



(19)  
 Bundesrepublik Deutschland  
 Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 103 39 404 B4** 2009.03.05

(12)

## Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **103 39 404.4**  
 (22) Anmeldetag: **27.08.2003**  
 (43) Offenlegungstag: **04.11.2004**  
 (45) Veröffentlichungstag  
 der Patenterteilung: **05.03.2009**

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: **H01J 37/244** (2006.01)  
*H01J 37/26* (2006.01)  
*G01N 23/225* (2006.01)

Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(66) Innere Priorität:  
**103 14 990.2**      **02.04.2003**

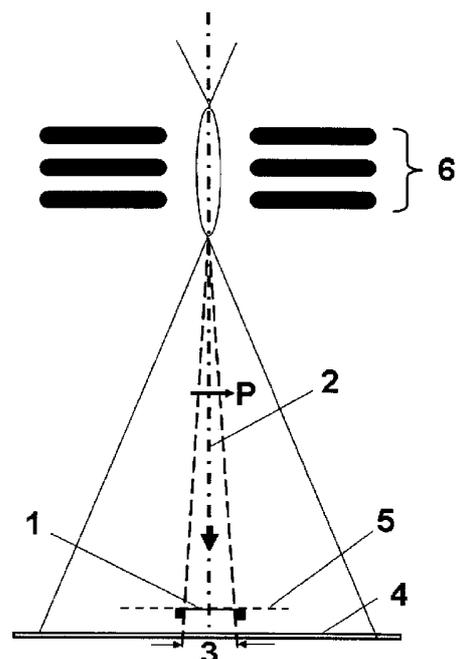
(73) Patentinhaber:  
**GST mbH, 55130 Mainz, DE**

(72) Erfinder:  
**Antrag auf Nichtnennung**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
 gezogene Druckschriften:  
**DE 196 47 975 C2**  
**DE 101 14 949 A1**  
**DE 35 04 720 A1**  
**US2002/00 03 213 A1**  
**JP 61-2 83 890 A**  
**JP 59-0 79 948 A**  
**JP 08-3 06 332 A**  
**JP 61-2 83 890 A**  
 Jap. Journ. of Appl. Phys. 23(1984) L 187 (K. Koike,  
 K. Hayakawa); "Low Energy Electron  
 Microscopy".  
 In: Rep. Prog. Phys. 57(9), Sept. 1994 (E. Bauer)  
 ; Polarized Electrons, Springer-Verlag, Berlin 197  
 6, S. 77 (J. Kessler); Ann. der Physik 2(1993)465  
 (G. Schönhense, H.C. Siegmann);

(54) Bezeichnung: **Anordnung zur Analyse der Elektronenspin-Polarisation in parallel abbildenden Elektronenmikroskopen**

(57) Hauptanspruch: Anordnung zum Nachweis der Elektronenspin-Polarisation in abbildenden Elektronenmikroskopen, welche einen zur Abbildung gelangenden Elektronenstrahl mittels eines polarisationssensitiven Streutargets auf seinen Spin-Polarisationsgrad und die Richtung des Spin-Polarisationsvektors hin analysiert, dadurch gekennzeichnet, dass das Streutarget als im direkten Abbildungsstrahlengang des Elektronenmikroskops angeordnete semitransparente ferromagnetische Folie (1) ausgebildet ist, die zur Spinfilterung des Bildes in einem Bereich (3) strahl-  
 abwärts der Folie dient.



## Beschreibung

**[0001]** Bei mehreren elektronenmikroskopischen Untersuchungsmethoden an magnetischen Proben wird die Elektronenspin-Polarisation nachgewiesen bzw. ausgenutzt. Bekannte Beispiele sind die Raster-elektronenmikroskopie mit Polarisationsanalyse (SEMPA), die spinpolarisierte Niederenergie-Elektronenmikroskopie (SP-LEEM) oder die spinpolarisierte Photoemissions-Elektronenmikroskopie (SP-PEEM). Bei all diesen Verfahren trägt die Spinpolarisation der zum Nachweis gelangenden Elektronen oder die damit verbundene Streuasymmetrie eine wichtige Information über die Magnetisierungsstruktur der untersuchten Probe.

