die Deformation der Stimmgabel auswirkt und gemäss beispielsweise Fig. 7B das Verstimmen induziert, reagiert die Messung der Impedanz der Stimmgabel empfindlich auf die Wechselwirkung zwischen Spitze und Probe. Somit ist es möglich, die Impedanz zum Regulieren des Abstands zwischen Probe und Spitze zu benutzen. Der Abstand zwischen Probe und Spitze kann beispielsweise an einem Wert gehalten, dem einen bestimmten Impedanzwert entspricht.

Ein SPM mit einer Kontaktanordnung gemäss Fig. 6 kann durch das Anlegen an die Kontakte 44, 45 eines das Wobbeln treibenden, aus einem nicht gezeigten, externen Treiberschaltkreis stammenden, wechselstromigen Eingangssignals mit einer nahe der Resonanzfrequenz der Stimmgabel liegenden Frequenz gewobbelt werden.

Jedoch habe ich eine andere Weise zum Erzeugen der Wobbelbewegung für ein SPM entwickelt, die eine Kontaktanordnung gemäss Fig. 6 benutzt. Da ich diese als neu erachte, wird sie nun näher beschrieben. Das durch die Abtastelektroden 40, 41 erfasste schwache piezoelektrische Signal wird einem Spannungsverstärker 46 mit einstellbarer Verstärkung und/oder Phase zugeleitet. Die Ausgabe des Verstärkers wird zurück zu den Kontakten 44, 45 geleitet, was zur Folge hat, dass die Gabel mit ihrer Eigenfrequenz vibriert. Die Abstimmkraft wird somit als eigener Oszillator benutzt. Die Verstärkung und Phase des Verstärkers werden so eingestellt, dass sich das Signal selbst in einer geschlossenen Schleife speist.

Diese Art des Erzeugens der Wobbelbewegung ist besonders vorteilhaft, wenn die Resonanzschärfe «Q» einige Tausend übersteigt, da es dann zunehmend schwieriger wird, eine externe Treiberfrequenz der der Stimmgabel anzupassen. Temperatur- oder Druckveränderungen sowie Änderungen der Wechselwirkung zwischen Spitze und Probe beispielsweise gemäss Fig. 7B können dann eine Verschiebung der Resonanzfrequenz von störender Grösse verursachen. Zusätzlich können die Reaktionszeiten für ein solches System geringer als die Oszillationsperiode $1/f$ gestaltet werden, um ein schnelles Rastern zu ermöglichen.

Patentansprüche

1. Rastersondenmikroskop, welches umfasst:

eine sich in einer ersten Richtung (y) erstreckende Spitze zum Wechselwirken mit einer davorstehenden zu untersuchenden Probe (S); ein erstes Verschiebungsmittel zur Erzeugung von relativer Bewegung zwischen der Spitze und der Probe in der ersten Richtung (y); ein zweites Verschiebungsmittel zum Schaffen von relativer Bewegung zwischen der Spitze und der Probe in einer im wesentlichen senkrecht zur ersten Richtung (y) liegenden Ebene (x, z); Wobbelmittel zur Erzeugung einer im wesentlichen in der Ebene (x, z) auslenkenden, oszillatorischen Wobbelbewegung der Spitze relativ zur Probe; und ein Abtastmittel zum Erhalten eines auf die Wechselwirkung mit der Probe ansprechenden Signals, gekennzeichnet durch eine aus zumindest einem ersten und einem damit gekoppelten zweiten Oszillatormittel (30, 31) bestehende gekoppelte Oszillatoranordnung (5), wobei das erste Oszillatormittel (30) ein sich in der ersten Richtung (y) erstreckendes längliches erstes Teil piezoelektrischen Materials umfasst, das mit seinem einen, der Probe fernliegenden Ende von einem Haltemittel (50) gehalten und das mit seinem anderen, der Probe nahliegenden Ende mit der Spitze (10) verbunden ist, derart, dass die Spitze (10) über das andere Ende des ersten Teils piezoelektrischen Materials in Richtung der zu messenden Probe (S) hinausragt, und dass senkrecht zur ersten Richtung (y) auf die Spitze ausgeübte Kräfte bzw. Kraftkomponenten eine Verbiegung bzw. differentielle Verbiegung des ersten Teils piezoelektrischen Materials hervorrufen, die von dem Abtastmittel (40, 41; 40, 41, 43) durch eine, zumindest auf dem ersten Teil piezoelektrischen Materials angeordnete, ein entsprechendes elektrisches Signal abliefernde, Abtastkontaktnanordnung messbar ist.

