



(10) **DE 10 2021 207 016 B3** 2022.10.13

(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2021 207 016.7**
 (22) Anmeldetag: **05.07.2021**
 (43) Offenlegungstag: –
 (45) Veröffentlichungstag
 der Patenterteilung: **13.10.2022**

(51) Int Cl.: **H01J 37/20** (2006.01)
H01J 37/26 (2006.01)
G02B 21/26 (2006.01)
G02B 21/34 (2006.01)

Innerhalb von neun 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).

(73) Patentinhaber:
Carl Zeiss Microscopy GmbH, 07745 Jena, DE

(72) Erfinder:
Stegmann, Heiko, Dr., 01099 Dresden, DE

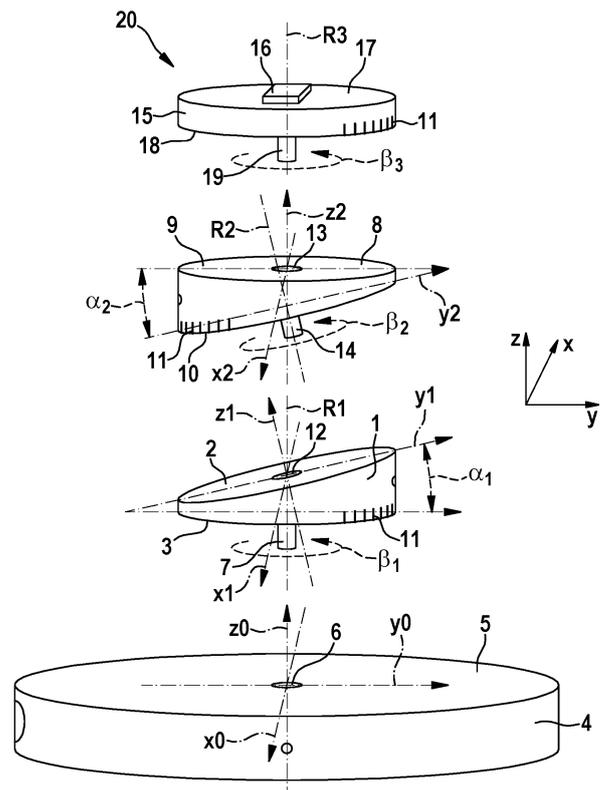
(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	10 2010 041 678	A1
DE	10 2018 212 511	A1
US	2007 / 0 125 958	A1
US	2011 / 0 204 226	A1
US	2011 / 0 226 947	A1
US	2016 / 0 189 929	A1
JP	2000- 323 079	A

(54) Bezeichnung: **Probenhaltersystem mit frei einstellbaren Neigungswinkeln**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Probenhaltersystem zum Halten einer mikroskopischen Probe in einem Mikroskop-System, wobei das Probenhaltersystem ein erstes und ein zweites Rotationselement umfasst, die rotierbar miteinander verbunden sind. Die Seitenflächen der beiden Rotationselemente schließen jeweils einen Winkel α ein, so dass die Rotationselemente einen keilförmigen Querschnitt aufweisen. Das zweite Rotationselemente ist dazu konfiguriert, eine Probe aufzunehmen, während das erste Rotationselement rotierbar mit einer Halteraufnahmefläche verbunden werden kann.

Die Rotationselemente sind jeweils um eine Rotationsachse um einen Winkel β rotierbar. Durch Überlagerung aller beteiligten Winkel α und β ist die Neigung der dritten Seitenfläche, auf die die Probe aufgenommen werden kann, einstellbar.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Probenhaltersystem für Teilchenstrahlmikroskope, also Mikroskop-Systeme, die mit einem Strahl geladener Teilchen arbeiten, wie zum Beispiel Rasterelektronenmikroskope (SEM) oder Ionenstrahlmikroskope (focused ion beam, FIB). Die Abbildung, Analyse und/oder Bearbeitung einer mikroskopischen Probe mit einem solchen Teilchenstrahlmikroskop erfordert oft, dass die Probe im dreidimensionalen Raum in bestimmter Weise orientiert wird.

[0002] Unter der Raum-Orientierung einer Probe wird die Ausrichtung der Probe relativ zu einer optischen Achse verstanden, wobei sich die Raum-Orientierung der Probe dadurch ergibt, dass die Probe um eine oder mehrere Achsen gedreht wird. Hierbei wird eine Drehung der Probe um eine Achse, die parallel zur optischen Achse des Teilchenstrahlmikroskops verläuft, als Rotation der Probe bezeichnet. Eine Drehung der Probe um eine Achse, die senkrecht zur Rotationsachse ausgerichtet ist, wird als Neigung der Probe, im Folgenden auch Verkipfung der Probe, bezeichnet.

[0003] Um eine Verkipfung der Probe in einem Mikroskop-System zu ermöglichen, sind verschiedene Lösungen bekannt.

[0004] Beispielsweise kann im Teilchenstrahlmikroskop eine Probenbühne (Fünf-Achsen-Bühne) mit Kippachse zur Verfügung gestellt werden. Üblicherweise umfassen Probenbühnen wenigstens drei translatorische Achsen (x , y , z) und zwei Rotationsachsen (R , T). Dabei dient eine der Rotationsachsen als Kippachse T (tilt), die senkrecht zu der anderen Rotationsachse R angeordnet ist. Die Rotationsachse R ist meist parallel zu einer der optischen Achsen des Mikroskop-Systems ausgerichtet. In der Regel wird die Probe auf einen flachen Probenhalter aufgebracht, der dann wiederum auf die Probenbühne montiert wird.

[0005] Bei Verwendung einer Fünf-Achsen-Probenbühne ist die Ausrichtung der Kippachse T relativ zu den anderen Bewegungsachsen festgelegt. Um die Probe in eine bestimmte Raum-Orientierung zu kippen, wird die Verkipfung der Probe um die Kippachse T kombiniert mit einer Rotation der Probenbühne um die Rotationsachse R oder einer rotierten Montage der Probe auf dem Probenhalter.

[0006] Allerdings ist nicht in jedem Teilchenstrahlmikroskop eine Probenbühne mit Kippachse verfügbar. Einfache Teilchenstrahlmikroskope werden aus Kostengründen oft nicht mit einer Kippachse ausgestattet. Auch Teilchenstrahl-Laser-Mikroskop-Systeme verfügen nicht immer über eine Probenbühne mit Kippachse. Bei manchen Teilchenstrahl-Laser-Mikroskopen verfügt das Laser-Teilsystem nicht über eine Probenbühne mit Kippachse, so dass der Einfallswinkel des Laserstrahls relativ zur Probenoberfläche nicht verändert werden kann. Da die Neigung der erzeugten Laserschnitte aber grundsätzlich von der Einfallrichtung des Laserstrahls abweicht, ist zur Erzeugung von Laserschnitten senkrecht zur Probenoberfläche ein Gegenkippen der Probe nötig.

[0007] Bei einer alternativen Lösung wird die Probe auf einen Probenhalter aufgebracht, der einen festen oder einen einstellbaren Kippwinkel aufweist (sogenannter „vorgekippter Probenhalter“). Dabei ist die Ausrichtung der Kippachse relativ zum Probenhalter festgelegt. Um die Ausrichtung der Kippachse relativ zur Probe zu ändern, muss die Probe in geänderter Ausrichtung auf den Probenhalter montiert werden.

[0008] Ein vorgekippter Probenhalter wird beispielsweise benötigt, wenn der Kippwinkelbereich der Kippachse T einer Probenbühne nicht groß genug ist.

[0009] Außerdem kann ein vorgekippter Probenhalter erforderlich sein, wenn die Oberfläche der Probe nicht planparallel zur xy -Ebene der Probenbühne ist. In diesem Fall kann es notwendig sein, die Probe zu verkippen, ohne jedoch die Probe zu rotieren. Dieses Erfordernis kann zum Beispiel bestehen bei einer nicht flach montierten Probe mit Strukturen, die eine Vorzugsrichtung aufweisen, beispielsweise Halbleiterstrukturen.

[0010] Je nach Vorhandensein der Kipp- und Rotationsmöglichkeiten der Probenbühne ist die Kombinationen mit einem entsprechend ausgestalteten, vorgekippten Probenhalter denkbar.

[0011] Nachteilig an einem Probenhalter mit Kippachse ist jedoch, dass solche Probenhalter sehr klein sind und sich deshalb das genaue und reproduzierbare Einstellen des Kippwinkels schwierig gestaltet. Dies ist auch dann der Fall, wenn eine Winkelskala vorhanden ist.

[0012] Ein Nachteil eines Probenhalters mit festem Kippwinkel besteht darin, dass der Kippwinkel der Probenoberfläche nur dann dem vom Probenhalter vorgegebenen Winkel entspricht, wenn die Probe so montiert ist, dass die Probenoberfläche exakt parallel zur Auflagefläche des Probenhalters ist.

[0013] Außerdem ist eine Veränderung des Kippwinkels nicht möglich. Um einen anderen Kippwinkel einzustellen, müsste zusätzlich eine Probenbühne mit Kippachse verwendet werden.

[0014] Darüber hinaus ist nachteilig, dass die aufgebrauchte Probe meist nicht rotiert werden kann. Das heißt, die Ausrichtung der Probe in der geneigten Ebene kann nicht ohne Weiteres verändert werden. Dazu müsste die Auflagefläche eine rotierende Aufnahmevorrichtung aufweisen. Wenn dies nicht der Fall ist, muss die Probe abgelöst und in einer passend gedrehten Ausrichtung aufgebracht werden.

[0015] Ein weiterer Nachteil ergibt sich, wenn der Probenhalter durch Rotation der Probenbühne um die Rotationsachse R oder rotiertes Montieren des Probenhalters auf der Probenbühne gedreht wurde. Dann sind die effektiven Kippwinkel relativ zur x- und y-Achse der Probenbühne nicht ohne Weiteres ersichtlich. Sie müssen errechnet oder experimentell ermittelt werden.

[0016] Daher wäre es wünschenswert eine Vorrichtung und ein Verfahren vorzuschlagen, die eine präzise und stabile Ausrichtung der Probenoberfläche über alle Raumwinkel ermöglichen.

[0017] Besonders günstig ist es dabei, wenn die Neigung der Probenoberfläche stufenlos einstellbar ist.

[0018] Je nach Anwendungsfall können die jeweils benötigten maximalen Kippwinkel unterschiedlich groß sein. Daher wäre ein flexibles System wünschenswert, das bei unterschiedlichen Anwendungen unterschiedliche maximale Kippwinkel zu Verfügung stellen kann.

[0019] Aus dem Stand der Technik sind verschiedene Fünf-Achsen-Bühnen und Sechs-Achsen-Bühnen für Mikroskop-Systeme bekannt.

[0020] EP 2 001 038 A2 (Zeile & Scheitel) beschreibt einen vorgekippten Probenhalter.

[0021] DE 10 2018 212 511 B4 (Nicoletti & Biberger) offenbart ein Probenhaltersystem, das einen zusätzlichen Bewegungsfreiheitsgrad zur Verfügung stellt.

[0022] Weiterhin ist aus der DE 10 2010 041 686 A1 (Biberger & Pulwey) ein drehbares Probenhaltersystem mit einzeln rotierbaren Probenaufnahmen bekannt. JP 2000-32 079 A (Hidekazu et al.) offenbart einen speziellen, kippbaren Probentisch für Waferuntersuchungen, bei dem die Übertragung von Vibrationen vermindert ist.

[0023] US 2011/0204226 A1 (Amador) beschreibt eine kassettenartige Probenaufnahme zur Untersuchung von TEM-Proben.

[0024] US 2016 / 0 189 929 A1 (Hammer et al.) offenbart eine Methode zur TEM-Probenpräparation mit Back-Side-Milling.

[0025] In US 2011 / 0 226 947 A1 (Takahashi & Hasuda) wird ein rotierbarer Probentisch mit Probenhalter beschrieben, wobei der Probenhalter eine Rotationsachse aufweist, die die Strahlachse schneidet.

[0026] US 2007 / 0 125 958 A1 (Tappel et al.) offenbart ein Partikelstrahlsystem mit rotierbarem Probentisch.

Überblick über die Erfindung

[0027] Es ist die Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Probenhaltersystem vorzuschlagen, mit dem eine zu untersuchende Probe stufenlos relativ zu einer optischen Achse eines Mikroskop-Systems orientiert werden kann. Das Probenhaltersystem ermöglicht eine präzise und stabile Ausrichtung der Probenoberfläche über alle Raumwinkel, was die Untersuchung und/oder Bearbeitung der Probe im Mikroskop-System erleichtert.