**[0002]** Bei der SEMPA-Methode, erstmals von K. Koike und K. Hayakawa eingesetzt [DE 3504720 A1; JP 61283890 A, Japanese Journal of Appl. Phys. 23 (1984) L187], wird ein fein fokussierter Elektronenstrahl über die Probe gerastert und die Spinpolarisation der bei der Streuung entstehenden Sekundärelektronenkaskade in einem separaten Spinpolarisations-Analysator hinter einer Extraktions-Elektronenoptik nachgewiesen.

**[0003]** Bei der SP-LEEM-Methode [z. B. E. Bauer in "Low Energy Electron Microscopy", Rep. Prog. Phys. 57(9), Sept. 1994] wird ein paralleler Elektronenstrahl an einer einkristallinen Probenoberfläche bei sehr niedrigen Energien im Bereich weniger Elektronenvolt gebeugt. Bei ferromagnetischen Proben verursacht die Austauschstreu-Asymmetrie eine Spinabhängigkeit im Streuprozess. Bei Verwendung einer spinpolarisierten Elektronenquelle für den Primärstrahl tritt in Abhängigkeit von der lokalen Magnetisierungsrichtung der Probe ein magnetischer Kontrast auf. Bei einem unpolarisierten Primärstrahl erzeugt der gleiche Mechanismus eine Spinpolarisation des gebeugten Strahls.

**[0004]** Bei der SP-PEEM-Methode wird ausgenutzt, dass auch die mittels Licht aus Ferromagneten ausgelösten Photoelektronen eine Spinpolarisation tragen. Im Instrument von Koike [JP 59079948 A] wird eine lokale Spinanalyse mit einem Mottdetektor hinter einem Loch im Leuchtschirm durchgeführt.

**[0005]** Bei allen drei Methoden ist die Größe der Spinpolarisation ein Maß für die lokale Probenmagnetisierung. Außerdem besteht eine direkte Korrelation zwischen der Richtung des Spinpolarisationsvektors der Elektronen und der Richtung der lokalen Magnetisierung der Probe. Die Methoden sind daher geeignet, die magnetische Domänenstruktur von ferromagnetischen Proben direkt abzubilden bzw. dynamische Effekte, wie z. B. das Verhalten der Magnetisierung bei ultraschnellen Anregungsprozessen, zeitlich aufgelöst zu verfolgen.

**[0006]** Die vorliegende Erfindung löst durch das kennzeichnende Merkmal des Patentanspruchs 1 die Aufgabe, die Polarisation der zur Abbildung gelangenden Elektronen durch eine in die elektronenoptische Säule integrierte Anordnung zu messen. Das Verfahren ist für Niederenergie-Elektronenmikroskope geeignet, wobei zur Spinpolarisations-Analyse das bekannte Prinzip der spinabhängigen Transmission durch dünne ferromagnetischen Folien ausgenutzt wird. Vorteile der erfindungsgemässen Anordnung gegenüber bisherigen Ansätzen sind der wesentlich einfachere Aufbau, der geringe Justieraufwand, die Erhaltung einer linearen elektronenoptischen Achse, die nahezu vollständige Eliminierung von apparativen Asymmetrien durch den wohldefinierten Strahlengang und durch die geringe Energiebreite des Elektronenstrahls im Mikroskop sowie die Möglichkeit der präzisen Positionierung des zu analysierenden Probenbereiches im Bild. Transmissive Folien in Elektronenmikroskopen wurden in der Vergangenheit im Zusammenhang mit Phasenplatten beschrieben [DE 101 14 949 A1].

**[0007]** Beispielhafte Ausführungsformen der Erfindung werden nachfolgend anhand der Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen:

**[0008]** Fig. 1 die schematische Darstellung der erfindungsgemässen Anordnung auf der Basis einer semitransparenten polarisationssensitiven Folie (1) in einer Bildebene oder Zwischenbildebene (5), so daß auf dem Leuchtschirm (4) ein spingefiltertes Bild (3) sichtbar wird,

**[0009]** Fig. 2a-c die schematische Darstellung von verschiedenen Typen von Folienhaltern bei Blickrichtung entlang der elektronenoptischen Achse, und