2. Rastersondenmikroskop gemäss Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Spitze (10) als Endabschnitt, insbesondere als ein sich verjüngender Endabschnitt einer optischen Faser (20) ausgebildet ist, der in einer optisch durchlässigen Öffnung (12) endet, wobei die Spitze über das andere Ende des ersten Teils piezoelektrischen Materials in Richtung der zu messenden Probe (S) um eine Länge von vorzugsweise weniger als 1 Millimeter, insbesondere um eine Länge zwischen 0,5 und 1,0 Millimeter hinausragt.

3. Rastersondenmikroskop gemäss Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die optische Faser entlang einer sich in der ersten Richtung (y) erstreckenden Seite des ersten Teils piezoelektrischen Materials befestigt ist.

4. Rastersondenmikroskop gemäss Anspruch 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Spitze (10) eine reflektierende Beschichtung rund um ihre optisch durchlässige Öffnung (12) aufweist.

5. Rastersondenmikroskop gemäss einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das zweite Oszillatormittel (31) ein sich in der ersten Richtung (y) erstreckendes längliches zweites Teil piezoelektrischen Materials umfasst, das mit seinem einen, der Probe fernliegenden Ende von dem bzw. einem weiteren Haltemittel (50) gehalten wird.

6. Rastersondenmikroskop gemäss einem der

vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das erste und/oder das zweite Oszillatormittel (30, 31) jeweils als Bimorphstreifen ausgebildet sind, die jeweils in wenigstens zwei miteinander verbundene Teile (30a, 30b; 31a, 31b) mit verschiedenen piezoelektrischen Eigenschaften unterteilt sind.

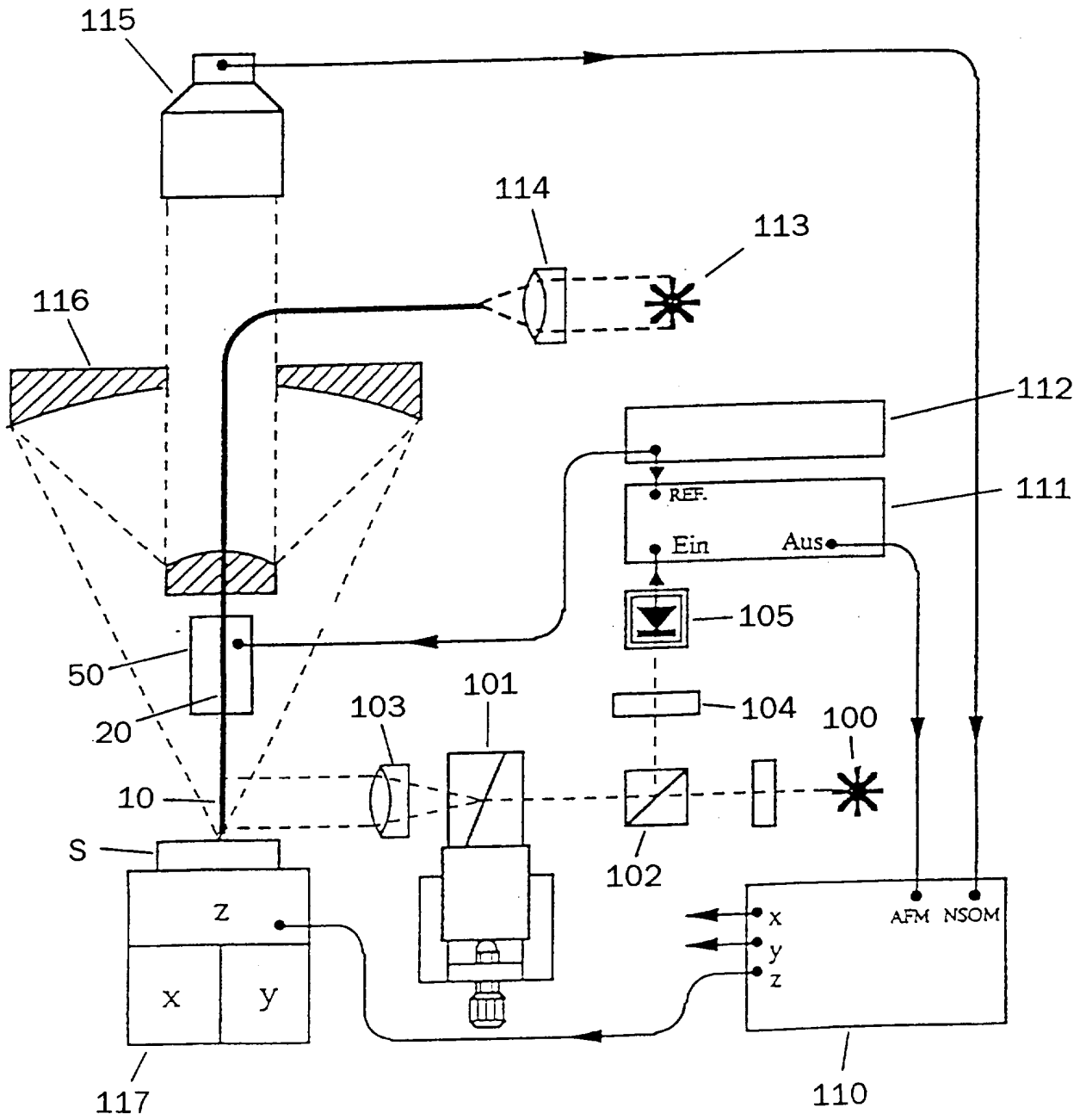
7. Rastersondenmikroskop gemäss Anspruch 5 oder 6, dadurch gekennzeichnet, dass das erste und zweite Oszillatormittel (30, 31) durch eine Stimmgabel (5) mit einem das erste Oszillatormittel bildenden ersten Zinken (30) bzw. einem das zweite Oszillatormittel bildenden zweiten Zinken (31) sowie einem das Haltemittel bildenden Überbrückungsteil ausgebildet sind.