[0028] Diese Aufgabe wird gelöst mit einer Vorrichtung gemäß dem unabhängigen Anspruch 1. Vorteilhafte Ausgestaltungen sind durch die von Anspruch 1 abhängigen Ansprüche 2 bis 12 gegeben

[0029] Die Raum-Orientierung der Probe kann durch Verkippung verändert werden. Unter einer Verkippung wird die räumliche Drehung der Probe um eine Achse (sog. Kippachse) verstanden, wobei die Kippachse in der Regel senkrecht zu einer optischen Achse des Mikroskop-Systems ausgerichtet ist. Beispielsweise kann die Kippachse senkrecht zur optischen Achse der Elektronen- oder der Ionenstrahlsäule ausgerichtet sein. Unter der Raum-Orientierung wird die Ausrichtung der Probe relativ zu der/den optische/n Achse/n des Mikroskop-Systems verstanden, in dem die Probe beobachtet und/oder bearbeitet wird.

[0030] Eine weitere Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, Verfahren zum stufenlosen Einstellen des Neigungswinkels einer Probe in einem Mikroskop-System vorzuschlagen, wobei die Probe in eine beliebige Raumrichtung geneigt werden kann.

[0031] Diese Aufgabe wird gelöst durch den unabhängigen Anspruch 13, sowie den abhängigen Anspruch 14.

[0032] Die vorliegende Erfindung betrifft außerdem ein Computerprogrammprodukt nach Anspruch 15, welches ein Mikroskop-System dazu veranlasst, das erfindungsgemäße Verfahren auszuführen.

[0033] Der Erfindung liegt die Erkenntnis zugrunde, dass in einem Probenhaltersystem durch das Zusammenwirken von mindestens zwei keilartig geformten Rotationselementen, die nacheinander in einer offenen kinematischen Kette angeordnet sind, der Neigungswinkel einer gehaltenen Probe eingestellt werden kann.

[0034] Zu diesem Zweck sind die Rotationselemente rotierbar miteinander verbunden. Durch gezieltes Rotieren der einzelnen Rotationselemente können beliebige Neigungswinkel θ (Kippwinkel) einer Probenaufnahme fläche (und somit der gehaltenen Probe) in Größe und Richtung stufenlos eingestellt werden. Vorteilhafterweise erfolgt die Verkippung der Probe relativ zu einer der optischen Achsen des Mikroskop-Systems, in dem das Probenhaltersystem verwendet wird.

[0035] Um die Probenneigung gemäß der Erfindung zu bewerkstelligen, verfügen mindestens zwei Rotationselemente des Probenhaltersystems über ein keilartiges Querschnittsprofil. Dies wird dadurch erreicht, dass das Rotationselement jeweils zwei Seitenflächen aufweist, die einander gegenüberliegen, aber nicht parallel zueinander ausgerichtet sind. Vielmehr schließen die Seitenflächen einen von null verschiedenen Winkel α ein. Der Winkel α bildet also jeweils den Keilwinkel des keilförmigen Rotationselements. Beispielsweise kann der Winkel α ein spitzer Winkel sein. Die Keilwinkel α_1 des ersten Rotationselements und α_2 des zweiten Rotationselements nehmen vorteilhafterweise einen Wert an, der größer als 0° ist und maximal 45° beträgt, beispielsweise 10° . In einer besonders vorteilhaften Ausgestaltung beträgt der Winkel $\alpha = 45^\circ$.

[0036] Die Rotationselemente können jeweils eine kreisförmige, elliptische, quadratische oder eine andersartig geformte Grundfläche aufweisen.

[0037] Das erste Rotationselement ist derart ausgestaltet, dass es auf eine Halteraufnahme fläche eines Basiselements aufgenommen werden kann. Das Basiselement kann als eine Grundplatte ausgebildet sein, die zu einer Aufnahmevorrichtung einer Probenbühne kompatibel ausgestaltet ist. Das heißt also, dass die Grundplatte des Probenhaltersystems auf die Probenbühne eines Mikroskop-Systems aufnehmbar ist.

[0038] Alternativ ist auch denkbar, dass das Probenhaltersystem in einem Mikroskop-System, verwendet wird, welches keine Probenbühne aufweist. In diesem speziellen Fall kann das erfindungsgemäße Probenhaltersystem die Funktion einer Probenbühne übernehmen. Dazu ist in einer speziellen Ausführungsform das erste Rotationselement so konfiguriert, dass es direkt in eine beliebig ausgestaltete Aufnahmevorrichtung des Mikroskop-Systems aufnehmbar ist.

[0039] Da durch abgestimmte Bewegung der wenigstens zwei Rotationselemente Verkippung und Rotation der Probe unabhängig voneinander eingestellt werden können, kann die erfindungsgemäße Funktionsweise der drehbaren Rotationselemente die Kipp- und Rotationsachsen herkömmlicher Probenbühnen ersetzen.

[0040] Weitere, exzentrische Rotationselemente können durch Bewegungen die mit der Bewegung der anderen Rotationselemente abgestimmt sind, eine laterale Verschiebung der Probe erzeugen und somit die linearen Achsen herkömmlicher Probenbühnen zur lateralen Verschiebung der Probe in bestimmten Grenzen ersetzen. Eine Verwendung von Rotationsachsen mit einem spindelförmigen Gewinde anstelle von stiftförmigen Rotationsachsen kann in bestimmten Grenzen die Höhenverstellung herkömmlicher Probenbühnen ersetzen.

[0041] Das zweite Rotationselement des Probenhaltersystems ist bei einer vorteilhaften Ausführungsform so ausgestaltet, dass es die zu untersuchende Probe aufnehmen kann. Zu diesem Zweck kann auf der oberen Seitenfläche (im Folgenden auch Probenaufnahmefläche genannt) des zweiten Rotationselements eine Probeaufnahme bereitgestellt werden.

[0042] Die Bezeichnung „oben“ bezieht sich jeweils auf eine Seitenfläche, die der Probe zugewandt ist. Im Betriebszustand, also wenn das Probenhaltersystem im Mikroskop-System verwendet wird, ist die „obere“ Seitenfläche demzufolge so angeordnet, dass sie dem einfallenden Teilchenstrahl zugewandt ist. Als „untere“ Seitenfläche wird hingegen die Seitenfläche eines Rotationselements bezeichnet, die der Halteraufnahmefläche (also dem Basiselement) zugewandt ist.

[0043] Die Rotationselemente des Probenhaltersystems verfügen jeweils über eine Rotationsachse, um die das jeweilige Rotationselement drehbar angeordnet ist. Das heißt, dass das erste Rotationselement eine erste Rotationsachse aufweist, um die es um den Winkel β_1 rotiert werden kann. Das zweite Rotationselement weist eine zweite Rotationsachse auf, um die das zweite Rotationselement um den Winkel β_2 drehbar ist.

[0044] Dabei ist das zweite Rotationselement drehbar mit dem ersten Rotationselement verbunden, wohingegen das erste Rotationselement drehbar mit dem Basiselement verbunden werden kann. Die Rotationselemente sind also übereinandergestapelt und gemeinsam auf das Basiselement aufnehmbar. Dadurch stellt das erfindungsgemäße Probenhaltersystem mindestens zwei rotatorische Bewegungsfreiheitsgrade zur Bewegung der aufgenommenen Probe zur Verfügung.

[0045] Die Winkel β_1 und β_2 sind frei wählbar oder in bestimmten Grenzen wählbar. Bei einer speziellen Ausführungsform ist auch denkbar, dass einer der Winkel β fix ist.

[0046] In einer alternativen Ausführungsform nimmt das zweite Rotationselement statt einer Probe ein drittes Rotationselement rotierbar auf, wobei dann dem dritten Rotationselement die Funktion zukommt, die Probe aufzunehmen und zu halten. Bei dieser Ausführungsform dient also die obere Seitenfläche des dritten Rotationselements als Probenaufnahmefläche (im Folgenden auch Probenaufnahmefläche des dritten Rotationselements genannt).

[0047] Das dritte Rotationselement weist eine dritte Rotationsachse aus, um die es drehbar um den Rotationswinkel β_3 angeordnet ist.

[0048] Das dritte Rotationselement ist vorteilhafterweise so ausgestaltet, dass es eine zusätzliche Rotation der Probe ermöglicht, ohne dass der Grad der Kippung verändert wird. Zu diesem Zweck ist es vorteilhaft, wenn das dritte Rotationselement zylinderförmig ausgebildet ist und die dritte Rotationsachse parallel zur Zylinderachse verläuft sowie senkrecht zur oberen Seitenfläche des zweiten Rotationselements. Besonders vorteilhaft ist es, wenn die obere Seitenfläche und die untere Seitenfläche des dritten Rotationselements parallel zueinander ausgerichtet sein. Das heißt also, dass das dritte Rotationselement nicht keilförmig ausgebildet ist. Dadurch wird sichergestellt, dass die Stärke der Kippung der Probe beibehalten wird, auch wenn das dritte Rotationselement gedreht wird.

[0049] Die Drehung der Probe mittels des dritten Rotationselements hat den Vorteil, dass die Probe auch in gekipptem Zustand optimal für Beobachtung und/oder Bearbeitung ausgerichtet werden kann

[0050] Das dritte Rotationselement kann eine kreisförmige, elliptische oder quadratische Grundform aufweisen oder eine andersartige Grundform.

[0051] Es ist darüber hinaus denkbar, dass das Probenhaltersystem noch weitere Rotationselemente umfasst, die in der beschriebenen Weise ausgestaltet sind und zusammenwirken, um eine Probe kippbar und rotierbar auf dem Probenhaltersystem zu halten.

[0052] Aufgrund des keilartigen Profils der Rotationselemente und weil die beiden rotatorischen Bewegungsfreiheitsgrade aufeinander abgestimmt werden können, lassen sich mit dem Probenhaltersystem Stärke und Richtung der Verkippung der gehaltenen Probe stufenlos einstellen. Wenn das Probenhaltersystem auf einer Mehr-Achsen-Probenbühne montiert ist, stellt diese dann üblicherweise weitere Bewegungsfreiheitsgrade zur Verfügung.

[0053] Grundsätzlich können der Keilwinkel α_1 des ersten Rotationselements und der Keilwinkel α_2 des zweiten Rotationselements gleich groß sein. Es ist aber auch möglich, dass die Winkel α_1 und α_2 unterschiedlich groß sind, so dass die Rotationselemente unterschiedlich steile Keilformen aufweisen. Außerdem ist denkbar, dass ein Set mit verschiedenen Rotationselementen verwendet wird, die jeweils unterschiedliche Keilwinkel α_x aufweisen. Dies ist besonders vorteilhaft, um unterschiedliche Kippwinkel je nach Anwendungsfall flexibel einstellen zu können.

[0054] Die Erfindung betrifft außerdem ein Verfahren zum Einstellen des Neigungswinkels einer Probe, die mit Hilfe des beschriebenen Probenhaltersystems in einem Mikroskop-System gehalten wird.

[0055] Durch gezieltes Verändern der Rotationswinkel β_1 und β_2 durch Rotieren des ersten und der zweiten Rotationselement überlagern sich die Rotationswinkel β_1 und β_2 und die Keilwinkel α_1 und α_2 , so dass die Neigung der Probe relativ zur Halteraufnahmefläche des Basiselements und relativ zu der oder den optischen Achsen einstellbar ist.

[0056] Wenn das verwendete Probenhaltersystem außerdem ein drittes Rotationselement ohne Keilprofil umfasst, kann nicht nur die Neigung der Probe, sondern auch die Ausrichtung der Probe relativ zu der/den optische/n Achse/n beliebig eingestellt werden.

Ausführungsbeispiele

[0057] Nachfolgend werden Ausführungsbeispiele der Erfindung anhand von Figuren erläutert. Zur Erläuterung der Komponenten wird deshalb auch auf die gesamte, jeweils vorangehende und nachfolgende Beschreibung Bezug genommen.

Fig. 1 zeigt als Explosionsdarstellung eine vorteilhafte Ausführungsform des erfindungsgemäßen Probenhaltersystems, wobei das Probenhaltersystem drei Rotationselemente umfasst.

Fig. 2 zeigt das Probenhaltersystem der **Fig. 1** in zwei verschiedenen Betriebszuständen (**Fig. 2a**, **Fig. 2c**) und in der Draufsicht (**Fig. 2b**).