**[0010]** Fig. 3a-b zwei Bewegungsmechanismen für den Folienhalter.

**[0011]** Die erfindungsgemässe Anordnung zur Spinpolarisationsanalyse nutzt die räumliche Separation von Elektronen aus verschiedenen Probenbereichen in oder in der Nähe der Bildebene oder einer Zwischenbildebene (5) eines parallel abbildenden Elektronenmikroskops aus. Das Analysiervermögen der Anordnung beruht auf der spinabhängigen Transmission einer dünnen ferromagnetischen Folie. Diese Folie (1) hat eine definierte Grösse und befindet sich im direkten Abbildungsstrahlengang auf oder in der Nähe der elektronenoptischen Achse (2) des Mikroskops. Fig. 1 zeigt den schematischen Aufbau einer bevorzugten Ausführungsform in der Säule eines beliebigen parallel abbildenden Elektronenmikroskops. Die Folie (1) ist in oder in der Nähe der Bildebene (5), z. B. unmittelbar vor dem Leuchtschirm (4), oder alternativ in einer Zwischenbildebene angebracht. Die Grösse der Folie und die elektronenoptische Vergrößerung des Mikroskops definieren den

Mikrobereich auf der Probe, der auf die lokale Magnetisierung hin analysiert wird. Bei einem Durchmesser der Folie von 1 mm und einer typischen Vergrößerung von 5000 ergibt sich ein Durchmesser des analysierten Bereichs auf der Probe von 200 nm. Durch Variation des Vergrößerungsfaktors lässt sich der analysierte Bereich vergrößern oder verkleinern. Prinzipiell sind Ortsauflösungen von besser als 50 nm erreichbar. Durch laterale Verschiebung der Probe lässt sich der Bereich auf der Probenoberfläche positionieren. Dabei ermöglicht der Schattenwurf des Folienhalters im Bild eine präzise Positions- und Größenbestimmung, siehe **Fig. 2a**.

**[0012]** Die erfindungsgemäße Anordnung nutzt ferner aus, dass in der elektronenoptischen Säule eines parallel abbildenden Elektronenmikroskops eine sehr gute Definition des Elektronenstrahls im Bezug auf seinen Einfallswinkel, die damit verbundene Winkeldivergenz und seine Energie vorliegt. Aus der Streuasymmetrie der Elektronenintensitäten  $I_1$  und  $I_2$  lässt sich gemäss der Formel  $P = (I_1 - I_2) / S(I_1 + I_2)$  die Elektronen-Spinpolarisation bestimmen, vergleiche J. Kessler [„Polarized Electrons“, Springer Verlag, Berlin (1976) S. 77]. Die Asymmetriefunktion  $S$ , im Fall der Mott-Streuung auch Sherman-Funktion genannt, ist eine material-, energie- und geometrieabhängige Konstante. Typische Werte von  $S$  für auf Streuung basierende Detektoren liegen je nach Streutarget und Energie bei  $S = 0,1$  bis  $0,4$ .

**[0013]** Die transmittierten Intensitäten  $I_1$  und  $I_2$  lassen sich bestimmen, wenn die Richtung des Magnetisierungsvektors der ferromagnetischen Folie umgepolt werden kann. Dies ist z. B. mittels einer Mikroskopie in der Nähe des Streutargets oder auch mittels eines Strompulses durch den Trägerstab (**8**) des Targets möglich, wie in **Fig. 2c** beschrieben ist. Die Spinpolarisation des analysierten Elektronenstrahls, siehe Vektor  $P$  in **Fig. 1**, berechnet sich nach der oben angegebenen Formel, wobei die Größen  $I_1$  und  $I_2$  die für die beiden Richtungen des Magnetisierungsvektors (parallel und antiparallel zu  $P$ ) gemessenen Intensitäten hinter der Folie repräsentieren. In einer bevorzugten Ausführungsform kann die Magnetisierungsrichtung des Streutargets entlang zweier zueinander orthogonaler Richtungen eingestellt werden, um so beide entsprechenden Komponenten des Spinpolarisationsvektors bestimmen zu können.

**[0014]** Dünne ferromagnetische Filme im Dickenbereich weniger Nanometer wirken als effiziente Spinfilter mit einer sehr hohen Analysierfähigkeit [G. Schönhense und H. C. Siegmann, Ann. der Physik 2 (1993) 465]. Bei niedrigen Einfallenergien wirkt ein dünner ferromagnetischer Film als sehr effektiver Absorber für eine Spinrichtung, da im ferromagnetischen Material Elektronen mit Minoritäts-Spinrichtung wesentlich stärker gestreut und absorbiert werden, als solche mit Majoritäts-Spinrichtung. Der von der Folie (**1**)