8. Rastersondenmikroskop gemäss einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass das zweite Oszillatormittel (31) ein Oszillatorschaltkreis ist, der elektronisch oder optoelektronisch mit dem ersten Oszillatormittel (30) gekoppelt ist.

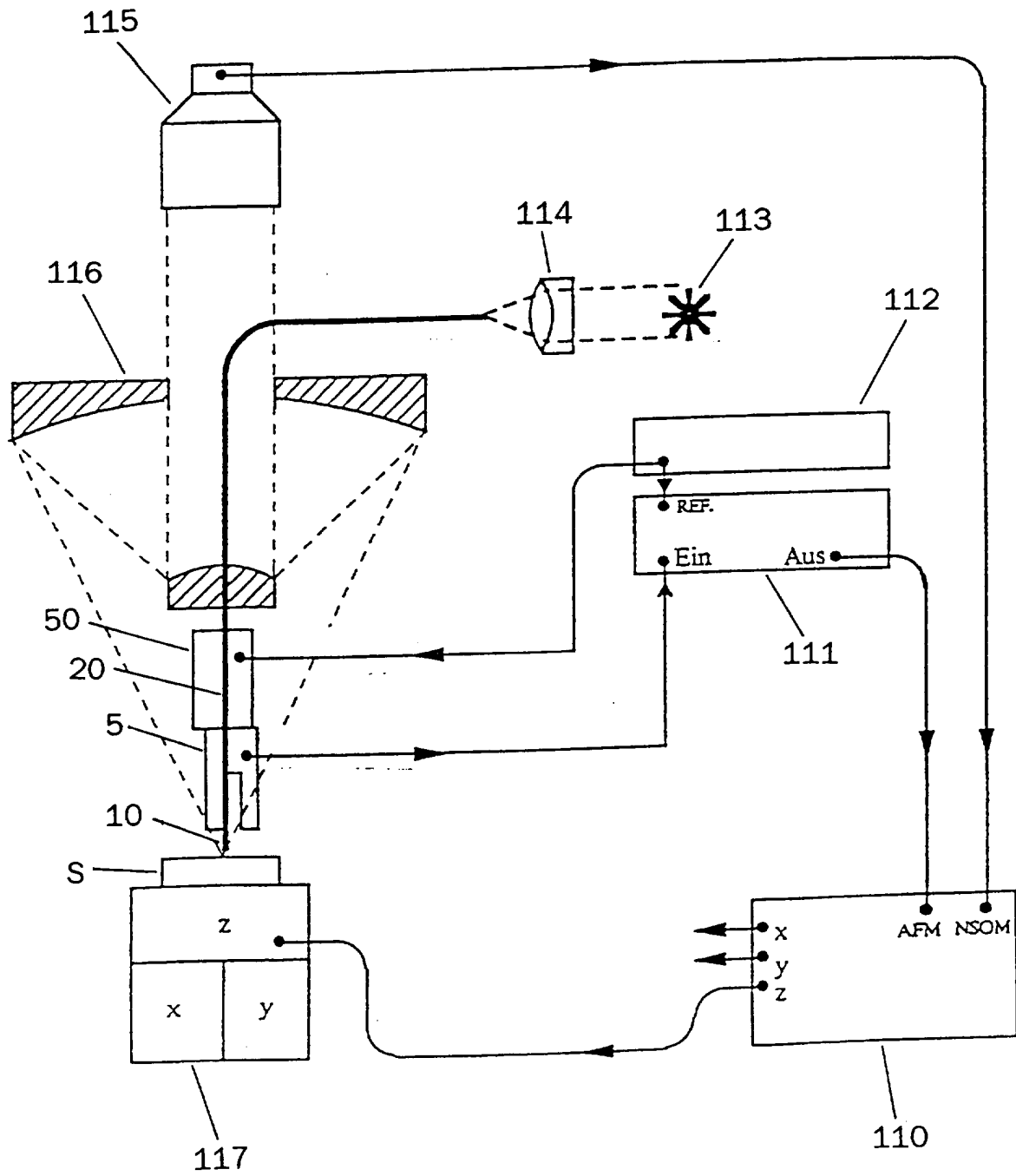
9. Rastersondenmikroskop gemäss einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Wobbelmittel als ein aus piezoelektrischem Material bestehender Wobbelblock ausgebildet ist, der durch ein darauf angewandtes, die Wobbelbewegung hervorrufendes, elektrisches Eingangssignal angetrieben wird, und dass das piezoelektrische Material des Wobbelblocks keramisch, amorph oder polykristallin ist.

10. Rastersondenmikroskop gemäss einem der Ansprüche 5 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass das Wobbelmittel aus einer auf dem ersten und gegebenenfalls zweiten Teil piezoelektrischen Materials (30) angeordneten Antriebskontaktnanordnung (44, 45) besteht, an welcher ein elektrisches Antriebssignal anlegbar ist, das das mit der Spitze (10) verbundene erste Teil piezoelektrischen Materials in im wesentlichen in der Ebene (x, z) auslenkende, oszillatorische Bewegung versetzt, um die Wobbelbewegung der Spitze zu erzeugen.