Fig. 3 zeigt eine alternative Ausführungsform, die nur zwei Rotationselemente umfasst.

Fig. 4 zeigt die Abhängigkeit des einstellbaren Kippwinkels einer aufgenommenen Probe von den Rotationswinkeln β_1 und β_2 , bezogen auf die x-Richtung des Koordinatensystems des Basiselements.

Fig. 5 zeigt die Abhängigkeit des Kippwinkels einer aufgenommenen Probe von den Rotationswinkeln β_1 und β_2 , bezogen auf die y-Richtung des Koordinatensystems des Basiselements.

Fig. 6 zeigt beispielhaft ein Zweistrahlgerät, das eingerichtet ist, ein erfindungsgemäßes Probenhaltersystem aufzunehmen.

Fig. 7 zeigt ein Flussdiagramm des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Verkippen einer Probe mit Hilfe des Probenhaltersystems.

[0058] **Fig. 1** zeigt eine vorteilhafte Ausführungsform des Probenhaltersystems 20, bei der das Probenhaltersystem 20 drei Rotationselemente 1, 8, 15 aufweist, die zusammenwirken.

[0059] Das Probenhaltersystem 20 umfasst ein erstes Rotationselement 1, das eine erste Seitenfläche (obere Seitenfläche) 2 und eine zweite Seitenfläche (untere Seitenfläche) 3 aufweist. Die erste und die zweite Seitenfläche 2, 3 sind gegenüberliegend angeordnet und umschließen einen Winkel α_1 . Mit anderen Worten: Das erste Rotationselement 1 weist die Form eines Keils auf, bei dem zwei Seitenflächen 2, 3 unter einem spitzen Winkel α_1 zusammenlaufen. Wesentlich dabei ist, dass die erste und die zweite Seitenfläche 2, 3 nicht parallel zueinander ausgerichtet sind, sondern aufeinander zulaufen und einen Winkel α_1 bilden.

[0060] Das keilartig ausgebildete Rotationselement 1 kann, wie in **Fig. 1** dargestellt, im Querschnitt die Form eines unregelmäßigen, rechtwinkligen Dreiecks aufweisen. Die Erfindung ist jedoch nicht auf eine solche Ausformung beschränkt. Es ist auch denkbar, dass die Keilform im Querschnittsprofil keinen rechten Winkel aufweist, sondern durch ein beliebiges spitzwinkliges Dreieck gebildet wird. Dabei kann das Querschnittsprofil in Form eines unregelmäßigen oder eines gleichschenkligen oder eines gleichseitigen Dreiecks ausgebildet sein. Die gegenüber dem Winkel α liegende Seitenfläche des Rotationselements kann beliebig ausgestaltet sein, beispielsweise als Gerade (im Querschnittsprofil) oder als Kreisabschnitt (im Querschnittsprofil).

[0061] Das erste Rotationselement 1 weist eine Rotationsachse R1 auf, um die das erste Rotationselement 1 rotierbar angeordnet ist. Besonders vorteilhaft ist es, wenn das erste Rotationselement 1 rotierbar mit einem Basiselement 4 verbunden werden kann, wobei die Drehung mittels der Rotationsachse R1 bewerkstelligt wird.

[0062] Das Basiselement 4 kann als eine Grundplatte 4 oder als eine Probenbühne eines Mikroskop-Systems ausgebildet sein.

[0063] Unter einer Grundplatte 4 wird ein Bauteil verstanden, das einerseits auf der Probenbühne des Mikroskop-Systems montierbar ist und andererseits das Rotationselement 1 aufnehmen kann. Als besonders vorteilhaft hat es sich erwiesen, wenn die Grundplatte 4 beispielsweise die Form eines flachen Quaders aufweist. Die Grundplatte 4 kann aber auch zylinderförmig ausgebildet sein oder die Form eines Vielecks oder eine andere Form aufweisen. In jedem Fall sollte die Form der Grundplatte so gewählt werden, dass die Bewegung der Rotationselemente nicht durch die Grundplatte behindert wird.

[0064] Bei der alternativen Ausführungsform dient die Probenbühne des Mikroskop-Systems als Basiselement 4. In diesem Fall wird das erste Rotationselement 1 direkt rotierbar auf die Probenbühne montiert.

[0065] Den beschriebenen Ausführungsformen des Basiselements 4 ist gemeinsam, dass das Basiselement 4 jeweils eine Probenhalteraufnahmefläche 5 (im Folgenden auch Halteraufnahmefläche genannt) aufweist, die beim Betrieb des Probenhaltersystems 20 in einem Mikroskop-System senkrecht zur optischen Achse des Mikroskop-Systems angeordnet werden kann.

[0066] In einer bevorzugten Ausführungsform des Probenhaltersystems ist das erste Rotationselement 1 so konfiguriert, dass seine Rotationsachse R1 senkrecht zur Halteraufnahmefläche 5 ausgerichtet ist. Zu diesem Zweck ist das erste Rotationselement 1 so konfiguriert, dass die zweite Seitenfläche 3 auf die Halteraufnahmefläche 5 aufnehmbar ist. Hierbei können die zweite Seitenfläche 3 und die Halteraufnahmefläche 5 so angeordnet werden, dass sie einander gegenüber liegen und parallel zueinander ausgerichtet sind. Dadurch ist die Rotationsachse R1 sowohl senkrecht zur zweiten Seitenfläche 3 (des ersten Rotationselements 1) als auch senkrecht zur Halteraufnahmefläche 5 (des Basiselements 4) ausgerichtet.

[0067] Die genaue Ausrichtung (Raum-Orientierung) des Basiselements 4 und somit auch der Halteraufnahmefläche 5 kann mit einem Koordinatensystem beschrieben werden. Dieses Koordinatensystem des Basiselements weist die Raumachsen z_0 , x_0 und y_0 auf, die jeweils orthogonal zueinander angeordnet sind.

[0068] Dabei ist es besonders vorteilhaft, wenn die Halteraufnahmefläche 5 des Basiselements 4 in einer Ebene angeordnet, die von zwei Raumachsen dieses Koordinatensystems aufgespannt wird, beispielsweise von x_0 und y_0 .

[0069] Die im Folgenden beschriebenen Änderungen der Raum-Orientierung der Probe 16, die mit dem erfindungsgemäßen Probenhaltersystem bewerkstelligt werden können, beziehen sich jeweils auf das Koordinatensystem des Basiselements 4.

[0070] Als vorteilhaft hat es sich erwiesen, wenn die Rotationsachse R1 des ersten Rotationselements 1 achsenparallel zu einer der Achsen des Basiselements 4 ausgerichtet. Dabei ist es besonders vorteilhaft, wenn die Rotationsachse R1 parallel zur Achse z_0 verläuft.

[0071] Um das erste Rotationselement 1 mit dem Basiselement 4 rotierbar zu verbinden, kann das Basiselement 4 beispielsweise eine Bohrung 6 aufweisen, in die eine mit dem ersten Rotationselement 1 verbundene stiftartige Verbindung 7 passgenau eingeführt werden kann. Die Längsachse des Stifts 7 entspricht dann der Rotationsachse R1, um die das erste Rotationselement 1 relativ zum Basiselement 4 drehbar ist. Hierbei ist das erste Rotationselement 1 relativ zur Halteraufnahmefläche 5 um einen Rotationswinkel β_1 rotierbar. Die Rotationsachse R1 ist senkrecht zur y_0 -Achse des Basiselement 4 ausgerichtet.

[0072] Außerdem weist das Probenhaltersystem 20 ein zweites Rotationselement 8 auf, das ebenfalls zwei gegenüberliegende Seitenflächen, nämlich eine dritte Seitenfläche 9 (obere Seitenfläche) und eine vierte Seitenfläche 10 (untere Seitenfläche) aufweist, die einen spitzen Winkel α_2 zueinander bilden. Das heißt, auch das zweite Rotationselement 8 hat eine keilartige Form, die genauso ausgestaltet sein kann, wie oben für das erste Rotationselement 1 beschrieben.

[0073] Das zweite Rotationselement 8 weist eine Rotationsachse R2 auf, um die das zweite Rotationselement 8 rotierbar angeordnet ist, wobei das zweite Rotationselement 8 rotierbar mit dem ersten Rotationselement 1 verbunden ist. Die Rotationsachse R2 ist senkrecht zur vierten Seitenfläche 10 des zweiten Rotationselements 8 ausgerichtet.

[0074] Besonders vorteilhaft ist es, wenn die vierte Seitenfläche 10 und die erste Seitenfläche 2 des ersten Rotationselements so angeordnet sind, dass sie einander gegenüber liegen und parallel zueinander ausgerichtet sind. Die Rotationsachse R2 des zweiten Rotationselements 8 ist dann nicht nur senkrecht zur vierten Seitenfläche 10 ausgerichtet, sondern auch senkrecht zur ersten Seitenfläche 2.

[0075] Außerdem umfasst das Probenhaltersystem 20 ein drittes Rotationselement 15, das eine Probenaufnahmefläche 17 zum Aufnehmen einer Probe sowie eine gegenüberliegende Seitenfläche 18 aufweist.

[0076] Das dritte Rotationselement 15 ist dazu konfiguriert, eine zu untersuchende Probe 16 aufzunehmen. Dazu wird die Probe 16 auf die Probenaufnahmefläche 17 (obere Seitenfläche) des dritten Rotationselements 15 aufgebracht, zum Beispiel mit Hilfe einer entsprechend ausgestalteten Probenaufnahme (nicht dargestellt). So kann eine Klemmvorrichtung vorhanden sein, wie zum Beispiel eine Madenschraube. Alternativ ist denkbar, dass die Probe 16 auf die Probenaufnahme oder unmittelbar auf die Probenaufnahmefläche 17 des dritten Rotationselements aufgeklebt wird, um sie zu befestigen.

[0077] Das dritte Rotationselement 15 weist eine Rotationsachse R3 auf, um die das dritte Rotationselement 15 relativ zum zweiten Rotationselement 8 um einen Winkel β_3 rotiert werden kann. Dazu ist das dritte Rotationselement 15 rotierbar mit dem zweiten Rotationselement 8 verbunden, wobei die dritte Rotationsachse R3 senkrecht zur Seitenfläche 18 des dritten Rotationselements 15 ausgerichtet ist.

[0078] Hierbei ist es vorteilhaft, wenn die Seitenfläche 18 des dritten Rotationselements und die dritte Seitenfläche 9 des zweiten Rotationselements einander gegenüberliegend angeordnet und parallel zueinander ausgerichtet sind, so dass die Rotationsachse R3 senkrecht zur Seitenfläche 18 des dritten Rotationselements und senkrecht zur dritten Seitenfläche 9 des zweiten Rotationselements 9 verläuft.

[0079] Als besonders vorteilhaft hat es sich erweisen, wenn das dritte Rotationselement 15 eine stiftartige Verbindung 19 aufweist, die in eine Bohrung 13 gleichen Durchmessers im Zentrum der oberen Seitenfläche 9 des zweiten Rotationselements 8 eingeführt werden kann. Der Verbindungsstift 19 dient als Rotationsachse R3, mit der das dritte Rotationselement 15 koaxial zur Mittelachse der oberen Seitenfläche 9 des zweiten Rotationselements 8 um den Winkel β_3 relativ zum zweiten Rotationselement 8 rotierbar ist.

[0080] Die Grundflächen der Rotationselemente können zum Beispiel kreisrund (wie in **Fig. 1** bis **Fig. 3** dargestellt) oder elliptisch sein. Die Ausgestaltung der Rotationselemente ist jedoch nicht auf die genannten Formen beschränkt. Vielmehr ist auch denkbar, dass die Rotationselemente beliebige andere Formen aufweisen.

[0081] Anstelle der beschriebenen Verbindung der Rotationselemente mit Bohrungen und Stiftverbindungen kann eine drehbare Lagerung verwendet werden. Dazu können Kugellager oder andere geeignete mechanische Verbindungen eingesetzt werden.

[0082] Die beschriebenen Rotationselemente 1, 8, 15 wirken derart zusammen, dass sie eine offene kinematische Kette bilden. Dazu sind die Rotationselemente 1, 8, 15 in einer bestimmten Reihenfolge, d. h. nacheinander angeordnet. Die zu untersuchende Probe wird dabei auf das letzte Rotationselement der Kette aufgenommen.