transmittierte Strom kann somit als Maß für die Spinpolarisation genutzt werden, weil diese die eine Spinrichtung bevorzugt durchlässt, während die andere stärker absorbiert wird. Bei dieser Anordnung erscheint hinter der ferromagnetischen Folie im Bereich (**3**) ein spingefiltertes Bild auf dem Leuchtschirm (**4**). Im analysierten Bereich (**3**) ist das Bild allerdings nur mit einer um 2–3 Größenordnungen geschwächten Intensität sichtbar. Um den Bereich (**3**) in guter Qualität sichtbar zu machen, kann der übrige Bereich des Leuchtschirms (**4**) durch geeignete Maßnahmen abgedeckt oder ausgeblendet werden. Die Folie kann z. B. durch ein feinmaschiges Netz und einen oder mehrere Haltestäbe (**8**) getragen werden, um genügend Stabilität zu erreichen. Da die maximale Analysierstärke bei diesem Verfahren bei sehr kleinen Elektronenenergien auftritt, müssen die zu analysierenden Elektronen vor der Folie auf Energien von wenigen Elektronenvolt abgebremst werden. Dazu kann z. B. eine miniaturisierte Anordnung von Retardierungsnetzen dienen. Bei der Abbildung einer Probe mit magnetischen Domänen wird hinter der ferromagnetischen Folie (**1**) direkt der Domänenkontrast in Folge der spinfilternden Wirkung der Folie sichtbar. Inhomogenitäten in der Folie können durch eine geeignete Differenzbildtechnik, z. B. durch Division des Bildes durch ein Referenzbild einer strukturlosen Probe, eliminiert werden. Die ferromagnetische Folie kann direkt vor dem Leuchtschirm (**4**) oder auch in einer Zwischenbildebene (**5**) im Strahlengang angeordnet werden.

**[0015]** Die longitudinale Komponente des Spinpolarisationsvektors entlang der optischen Achse (**2**) kann mit der in **Fig. 1** dargestellten Anordnung mit einer senkrecht magnetisierten ferromagnetischen Folie (**1**) detektiert werden.

**[0016]** **Fig. 2a** zeigt eine Folie (**1**) in einer symmetrischen Aufhängung mit dünnen Stäben (**8**) unter jeweils  $120^\circ$ . **Fig. 2b** zeigt eine Folie (**1**) auf einem einzelnen stabförmigen Halter (**8**). **Fig. 2c** zeigt eine Folie (**1**) auf einem durchgehenden Stab (**8**). Diese Anordnung kann bevorzugt für die Magnetisierung der ferromagnetischen Folie (**1**) eingesetzt werden. Ein Strompuls  $+I$  durch den Stab (**8**) dient zur Aufmagnetisierung der Folie in Richtung  $+M$ . Durch Umkehrung der Strompulsrichtung nach  $-I$  kann die Magnetisierungsrichtung auf einfache Art nach  $-M$  umgeschaltet werden.

**[0017]** Man erkennt an den Darstellungen in **Fig. 2a–c**, dass die Abschattung des elektronenoptischen Bildes für viele Anwendungsfälle toleriert werden kann.

**[0018]** Alternativ lässt sich, wie in **Fig. 3** dargestellt, die Folie (**1**) mittels eines Klappmechanismus (**Fig. 3a**) oder eines Schiebemechanismus (**Fig. 3b**) bei Bedarf aus dem bzw. in den Strahlengang des Mi-

kroskops heraus- oder hineinbewegen.

#### Bezugszeichenliste

1	Dünne ferromagnetische Folie
2	elektronenoptische Achse
3	spingefiltertes Bild
4	Leuchtschirm
5	Bildebene oder Zwischenbildebene
6	elektronenoptische Linse
7	Randstrahlen des Bildes
8	Haltestab
P	Polarisationsvektor des analysierten Elektronenstrahls
+M, -M	Magnetisierungsrichtungen der Folie
+I, -I	Stromrichtungen des Magnetisierungspulses

#### Patentansprüche

1. Anordnung zum Nachweis der Elektronen-spin-Polarisation in abbildenden Elektronenmikroskopen, welche einen zur Abbildung gelangenden Elektronenstrahl mittels eines polarisationssensitiven Streutargets auf seinen Spin-Polarisationsgrad und die Richtung des Spin-Polarisationsvektors hin analysiert, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Streutarget als im direkten Abbildungsstrahlengang des Elektronenmikroskops angeordnete semitransparente ferromagnetische Folie (1) ausgebildet ist, die zur Spinfilterung des Bildes in einem Bereich (3) strahlabwärts der Folie dient.

2. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Spinpolarisation aus der spinabhängigen Transmission der ferromagnetischen Folie bestimmt wird.

3. Anordnung nach einem der Ansprüche 1–2, dadurch gekennzeichnet, dass die Magnetisierungsrichtung M der ferromagnetischen Folie (1) umgepolt bzw. um 90° gedreht werden kann, um beide transversale Komponenten des Spinpolarisationsvektors P zu analysieren.

4. Anordnung nach einem der Ansprüche 1–3, dadurch gekennzeichnet, dass die ferromagnetische Folie (1) die Abbildung erhält, so dass hinter der Folie ein spingefiltertes Bild (3) auf dem Leuchtschirm sichtbar wird.

5. Anordnung nach einem der Ansprüche 1–4, dadurch gekennzeichnet, dass die Folie (1) in oder in der Nähe der Bildebene oder einer Zwischenbildebene (5) angeordnet ist, um den analysierten Probenbereich zu definieren.

6. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Folie (1) fest im Abbildungsstrahlengang angebracht ist.

7. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Folie (1) in den Abbildungsstrahlengang hineinbewegt und aus dem Strahlengang herausbewegt werden kann.

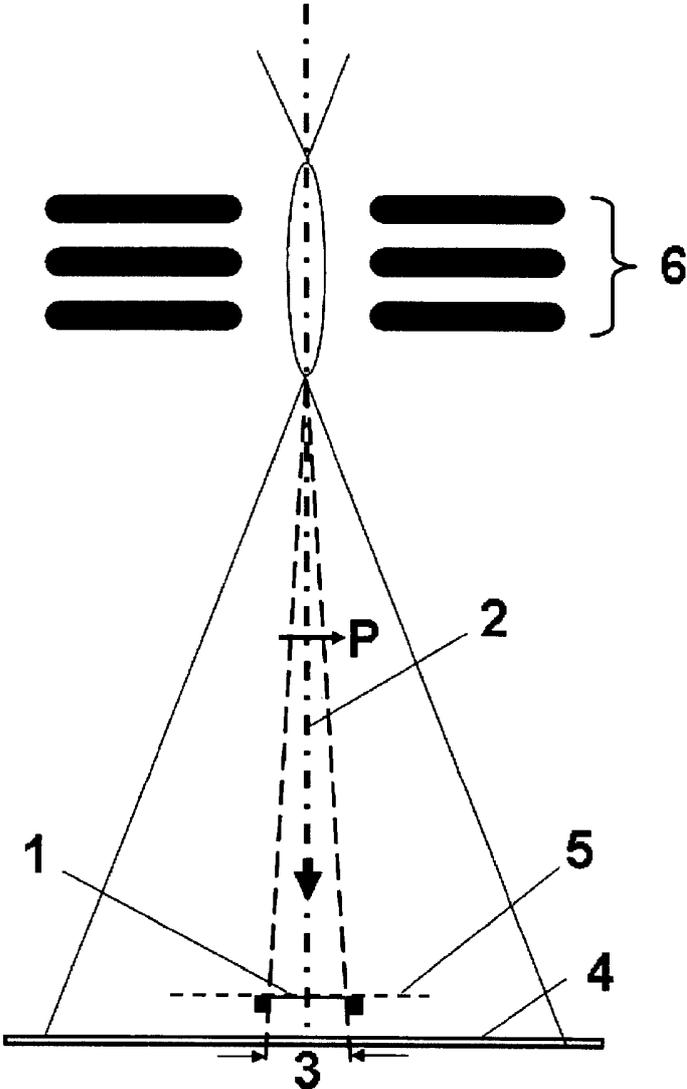
8. Anordnung nach einem der Ansprüche 1–7, dadurch gekennzeichnet, dass die Folie (1) auf oder in der Nähe der elektronenoptischen Achse (2) angebracht ist.

9. Anordnung nach einem der Ansprüche 1–8, dadurch gekennzeichnet, dass der Folienhalter so miniaturisiert ist, dass er das elektronenoptische Bild auf dem Leuchtschirm (4) oder in einer Zwischenbildebene (5) nur in einem kleinen Bereich abschattet.