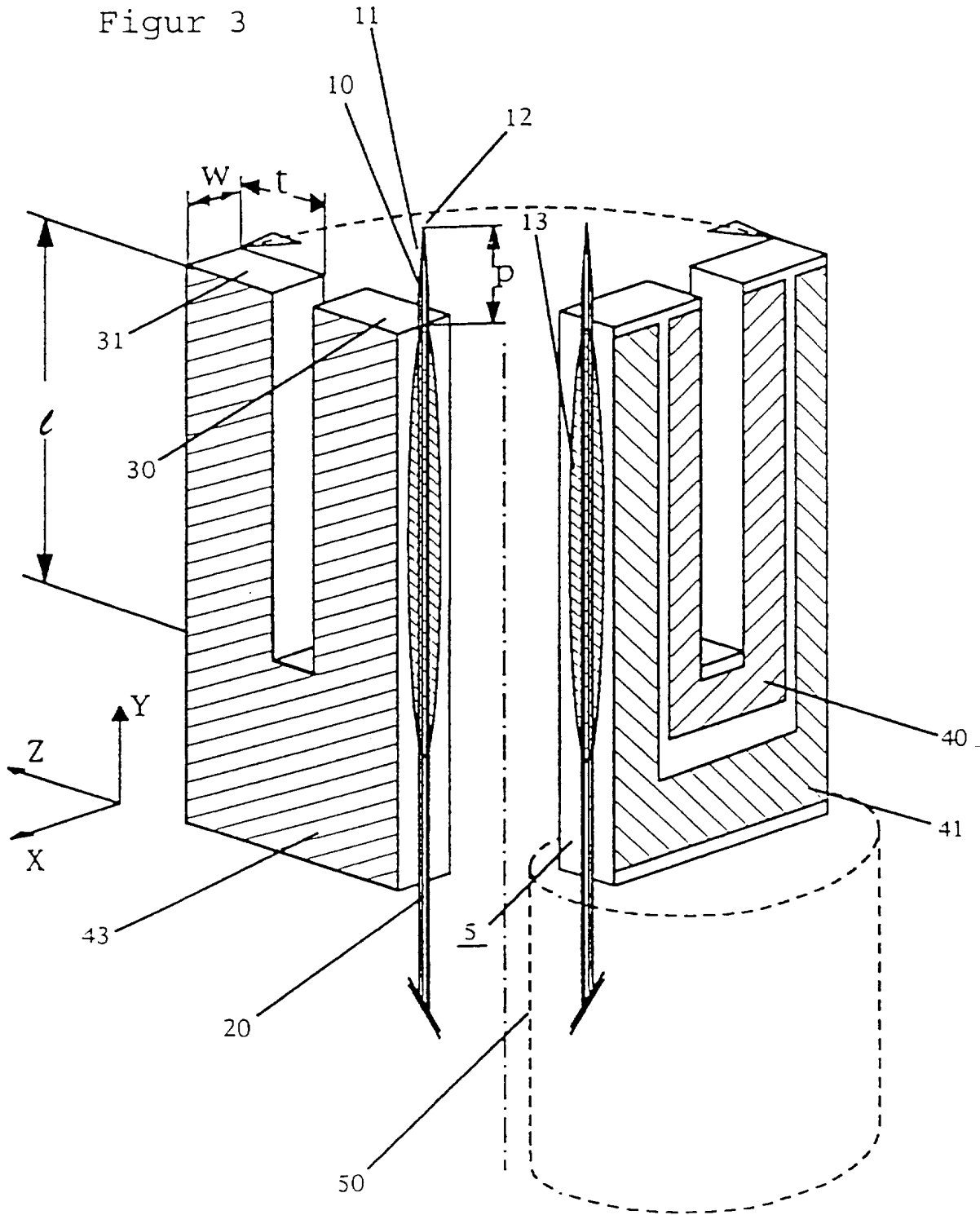
Figur 1



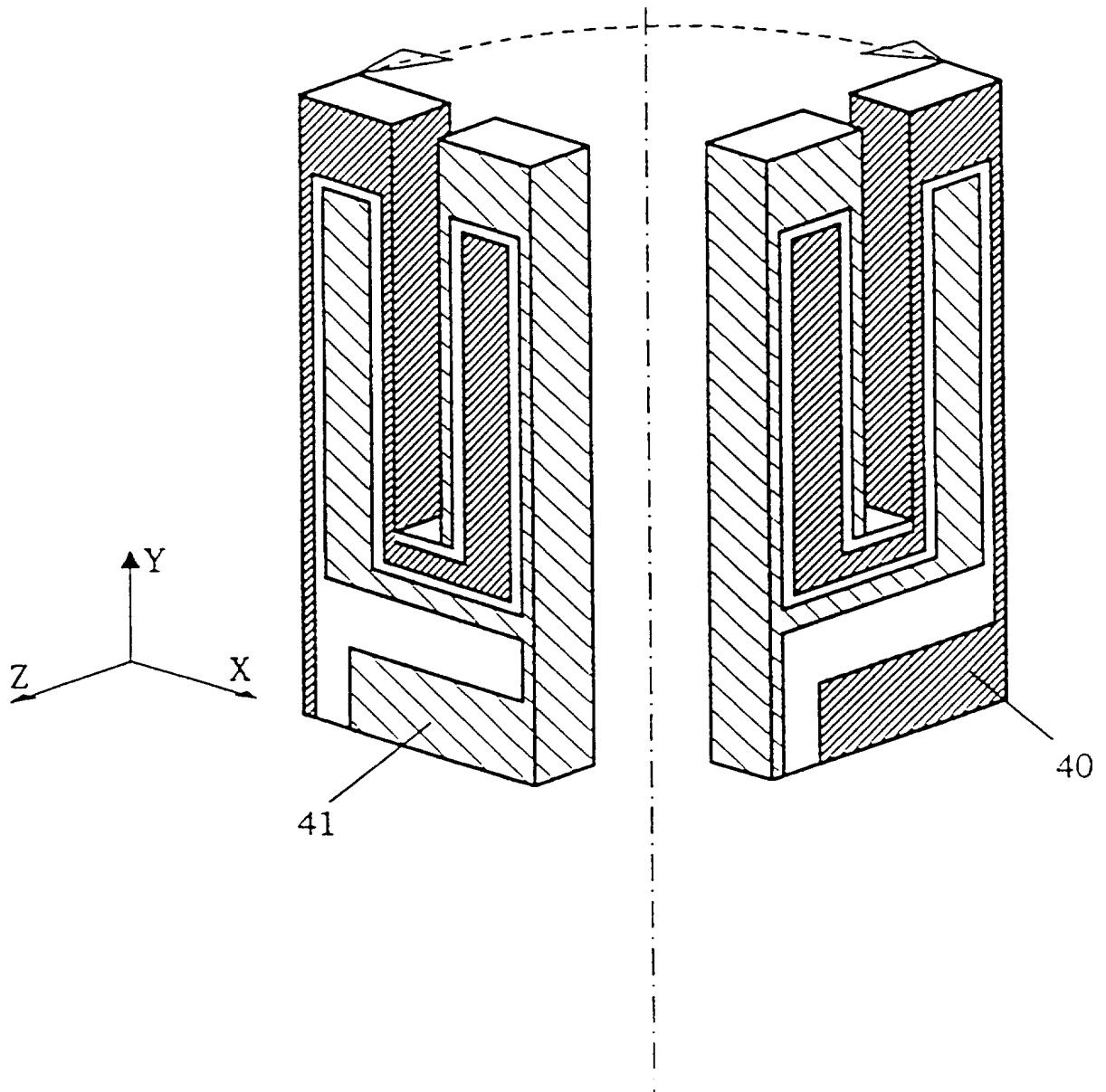