[0083] Die Anordnung in einer offenen kinematischen Kette bedeutet, dass ein Rotationselement jeweils nicht nur die von ihm bewerkstelligte Rotationsbewegung ausführt, sondern passiv auch die Bewegungen der Bewegungselemente, die in der Kette vor besagtem Rotationselement angeordnet sind. Mit anderen Worten: Die Rotationsachsen R1, R2 ... Rx des Probenhaltersystems sind übereinandergestapelt (sogenanntes axis stacking).

[0084] Wenn das Probenhaltersystem 20 während des Betriebs auf eine Probenbühne aufgenommen ist, umfasst die offene kinematische Kette dann auch die translatorischen (x-, y- und z-Achsen) und rotatorischen Bewegungselemente (R-, T-Achse), die die Probenbühne zur Verfügung stellt.

[0085] Die bei der Beschreibung der Rotationselemente 1, 8, 15 verwendeten Bezeichnungen „obere“ Seitenfläche und „untere“ Seitenfläche eines Rotationselements bezieht sich jeweils auf die Anordnung des Rotationselements im Achsenstapel. In diesem Zusammenhang bezeichnet „unten“ die dem Basiselement zugewandte Seite des jeweiligen Rotationselements. „Oben“ bezeichnet hingegen die der Probenaufnahme (d. h. der Probe) zugewandte Seite des Rotationselements. Demzufolge ist die obere Seitenfläche stets diejenige, die während des Betriebs im Mikroskop-System dem einfallenden Teilchenstrahl zugewandt ist, wohingegen die untere Seitenfläche vom einfallenden Teilchenstrahl abgewandt ist.

[0086] Fig. 2 zeigt das Probenhaltersystem 20 der Fig. 1 in Funktion, und zwar in zwei verschiedenen, beispielhaften Betriebszuständen.

[0087] Fig. 2a zeigt den Fall, dass $\alpha_1 = -\alpha_2$, während $\beta_1 = 0^\circ$ und $\beta_2 = 180^\circ$. In diesem Fall ist der Kippwinkel θ der Probenaufnahmefläche 17 (des dritten Rotationselements), die die Probe hält, in alle Richtungen 0° . Die Probe 16 ist also in keiner Richtung verkippt, so dass während der mikroskopischen Beobachtung oder Untersuchung der Teilchenstrahl im Wesentlichen senkrecht auf die Probenoberfläche auftreffen kann.

[0088] Zur Verdeutlichung der Raumrichtungen ist in Fig. 2b die Situation in der Draufsicht dargestellt. Bei dieser Darstellung ist die z-Achse senkrecht zur Zeichenebene angeordnet.

[0089] Fig. 2c zeigt den zu Fig. 2a entgegengesetzten Fall, bei dem sich die Keilwinkel der Rotationselemente addieren.

[0090] Hierbei gilt: $\alpha_1 = -\alpha_2$, während $\beta_1 = 0^\circ$ und auch $\beta_2 = 0^\circ$. Daraus ergibt sich in y-Richtung des Basiselements der maximale Kippwinkel θ von $|\alpha_1| + |\alpha_2|$.

[0091] Mit anderen Worten: Der maximale Kippwinkel in y-Richtung entspricht der Summe der Beträge der Keilwinkel $\alpha_1 \dots \alpha_x$. In x-Richtung des Basiselements beträgt der Kippwinkel der Probe 16 dagegen 0° .

[0092] Die Erfindung ist jedoch nicht auf die oben beschriebene Ausführungsform mit drei Rotationselementen beschränkt. In einer anderen vorteilhaften Ausführungsform entfällt das dritte Rotationselement, wie in Fig. 3 dargestellt. In diesem Fall ist das zweite Rotationselement 8 dazu eingerichtet, die Probe aufzunehmen. Zu diesem Zweck kann das zweite Rotationselement 8 auf der oberen Seitenfläche 9 eine Klemmvorrichtung (z. B. eine Madenschraube) oder eine andersartig ausgeführte Probenaufnahme umfassen, in die die Probe aufgenommen werden kann. Alternativ kann die Probe aufgeklebt werden.

[0093] Es ist aber auch denkbar, dass das Probenhaltersystem mehr als drei Rotationselemente aufweist. In einem solchen Fall umfasst das Probenhaltersystem außer den in Fig. 1 gezeigten drei Rotationselementen weitere Rotationselemente, die in analoger Weise ausgebildet und rotierbar relativ zueinander angeordnet sind.

[0094] Wie in Fig. 2 und Fig. 3 verdeutlicht, ergeben sich Kippung und Rotation einer vom erfindungsgemäßen Probenhaltersystem 20, 21 gehaltenen Probe 16 aus der Kombination aller Keilwinkel α_x und aller Rotationswinkel β_x der Rotationselemente der offenen kinematischen Kette.

[0095] Im einfachsten Fall umfasst das Probenhaltersystem 21 nur zwei Rotationselemente 1,8. Durch Überlagerung der Winkel α_1 , α_2 , β_1 und β_2 kann die Neigung der oberen Seitenfläche 9 des zweiten Rotationselements 8 relativ zum Basiselement 4 (genauer gesagt relativ zur Halteraufnahmefläche 5 des Basiselements 4) in ihrer Richtung und Stärke frei eingestellt werden.

[0096] Dies trifft auch zu, wenn ein drittes Rotationselement 15 vorhanden ist, wie in Fig. 2 gezeigt. Da das dritte Rotationselement 15 bei der in Fig. 1 und Fig. 2 gezeigten Ausführungsform keine Keilform aufweist (obere Seitenfläche 17 und untere Seitenfläche 18 verlaufen parallel zueinander), bestimmt die Überlagerung der genannten Winkel auch die Neigung der oberen Seitenfläche (Probenaufnahmefläche) 17 des dritten Rotationselements, die die Probe 16 trägt.

[0097] Die Kippwinkel in x- und y-Richtung des Basiselements hängen von den Keilwinkeln α_1 und α_2 ab. Die mathematischen Zusammenhänge zwischen diesen Winkeln lassen sich daher analytisch herleiten.

[0098] Beispielsweise beträgt der Kippwinkel der oberen Seitenfläche (dritte Seitenfläche) 9 des zweiten Rotationselements 8 in x-Richtung des Basiselements:

$$-\arcsin((\sin(\beta_1) \cdot \cos(\alpha_1) \cdot \cos(\beta_2) + \sin(\beta_2) \cdot \cos(\beta_1)) \cdot \sin(\alpha_2) + \sin(\alpha_1) \cdot \sin(\beta_1) \cdot \cos(\alpha_2)) + \pi/2.$$

[0099] Der Kippwinkel der oberen Seitenfläche (dritte Seitenfläche) des zweiten Rotationselements in y-Richtung des Basiselements beträgt:

$$-\arcsin((\sin(\beta_1) \cdot \sin(\beta_2) - \cos(\alpha_1) \cdot \cos(\beta_1) \cdot \cos(\beta_2)) \cdot \sin(\alpha_2) - \sin(\alpha_1) \cdot \cos(\alpha_2) \cdot \cos(\beta_1)) + \pi/2.$$

[0100] Bei Änderungen von β_1 und β_2 dreht sich die montierte Probe mit. Diese Drehung der Probe kann jedoch durch Drehung des dritten Rotationselements um Rotationsachse R3 um einen Winkel β_3 wieder in die ursprüngliche Raum-Orientierung rotiert werden. Das bedeutet also, dass das optionale dritte Rotationselement einen zusätzlichen Bewegungsfreiheitsgrad zur Bewegung der Probe zur Verfügung stellt. Besonders vorteilhaft ist hierbei, dass der eingestellten Kippwinkel nicht verändert wird, da die Winkel β_1 und β_2 von der Rotation um R3 nicht beeinflusst werden.

[0101] Der zu wählende Winkel β_3 hängt ebenfalls von den Winkel α_1 , α_2 , β_1 und β_2 ab und kann analog zu den obenstehenden Formen hergeleitet werden.

[0102] Besonders vorteilhaft ist es, wenn die Rotation der Rotationselemente motorisch erfolgt. Zu diesem Zweck können in die Grundplatte oder in die Probenbühne geeignete Motoren eingebaut sein. Alternativ können die Antriebsmotoren auch außerhalb des Probenhaltersystems angeordnet sein. Somit ist denkbar, die Einstellung der Probenneigung in-situ in der Probenkammer des Mikroskop-Systems durch Fernsteuerung der Motoren von außen zu bewerkstelligen, ohne dass die Rotationselemente manuell bewegt werden müssen. Hierzu kann die Softwaresteuerung des Mikroskop-Systems eingesetzt werden.

[0103] In einer speziellen Ausführungsform ist außerdem denkbar, dass die Rotation der Rotationselemente passiv erfolgt, und zwar durch Ausnutzung der Bewegung der Probenbühne über eine geeignete Mitnehmer-Vorrichtung.

[0104] Weiterhin ist bei dem erfindungsgemäßen Probenhaltersystem denkbar, dass die eingesetzten Rotationselemente verschiedene Keilwinkel α aufweisen. Das heißt, dass die Keilform der Rotationselemente unterschiedlich stark ausgeprägt ist. So können Rotationselemente kombiniert werden, die unterschiedliche Winkel α aufweisen. Dadurch kann der maximal mit dem Probenhaltersystem erreichbaren Neigungswinkel der Probenaufnahmefläche je nach Anwendungsfall und Art der Probe variiert werden.

[0105] Wenn die Probe genau im Zentrum des zweiten Rotationselements montiert wird, ist dort die Höhe der Probenoberfläche über die Oberfläche des Basiselements unabhängig von den Kippwinkeln. Die Probenoberfläche ist dort somit euzentrisch, das heißt, Änderungen der Kippwinkel bewirken keine Verschiebung dieser Probenstelle.

[0106] Es ist denkbar, dass durch weitere mechanische Ergänzungen eine Euzentrik für alle Kipp- und Rotationswinkel bei beliebiger Positionierung der Probe auf dem zweiten bzw. dritten Rotationselement erreicht wird. Eine solche mechanische Ergänzung kann beispielsweise die Lagerung der Rotationselemente auf Gewindespindeln mit geeigneter Gewindesteigung anstelle von einfachen stiftartigen Verbindungen sein. Eine andere Möglichkeit ist die gekippte Lagerung des ersten Rotationselements auf dem Basiselement oder eine keilförmige Ausführung des dritten Rotationselement oder die Kombination dieser Möglichkeiten.

[0107] Als besonders vorteilhaft hat es sich erwiesen, wenn jedes der Rotationselemente 1, 8, 15 eine Skala 11 aufweist, wie in **Fig. 1** und **Fig. 2** dargestellt. Die Skalen 11 dienen dazu, die Winkel β_1 und β_2 aufeinander abgestimmt so einzustellen, dass eine aufgenommene Probe 16 die gewünschte Verkippung und Drehung relativ zum Koordinatensystem der Halteraufnahmefläche 5 (d. h. relativ zum Basiselement) einnimmt. Die Skalen 11 sind so ausgeführt, dass sie dem mathematischen Zusammenhang zwischen den gewünschten Neigungswinkeln und den Keilwinkeln α_1 bis α_x sowie den Rotationswinkeln β_1 bis β_x entsprechen.

[0108] Durch entsprechende Ausführung der Skalen an den Rotationselementen können die Kippwinkel der oberen Seitenfläche des zweiten Rotationselements in x- und y-Richtung des Basiselements gezielt und eindeutig eingestellt werden. Ebenso kann der Rotationswinkel des optionalen dritten Rotationselements mithilfe der am dritten Rotationselement befindlichen Skala definiert eingestellt werden.

[0109] Die Einstellung der Kippwinkel θ der Probenaufnahmefläche (und damit der Probe) geschieht mit einer Untersetzung, die umso größer ist, je kleiner die Keilwinkel α_1 und α_2 sind. Deshalb kann das erfindungsgemäße Probenhaltersystem wesentlich präziser eingestellt werden als bisher bekannte verstellbare Kipphalter.

[0110] Beim vorliegenden Probenhaltersystem werden nämlich die Kippwinkel durch Drehung keilförmiger Rotationselemente erzielt, so dass nicht nur die Kippwinkel selbst, sondern auch deren Fehler über die oben angegebenen mathematischen Zusammenhänge von den Winkelskalen abhängen. Da die zur Erzielung eines bestimmten Kippwinkels nötigen Rotationswinkeländerungen größer sind als die dadurch bewirkten Kippwinkeländerungen selbst, sind auch die Einstellfehler in gleichem Maß reduziert.