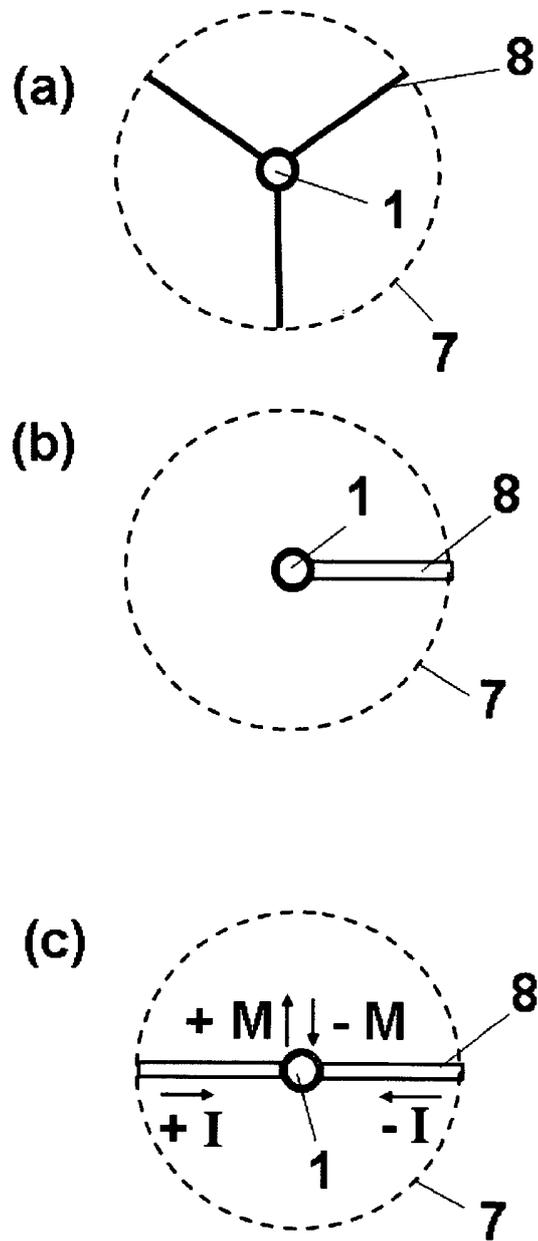
10. Anordnung nach einem der Ansprüche 1–9, dadurch gekennzeichnet, dass die Position des zu analysierenden Probenbereiches durch laterale Verschiebung der Probe bzw. entsprechende elektronenoptische Ablenkung ausgewählt werden kann.

11. Anordnung nach einem der Ansprüche 1–10, dadurch gekennzeichnet, dass die Grösse des zu analysierenden Probenbereiches durch Variation der lateralen Vergrößerung des Mikroskopes ausgewählt werden kann.

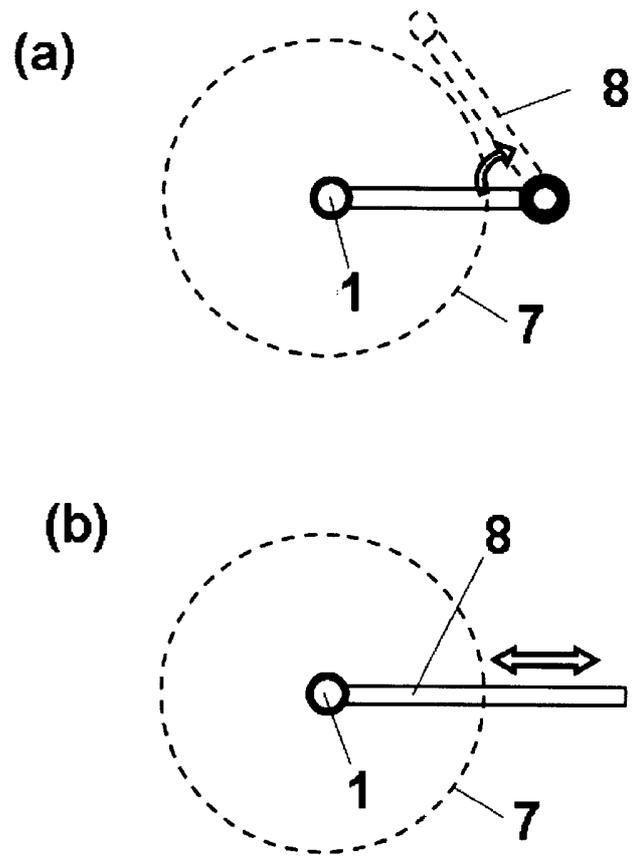
Es folgen 3 Blatt Zeichnungen



Figur 1



Figur 2



Figur 3