Figur 2



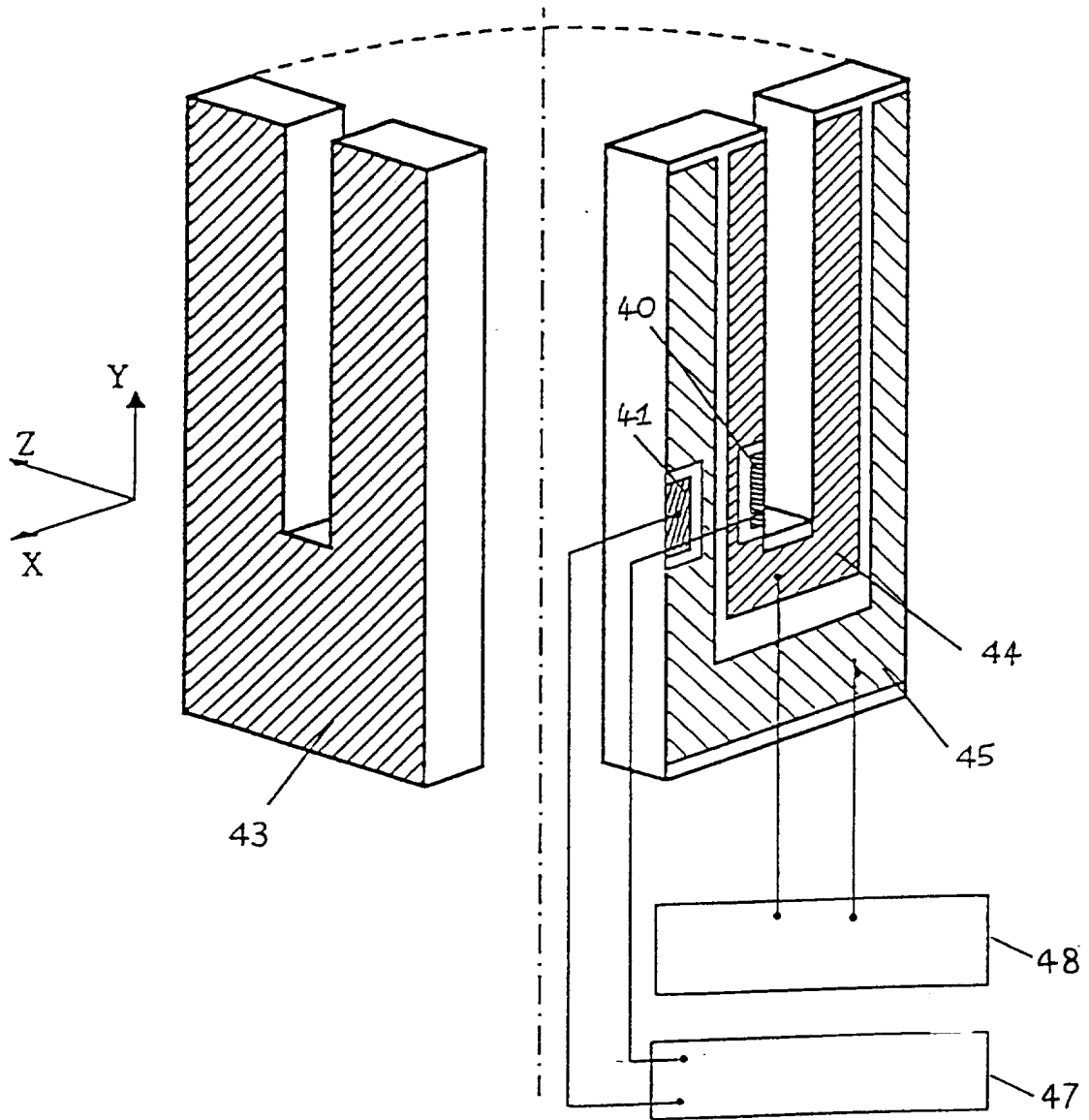
Figur 3



Figur 5