[0111] Da die gewünschten Kippwinkel und die gegebenenfalls gewünschte Gegenrotation der Probe um β_3 von α_1 und α_2 , sowie von β_1 und β_2 abhängen, lässt sich eine mathematische Formulierung für die Ausführung der Skalen finden.

[0112] Beispielsweise könnte mit einer ersten Skala die Gesamtverkippung eingestellt werden, während eine zweite Skala die relativen Anteile der Verkippungen in x- und y-Richtung festlegt.

[0113] Sollte sich keine Skaleneinteilung finden lassen, die für einen ungeübten Benutzer hinreichend einfach zu bedienen sind, kann die Berechnung der einzustellenden Drehwinkel durch eine Software erfolgen.

[0114] Besonders vorteilhaft ist, dass das Probenhaltersystem spielfrei ist, wenn alle Rotationselemente fixiert sind. Bei der motorisierten Version des Probenhaltersystems kann Spielfreiheit beispielsweise durch Reibungshaftung der Rotationselemente oder durch Hemmung der Drehmotoren erzielt werden.

[0115] **Fig. 4** und **Fig. 5** illustrieren die Abhängigkeit des Probenkippwinkels in den Raumrichtungen x und y, bezogen auf ein übergeordnetes Bezugskoordinatensystem. Dabei beziehen sich **Fig. 4** und **Fig. 5** auf den Fall, dass beide Keilwinkel $\alpha = 45^\circ$ betragen, das heißt, wenn $\alpha_1 = 45^\circ$ und $\alpha_2 = -45^\circ$.

[0116] Dargestellt ist jeweils die Abhängigkeit des Kippwinkels der oberen Seitenfläche des zweiten Rotationselements von den gewählten Rotationswinkeln β_1 und β_2 .

[0117] In **Fig. 4** bezieht sich die Angabe des Kippwinkels auf die x-Richtung des Koordinatensystems des Basiselements. Alle Winkel in der Figur sind in Radian (rad) dargestellt.

[0118] In **Fig. 5** bezieht sich die Angabe des Kippwinkels auf die y-Richtung des Koordinatensystems des Basiselements, ansonsten gelten die gleichen Bedingungen wie für **Fig. 4**.

[0119] Besonders vorteilhaft kann das erfindungsgemäße Probenhaltersystem bei der Bearbeitung von Proben in einem SEM-FIB-Kombinationsgerät mit Laser-Vorrichtung eingesetzt werden. Bei der Probenbearbeitung mit gepulstem Laser will man oft Querschnitte herstellen, die perfekt senkrecht zur Probenoberfläche orientiert sind. Prinzipbedingt entstehen aber immer Querschnitte, die um bis zu 20° zur Senkrechten geneigt sind. Der genaue Winkel der Abweichung hängt vom Probenmaterial und den verwendeten Laserparametern ab. Da der Laserstrahl an sich oftmals nicht auf einen anderen Einfallswinkel eingestellt werden kann, können senkrechte Querschnitte nur durch Gegenkippen der Probe erreicht werden. Die Erfindung stellt nun eine kompakte, genau einstellbare und bei entsprechender konstruktiver Ausführung niedrig aufbauende Lösung dar (für diese Anwendung würde z.B. $\alpha_1 = -\alpha_2 = 10^\circ$ ausreichen).

[0120] Eine weitere wichtige Anwendung der Laseroption ist das Ausschneiden von Säulen („pillars“) aus der vollen Probe, wobei die Säulen wenige zehn bis wenige hundert Mikrometer groß sind. Hier will man möglichst zylinderförmige Säulen schneiden, was aus dem erwähnten Grund nur durch Gegenkippen der Probe möglich ist. Dabei müsste die Kippachse gegenläufig zu dem auf Kreisbahnen geführten Laserstrahl rotieren. Dies kann mit der motorisierten Version des erfindungsgemäßen Probenhaltersystems realisiert werden.

[0121] Eine andere vorteilhafte Anwendung des Probenhaltersystems ist die Analyse von Proben mit einem ToF-SIMS (Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectroscopy)-Detektor. Hierbei kann es sein, dass der Detektor auf einer anderen Achse als der anregende FIB-Strahl liegt, zum Beispiel seitlich und/oder in einer anderen Höhe. Bei Proben, die eine Oberflächentopographie aufweisen, führt das zu einer inhomogenen Detektion. Da die vorliegende Erfindung weitere Bewegungsfreiheitsgrade zur Verfügung stellt, so dass die Proben relativ zum Detektor anders ausgerichtet werden kann, kann dieses vermieden werden.

[0122] Außerdem ist denkbar, das beschriebene Probenhaltersystem als Alternative zu Rocking-Stage-Anwendungen einzusetzen. Rocking-Stage-Verfahren werden verwendet, um beim Erzeugen von Probenquerschnitten mit dem fokussierten Ionenstrahl das sogenannte „curtaining“ zu vermeiden, indem die Probenbühne während des Materialabtrags kontinuierlich euzentrisch hin- und hergekippt wird. Das Hin- und Herschaukeln der Probenbühne kann durch das Verkippen mit dem erfindungsgemäßen Probenhaltersystem ersetzt werden.

[0123] Fig. 6 zeigt am Beispiel eines FIB-SEM-Kombinationsgeräts 60 ein Mikroskop-System, in dem das erfindungsgemäße Probenhaltersystem verwendet werden kann und in dem das erfindungsgemäße Verfahren ausgeführt werden kann.

[0124] Um eine zu untersuchende Probe 75 für eine mikroskopische Untersuchung oder Bearbeitung bereit zu stellen, wird die Probe 75 von einem erfindungsgemäßen Probenhaltersystem 74 gehalten. Das Probenhaltersystem 74 wird auf eine Vorrichtung in einer Probenkammer 69 des Mikroskop-Systems 60 montiert, beispielsweise auf eine Probenbühne 73.

[0125] Die Probenbühne 73 ist in der Probenkammer 69 des FIB-SEM-Kombinationsgeräts 60 angeordnet, wo während des Betriebs Vakuumbedingungen herrschen.

[0126] Besonders vorteilhaft ist, wenn die Probenbühne 73 als Mehr-Achsen-Probenbühne ausgestaltet ist, wodurch mehrere translatorische und rotatorische Bewegungsfreiheitsgrade zur Verfügung gestellt werden. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn die Probenbühne 73 als Fünf-Achsen-Tisch ausgebildet ist, der die translatorischen Achsen x, y und z und die Rotationsachsen R und T (Kippachse) umfasst. Dabei sind die genannten Translationsachsen jeweils senkrecht zueinander ausgerichtet.

[0127] Die zu untersuchende Probe 75 kann mit einem Mehr-Achsen-Tisch also in den drei Raumrichtungen x, y und z verfahren werden, um die Ortslage der Probe 75 zu ändern. Unter der Ortslage wird die Positionierung der Probe 75 im dreidimensionalen Raum verstanden. Die exakte Ortslage kann durch Angabe von x-, y- und z-Koordinaten beschrieben werden.

[0128] Außerdem kann die Raum-Orientierung, d. h. die Ausrichtung der Probe 75 relativ zu der oder den optischen Achsen des Mikroskop-Systems verändert werden, indem die Probe 75 mittels der Rotationsachsen R und T gedreht und/oder gekippt wird.

[0129] Dabei ist es besonders vorteilhaft, wenn die Probenbühne als euzentrische Probenbühne 73 ausgebildet ist. Das bedeutet, dass eine auf der Probenbühne 73 angeordnete Probe 75, die im euzentrischen Punkt lokalisiert ist, gekippt werden kann, ohne dass die Probe 75 sich dabei lateral bewegt. Alternativ kann die Probenbühne als sog. super-euzentrische Sechs-Achsen-Bühne ausgebildet sein, die eine zusätzliche M-Achse aufweist.

[0130] Das Mikroskop-System 60 umfasst zwei Teilchenstrahlsäulen, nämlich eine Elektronenstrahlsäule 61 zur Erzeugung eines Elektronenstrahls und eine Ionenstrahlsäule 81 zum Erzeugen eines Ionenstrahls. Beide Teilchenstrahlen sind auf die zu bearbeitende Probe 75 gerichtet, die sich vorteilhafterweise im Koinzidenzpunkt beider Teilchenstrahlen befindet.

[0131] Für den Fall, dass das Mikroskop-System 60 - anders als in Fig. 6 dargestellt - keine Probenbühne umfasst, kann das Probenhaltersystem 74 auch auf eine andere Vorrichtung in der Probenkammer 69 montierbar sein.

[0132] Beim Betrieb des FIB-SEM-Kombinationsgeräts 60 werden in einer Elektronenquelle 62 Primärelektronen erzeugt, die entlang einer optischen Achse 64 der Elektronenstrahlsäule, durch ein Kondensorlinsensystem oder mehrere Kondensorlinsensysteme 63, 65 gebündelt, parallelisiert oder gestreut und durch wenigstens eine Aperturblende 66 beschnitten werden. Außerdem umfasst die Elektronenstrahlsäule 61 ein Ablenssystem 67, mit dem der Primärelektronenstrahl rasterförmig über die Probe 75 geführt werden kann, sowie ein Objektivlinsensystem 68, mit dem der Primärelektronenstrahl auf die Probe 75 fokussiert werden kann.

[0133] Das FIB-SEM-Kombinationsgerät 60 umfasst darüber hinaus eine Ionenstrahlsäule 81 mit einer Ionenquelle 79, einem Ablenssystem 77, einer Aperturblende 82 und einem Linsensystem 76. Die Ionen-

quelle 79 kann beispielsweise eine Flüssigmetallionenquelle (LMIS) sein, die zum Beispiel mit einer Galliumionenquelle betrieben wird.

[0134] Die in der Ionenquelle 79 erzeugten Ionen werden entlang der optischen Achse 78 der Ionenstrahl säule beschleunigt, gebündelt, und mittels eines Objektivlinsensystems 80 auf die Probe 75 fokussiert. Die auf die Probe 75 auftreffenden Ionen können dazu genutzt werden, Material der Probe 75 abzutragen und/oder die Probe 75 abzubilden. Optional kann das Mikroskop-System 60 auch ein Gasinjektionssystem 72 zum Einleiten von Prozessgasen aufweisen.

[0135] Das FIB-SEM-Kombinationsgerät 60 umfasst ferner mindestens einen Detektor 70 zum Detektieren von Wechselwirkungsprodukten der Wechselwirkung der Elektronen und/oder Ionen mit der Probe 75.

[0136] Außerdem umfasst das Mikroskop-System 60 vorteilhafterweise eine Auswerte- und Steuereinheit 71. Die Auswerte- und Steuereinheit 71 kann eine Folge von Steuerbefehlen ausführen, die in einem Computerprogrammprodukt umfasst sind. Durch die Ausführung der Steuerbefehle wird das Mikroskop-System 60 dazu veranlasst, eine Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Einstellen des Neigungswinkels der Probe auszuführen, wie am Beispiel von **Fig. 7** erläutert.

[0137] **Fig. 7** zeigt schematisch ein Flussdiagramm des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Verkippen einer Probe mit Hilfe des Probenhaltersystems.

[0138] Zunächst wird in Schritt S1 eine zu untersuchende Probe bereitgestellt. Die Probe wird von dem erfindungsgemäßen Probenhaltersystem in der Probenkammer des verwendeten Mikroskop-System gehalten. Dazu wird die Probe entweder direkt auf die vierte Seitenfläche (obere Seitenfläche) des zweiten Rotationselement aufgenommen (wie in **Fig. 3** gezeigt) oder - wenn ein weiteres Rotationselement vorhanden ist - auf dieses Rotationselement (wie in **Fig. 1** und **Fig. 2** gezeigt) aufgenommen.

[0139] In Schritt S2 wird nun der Winkel β_1 verändert, indem das erste Rotationselement um die Rotationsachse R1 relativ zur Halteraufnahmefläche des Basiselements rotiert wird.

[0140] Dann wird in Schritt S3 der Winkel β_2 durch Rotieren des zweiten Rotationselements um die Rotationsachse R2 verändert. Dadurch überlagern sich der Keilwinkel α_1 des ersten Rotationselements, der Keilwinkel des zweiten Rotationselements α_2 , sowie die beiden Rotationswinkel β_1 und β_2 , so dass die Neigung der Probe relativ zur Halteraufnahmefläche des Basiselements verändert wird. Wenn die Halteraufnahmefläche eine bestimmte Orientierung relativ zur optischen Achse des Mikroskop-Systems einnimmt, wird durch die Überlagerung der genannten Winkel auch die Neigung der Probe relativ zur optischen Achse verändert.

[0141] In Schritt S4 werden die Schritte S2 und S3 so lange wiederholt, bis der gewünschte Neigungswinkel der Probe relativ zur Halteraufnahmefläche eingestellt ist. In der Praxis wird der Kippwinkel der Probe meist relativ zu der oder den optischen Achsen des Mikroskop-Systems eingestellt, um auf diese Weise den Einfallswinkel eines Teilchenstrahls auf die Probe einstellen zu können.

[0142] In einem optionalen Schritt S5 wird außerdem der Winkel β_3 verändert, indem das dritte Rotationselements um die Rotationsachse R3 gedreht wird. Dadurch kann die Probe eine gewünschte Ausrichtung in einer zur dritten Seitenfläche parallelen Ebene einnehmen.

[0143] Besonders vorteilhaft ist es dabei, wenn das dritte Rotationselement eine obere Seitenfläche 17 (d. h. Probenaufnahmefläche des dritten Rotationselements) und eine untere Seitenfläche 18 aufweist, die parallel zueinander angeordnet sind, wie in **Fig. 1** dargestellt. Dadurch kann die Ausrichtung der Probe (d.h. die Raum-Orientierung der Probe in der von den Achsen x und y aufgespannten Ebene) verändert werden, ohne dass der Kippwinkel der Probe verändert wird.

Bezugszeichenliste

- | | |
|---|--|
| 1 | Erstes Rotationselement |
| 2 | Erste Seitenfläche (obere Seitenfläche des ersten Rotationselements) |
| 3 | Zweite Seitenfläche (untere Seitenfläche des ersten Rotationselements) |
| 4 | Grundplatte (Basiselement) |

5	Halteaufnahme­fläche
6	Bohrung im Basiselement
7	Stiftartige Verbindung
8	Zweites Rotationselement
9	Dritte Seiten­fläche (obere Seiten­fläche des dritten Rotationselements)
10	Vierte Seiten­fläche (untere Seiten­fläche des dritten Rotationselements)
11	Skala
12	Bohrung im ersten Rotationselement
13	Bohrung im zweiten Rotationselement
14	Stiftartige Verbindung
15	Drittes Rotationselement
16	Probe
17	Probenaufnahme­fläche (obere Seiten­fläche) des dritten Rotationselements
18	Seiten­fläche (untere Seiten­fläche) des dritten Rotationselements
19	Stiftartige Verbindung
20	Probenhaltersystem
21	Prob enhaltersystem
R1	Erste Rotationsachse
R2	Zweite Rotationsachse
R3	Dritte Rotationsachse
β_1	Erster Rotationswinkel
β_2	Zweiter Rotationswinkel
β_3	Dritter Rotationswinkel
α_1	Erster Winkel
α_2	Zweiter Winkel
α_3	Dritter Winkel
θ	Kippwinkel der Probenaufnahme­fläche (Kippwinkel der Probe)
60	Mikroskop-System (SEM-FIB-Kombinationsgerät)
61	Elektronenstrahlsäule
62	Elektronenquelle
63	Erstes Kondensorliniensystem
64	Optische Achse der Elektronenstrahlsäule
65	Zweites Kondensorliniensystem
66	Aperturblende
67	Ablenssystem
68	Objektivliniensystem (SEM)
69	Probenkammer
70	Detektor
71	Auswerte- und Steuereinheit
72	Gasinjektionssystem

73	Probenbühne
74	Probenhaltersystem
75	Probe
76	Linsensystem
77	Ablensystem
78	Optische Achse der Ionenstrahlsäule
79	Ionenquelle
80	Objektivlinsensystem (FIB)
81	Ionenstrahlsäule
x	x-Achse
y	y-Achse
z	z-Achse
R	Rotationsachse
T	Kippachse (tilt)

Patentansprüche

1. Probenhaltersystem (20, 21) zum Halten einer mikroskopischen Probe (16) in einem Mikroskop-System, das wenigstens eine optische Achse aufweist, wobei das Probenhaltersystem (20, 21) umfasst:

- ein erstes Rotationselement (1) und ein zweites Rotationselement (8),
- wobei das erste Rotationselement (1) eine erste Seitenfläche (2) und eine zweite Seitenfläche (3) aufweist, die einander gegenüberliegend angeordnet sind, und die einen Winkel α_1 einschließen, so dass sich ein keilförmiger Querschnitt des ersten Rotationselements (1) ergibt; und
- das zweite Rotationselement (8) eine dritte Seitenfläche (9) und eine vierte Seitenfläche (10) aufweist, die einander gegenüberliegend angeordnet sind, und die einen Winkel α_2 einschließen, so dass sich ein keilförmiger Querschnitt des zweiten Rotationselements (8) ergibt;
- wobei das zweite Rotationselement (8) konfiguriert ist, auf der dritten Seitenfläche (9) eine Probe (16) oder ein drittes Rotationselement (15) aufzunehmen;
- und das zweite Rotationselement (8) mit dem ersten Rotationselement (1) rotierbar verbunden ist, wobei das zweite Rotationselement (8) eine Rotationsachse R2 aufweist, die senkrecht zur vierten Seitenfläche (10) angeordnet ist, und das zweite Rotationselement (8) um die Rotationsachse R2 um den Rotationswinkel β_2 relativ zum ersten Rotationselement (1) rotierbar ist;
- und das erste Rotationselement (1) konfiguriert ist, rotierbar auf einer Halteraufnahmefläche (5) aufgenommen zu werden, wobei das erste Rotationselement (1) eine Rotationsachse R1 aufweist, die senkrecht zur zweiten Seitenfläche (3) angeordnet ist, wobei das erste Rotationselement um die Rotationsachse R1 um den Rotationswinkel β_1 relativ zur Halteraufnahmefläche (5) rotierbar ist;
- wobei die Neigung der dritten Seitenfläche (9) des zweiten Rotationselements (8) relativ zur Halteraufnahmefläche (5) durch Überlagerung der Winkel α_1 , α_2 , β_1 und β_2 einstellbar ist.

2. Probenhaltersystem (20) nach Anspruch 1, wobei die vierte Seitenfläche (10) und die erste Seitenfläche (2) einander gegenüberliegend angeordnet und parallel zueinander ausgerichtet sind, so dass die Rotationsachse R2 des zweiten Rotationselements (8) senkrecht zur ersten Seitenfläche (2) des ersten Rotationselements (1) verläuft; und weiterhin das erste Rotationselement (1) so konfiguriert ist, dass die zweite Seitenfläche (3) derart auf die Halteraufnahmefläche (5) aufnehmbar ist, dass die zweite Seitenfläche (3) und die Halteraufnahmefläche (5) einander gegenüberliegend angeordnet sind, wobei die zweite Seitenfläche (3) und die Halteraufnahmefläche (5) parallel zueinander ausgerichtet sind, so dass die Rotationsachse R1 des ersten Rotationselements (1) senkrecht zur Halteraufnahmefläche (5) ausgerichtet ist.

3. Probenhaltersystem (20) nach Anspruch 1 oder 2, wobei das Probenhaltersystem (20) das dritte Rotationselement (15) umfasst, welches eine Probenaufnahmefläche (17) sowie eine Seitenfläche (18) aufweist, die einander gegenüberliegend angeordnet sind; und das dritte Rotationselement (15) konfiguriert ist, eine Probe (16) auf der Probenaufnahmefläche (17) des dritten Rotationselements (15) aufzunehmen; und das dritte Rotationselement (15) mit dem zweiten Rotationselement (8) rotierbar verbunden ist, wobei das dritte Rotationselement (15) eine Rotationsachse R3 aufweist, die senkrecht zur Seitenfläche (18) des drit-

ten Rotationselements angeordnet ist, und das dritte Rotationselement (15) um die Rotationsachse R3 um den Winkel β_3 relativ zum zweiten Rotationselement (8) rotierbar ist.

4. Probenhaltersystem (20) nach Anspruch 3, wobei die Seitenfläche (18) des dritten Rotationselements (15) und die dritte Seitenfläche (9) des zweiten Rotationselements (8) einander gegenüberliegend angeordnet und parallel zueinander ausgerichtet sind, so dass die Rotationsachse R3 senkrecht zur dritten Seitenfläche (9) des zweiten Rotationselements (8) ausgerichtet ist.

5. Probenhaltersystem (20, 21) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Probenhaltersystem (20, 21) eine Grundplatte (4) umfasst, die auf einer Probenbühne montierbar ist, und die Grundplatte (4) eine Seitenfläche (5) aufweist, die als Halteraufnahmefläche (5) ausgebildet ist.

6. Probenhaltersystem (20, 21) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Winkel α_1 und α_2 feste Werte annehmen, während die Winkel β_1 und β_2 wählbar sind.

7. Probenhaltersystem (20, 21) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Winkel α_1 und α_2 einen Wert zwischen 0° und einschließlich 45° annehmen.

8. Probenhaltersystem (20, 21) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Winkel α_1 und α_2 unterschiedliche Werte annehmen.

9. Probenhaltersystem (20, 21) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Rotationselemente Skalen (11) zur Einstellung der Rotationswinkel β aufweisen.

10. Probenhaltersystem (20, 21) nach Anspruch 9, wobei die Skalen (11) so ausgeführt sind, dass sie den mathematischen Zusammenhang zwischen den gewünschten Neigungswinkeln und den Keilwinkeln α sowie den Rotationswinkeln β entsprechen.

11. Probenhaltersystem (20, 21) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, das derart konfiguriert ist, dass es in ein Mikroskop-System (60) aufnehmbar ist, das als Teilchenstrahlmikroskop ausgebildet ist.

12. Probenhaltersystem (20, 21) nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Rotationselemente (1, 8, 15) kreisförmige oder ellipsoide Grundflächen aufweisen.

13. Verfahren zum Einstellen des Neigungswinkels einer mikroskopischen Probe (16, 75) in einem Mikroskop-System (60), das eine optische Achse aufweist, wobei die Probe von einem Probenhaltersystem nach einem der Ansprüche 1 bis 12 gehalten wird und das Verfahren die Schritte umfasst:

- a) Halten der Probe mittels des Probenhaltersystems (S1);
- b) Verändern des ersten Rotationswinkels Winkels β_1 durch Rotieren des ersten Rotationselements um die Rotationsachse R1 (S2);
- c) Verändern des zweiten Rotationswinkels β_2 durch Rotieren des zweiten Rotationselements um die Rotationsachse R2, so dass sich die Winkel α_1 , α_2 , β_1 und β_2 derart überlagern, dass die Neigung der Probe relativ zur Halteraufnahmefläche verändert wird (S3);
- d) Wiederholen der Schritte b) und c) bis die Probe die gewünschte Neigung relativ zur Halteraufnahmefläche einnimmt (S4).

14. Verfahren nach Anspruch 13, wobei das Verfahren den zusätzlichen Schritt umfasst:

- e) Verändern des dritten Rotationswinkels β_3 durch Rotieren des dritten Rotationselements um die Rotationsachse R3, so dass die Probe eine gewünschte Ausrichtung in einer zur dritten Seitenfläche (9) parallelen Ebene einnimmt.

15. Computerprogrammprodukt, das eine Sequenz von Steuerbefehlen, mit der ein Mikroskop-System dazu veranlasst wird, ein Verfahren zum Einstellen des Neigungswinkels einer Probe nach einem der Ansprüche 13 und 14 auszuführen.