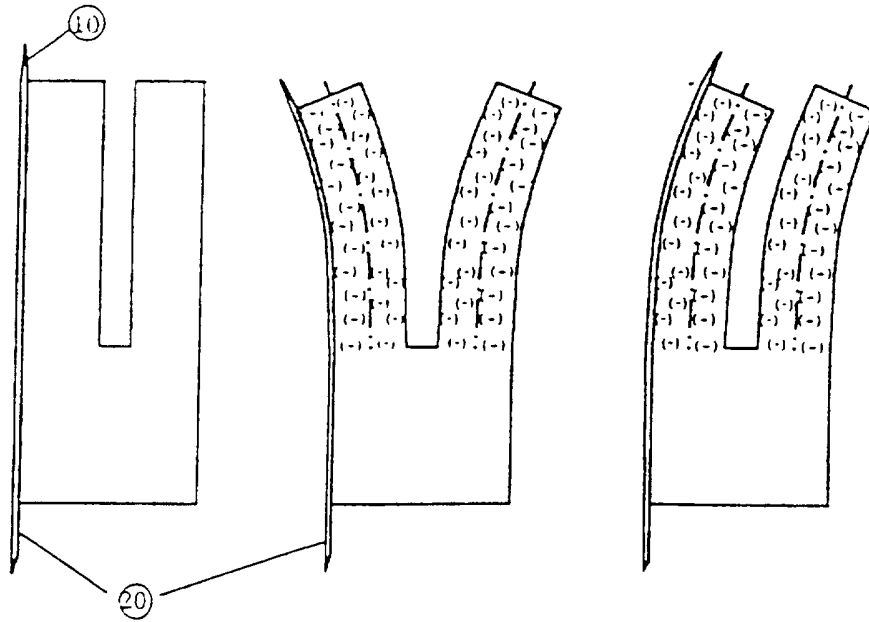
Figur 6



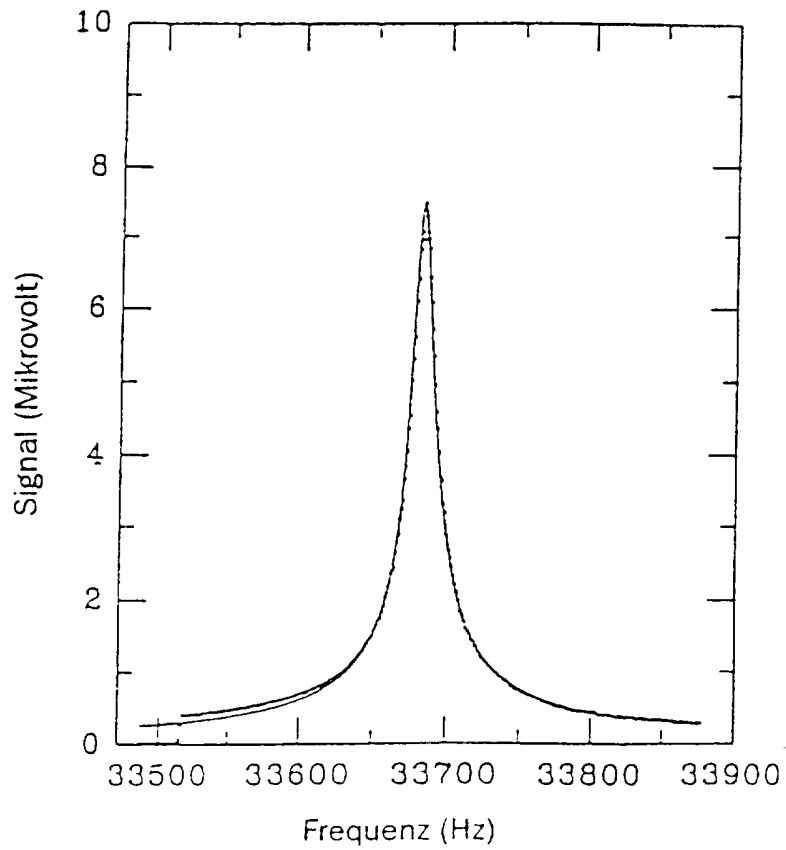
Figur 4A

Figur 4B