Es folgen 6 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

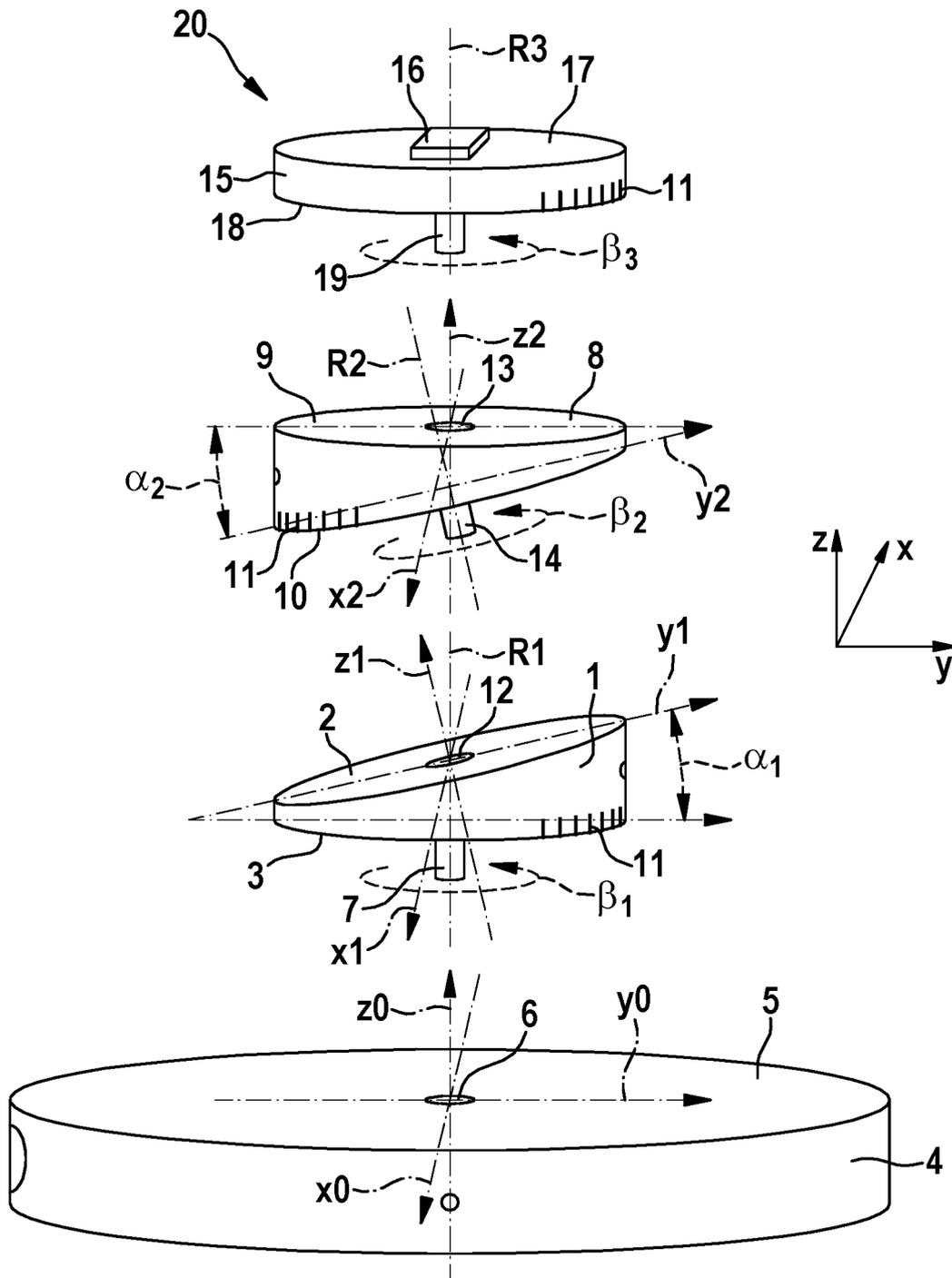


Fig. 1

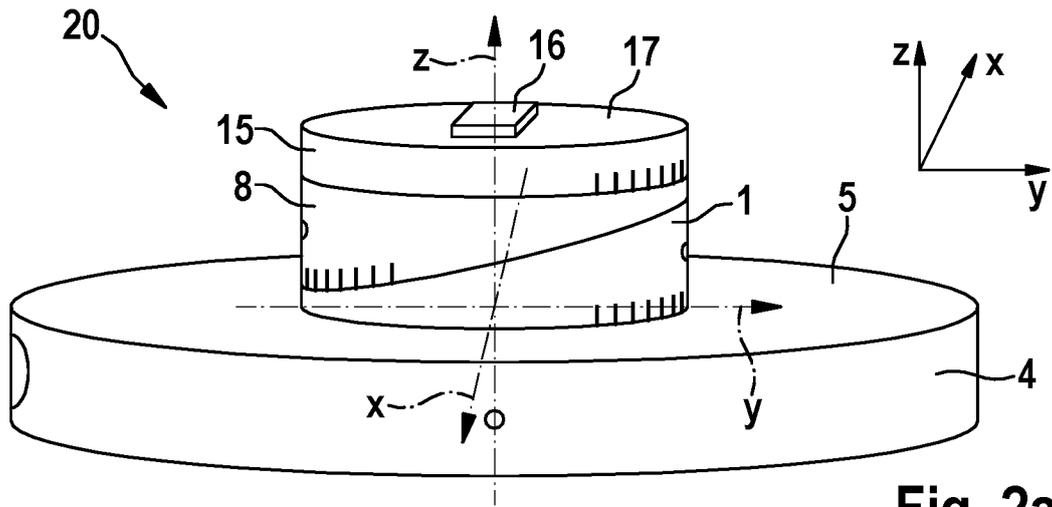


Fig. 2a

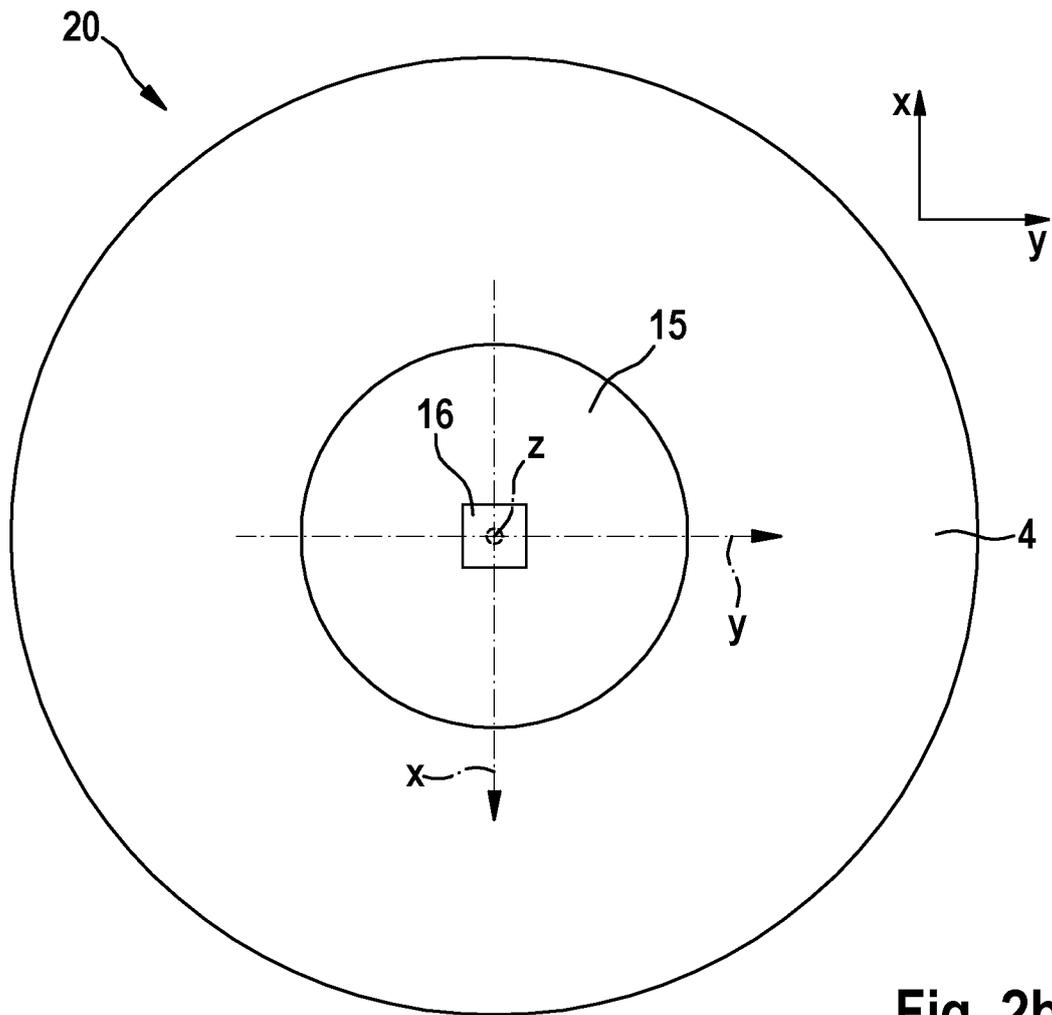


Fig. 2b

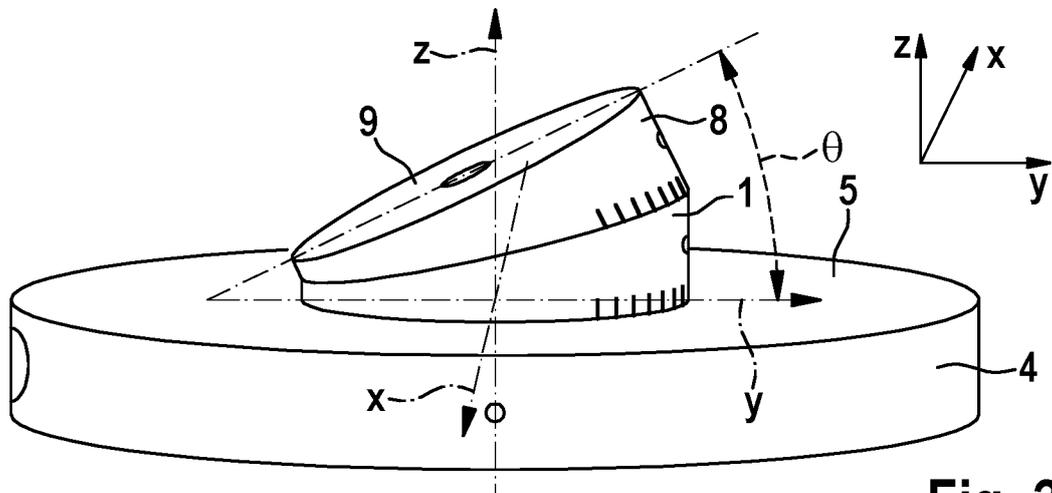
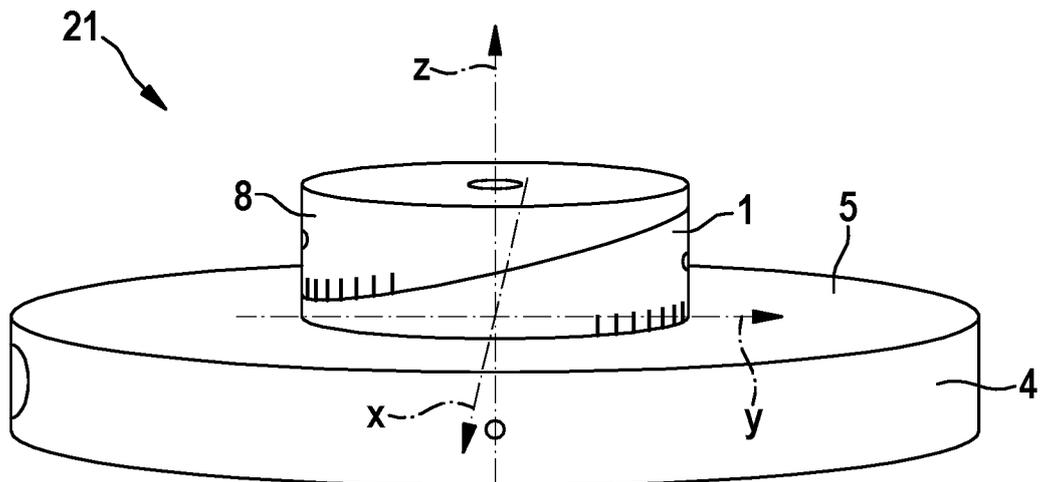
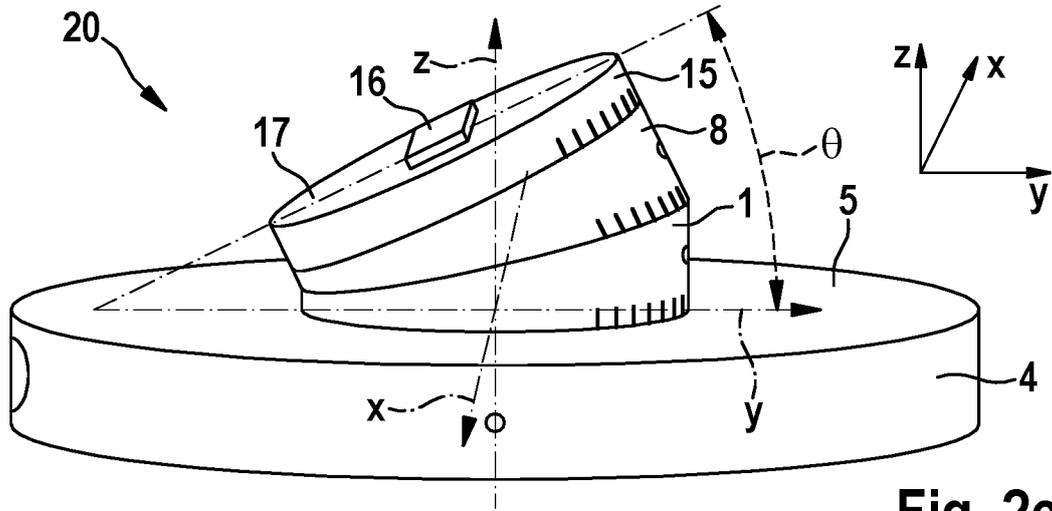