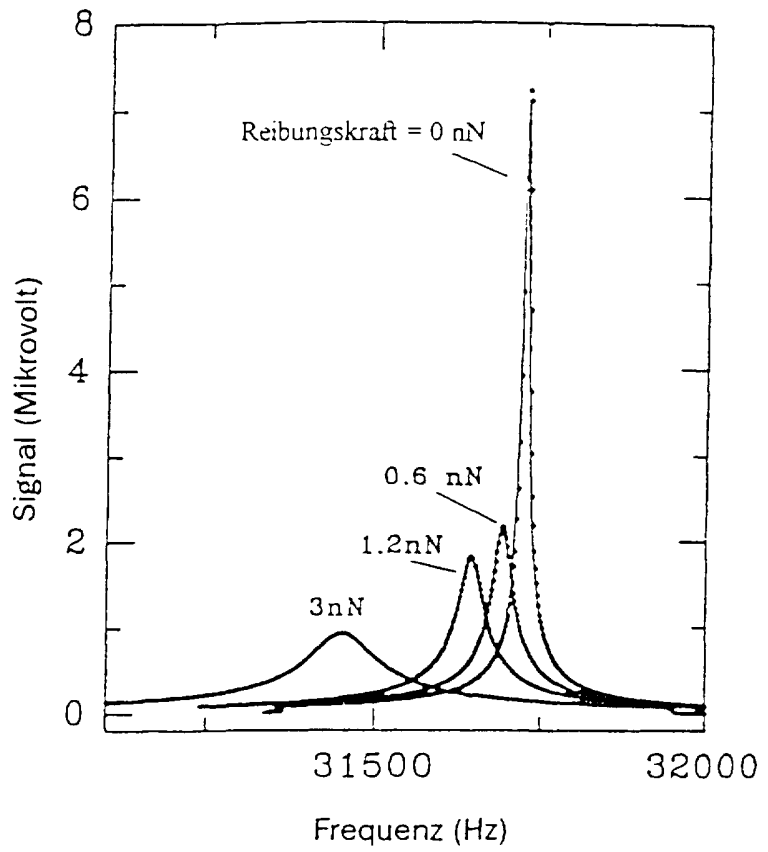
Figur 4C



Figur 7A



Figur 7B



Figur 7C