Fig. 3

$$\alpha_1 = \pi/4, \alpha_2 = -\pi/4, \beta_1 = -\pi/2 \dots \pi/2, \beta_2 = 0 \dots \pi$$

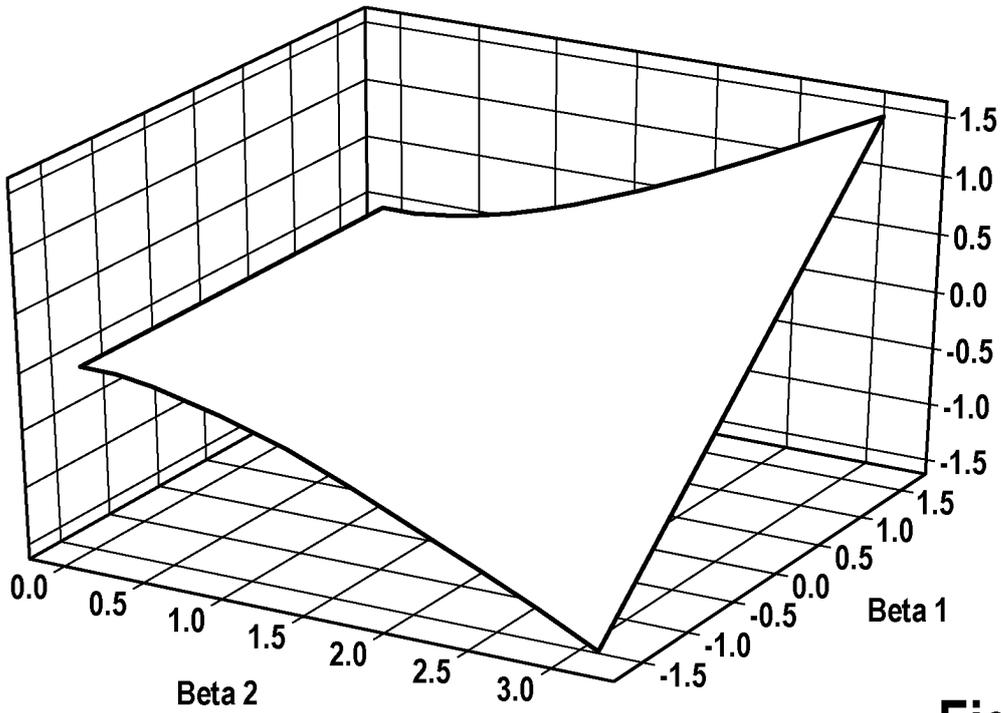


Fig. 4

$$\alpha_1 = \pi/4, \alpha_2 = -\pi/4, \beta_1 = 0 \dots \pi, \beta_2 = 0 \dots \pi$$

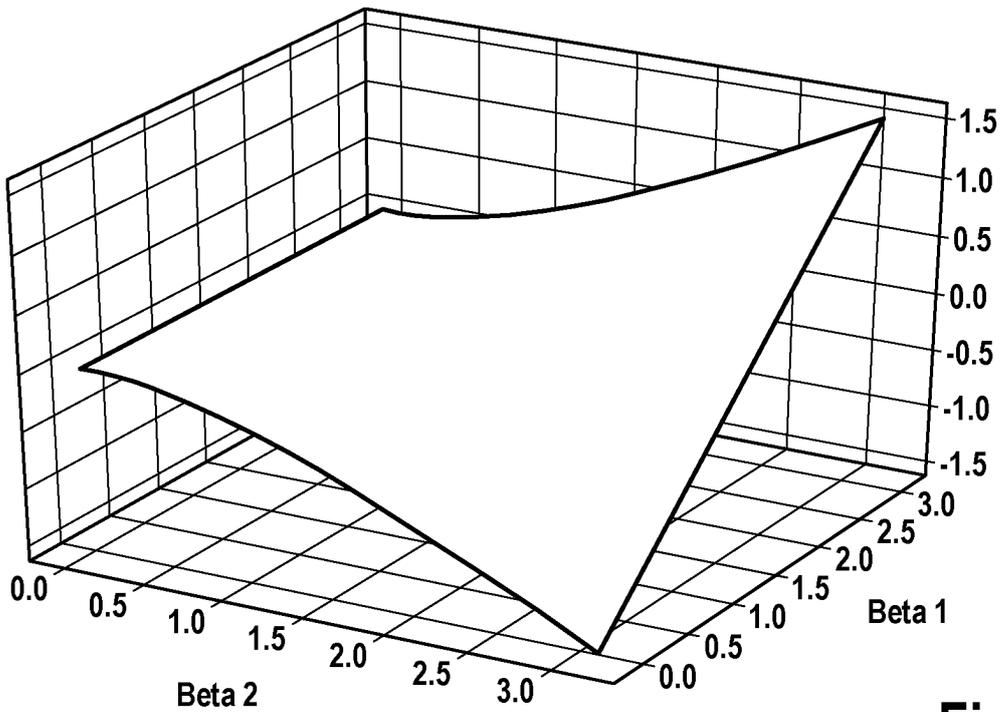


Fig. 5

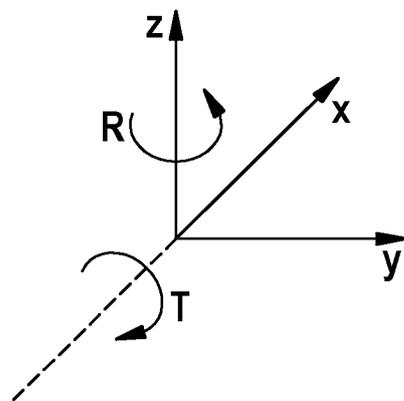
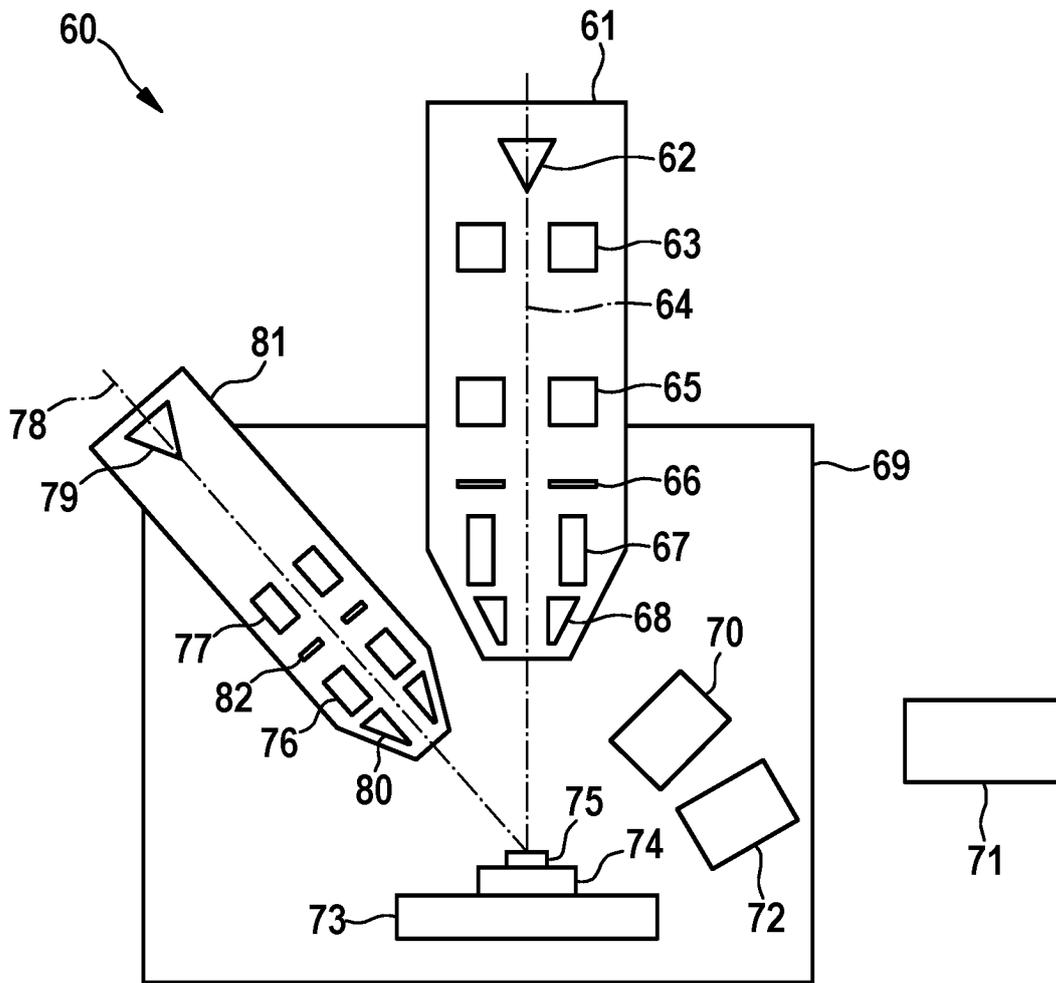


Fig. 6

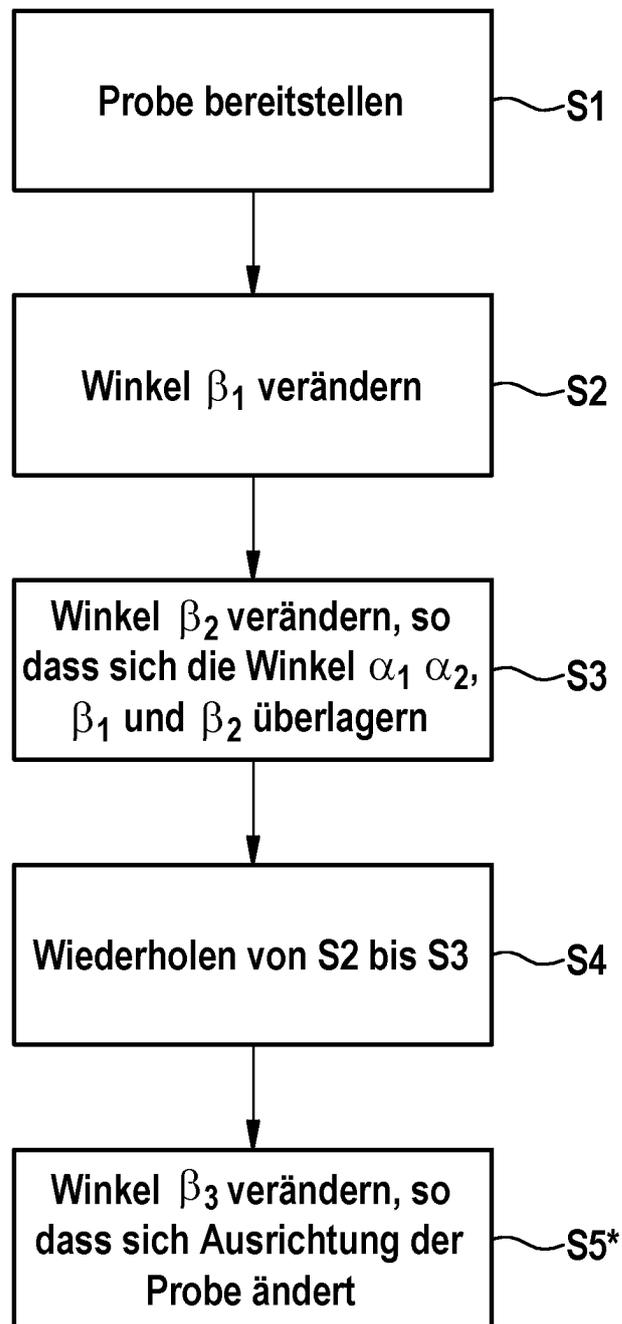


Fig. 7