

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

(19) Weltorganisation für geistiges
Eigentum

Internationales Büro

(43) Internationales
Veröffentlichungsdatum

1. November 2012 (01.11.2012)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2012/146709 A2

(51) Internationale Patentklassifikation:
H02K 41/03 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2012/057752

(22) Internationales Anmeldedatum:
27. April 2012 (27.04.2012)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2011 100 153.4
29. April 2011 (29.04.2011) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **PHYSIK INSTRUMENTE (PI) GMBH & CO. KG** [DE/DE]; Auf der Römerstraße 1, 76228 Karlsruhe (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **SCHÄFFEL, Christoph** [DE/DE]; Ulmenstr. 6, 98693 Ilmenau (DE). **KATZSCHMANN, Michael** [DE/DE]; Böttcherstr. 13B, 98693 Ilmenau (DE). **MOHR, Hans-Ulrich** [DE/DE]; Nordstr. 37, 98701 Großbreitenbach (DE). **WALENDA, Carolin** [DE/DE]; Friedrich-Naumann-Str. 61, 76187 Karlsruhe (DE). **GLÖB, Rainer** [DE/DE]; Karlsruhe

Straße 12, 76337 Waldbronn (DE). **RUDOLF, Christian** [DE/DE]; Lindenstraße 8, 76307 Karlsbad (DE).

(74) Anwalt: **KRUSPIG, Volkmar**; P.O. Box 86 06 24, 81633 München (DE).

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

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

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: HIGH-RESOLUTION POSITIONING DEVICE

(54) Bezeichnung : HOCHAUFLÖSENDE POSITIONIEREINRICHTUNG

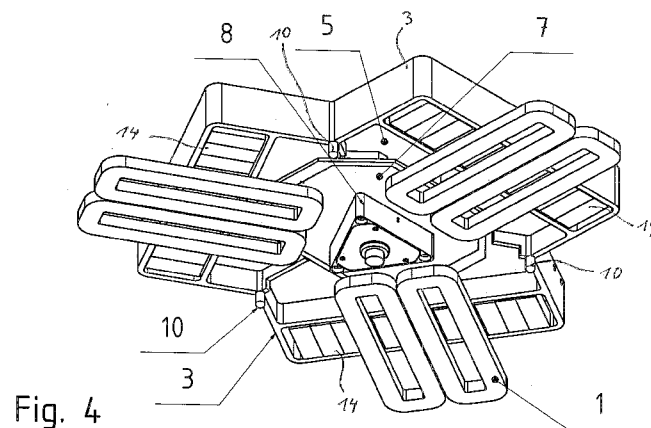
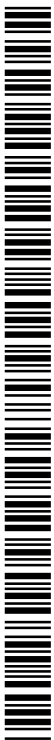


Fig. 4

(57) Abstract: The invention relates to a high-resolution positioning device having a stator and a rotor, a coil array, arranged on the stator, having at least three groups of flat coils, wherein each group has at least two single coils and the coil array encloses a free space on the stator, also having circuits that are situated on, against or in the rotor, are excited by permanent magnet and form a magnet array which likewise encloses a free space, wherein the free spaces hold a position measuring system which has a measuring head having sensors and has an area scale. According to the invention, the device is in the form of a freely suspended, magnetically controlled six-dimensional drive, wherein the measuring head is situated in the coil array free space and the area scale is situated in the magnet array free space, and the rotor is free of drive-related electrical or electronic and, in this regard, live parts.

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



WO 2012/146709 A2

**Veröffentlicht:**

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

Die Erfindung betrifft eine hochauflösende Positioniereinrichtung mit einem Stator und einem Läufer, einem auf dem Stator angeordneten Spulenarray mit wenigstens drei Gruppen von Flachspulen, wobei jede Gruppe mindestens zwei Einzelspulen aufweist und das Spulenarray einen Freiraum auf dem Stator einschließt, weiterhin mit auf, an oder in dem Läufer befindlichen permanentmagnetisch erregten Kreisen, welche ein Magnetarray bilden, das ebenfalls einen Freiraum einschließt, wobei die Freiräume ein Positionsmesssystem aufnehmen, das einen Messkopf mit Sensoren und einen Flächenmaßstab besitzt. Erfindungsgemäß ist die Einrichtung als freischwebender, magnetisch geführter sechsdimensionaler Antrieb ausgebildet, wobei sich der Messkopf im Spulenarray-Freiraum und der Flächenmaßstab im Magnetarray-Freiraum befinden sowie der Läufer frei von antriebsrelevanten elektrischen oder elektronischen und diesbezüglich stromführenden Teilen ist.

Hochauflösende Positioniereinrichtung

Beschreibung

Die Erfindung betrifft eine hochauflösende Positioniereinrichtung mit einem Stator und einem Läufer, einem auf dem Stator angeordneten Spulenarray mit wenigstens drei Gruppen von Flachspulen, wobei jede Gruppe mindestens zwei Einzelspulen aufweist und das Spulenarray einen Freiraum auf dem Stator einschließt, weiterhin mit auf, an oder in dem Läufer befindlichen permanentmagnetisch erregten Kreisen, welche ein Magnetarray bilden, das ebenfalls einen Freiraum einschließt, wobei die Freiräume ein Positionsmesssystem aufnehmen, das einen Messkopf mit Sensoren und einen Flächenmaßstab besitzt, gemäß Patentanspruch 1.

Aus der DE 30 37 648 A1 ist ein Zweikoordinatenschrittmotor vorbekannt, bei dem Spulen oder Dauermagnete in einem beweglichen Teil angeordnet sind, welches u.a. durch Magnetschwebung in einer Ebene gelagert ist. Weiterhin sind Rasterplatten, Interferometerspiegel oder andere inkrementelle Geberplatten senkrecht zueinander zur inkrementellen Signalgewinnung und Lageregelung vorhanden. In jeder Bewegungskordinate des Zweikoordinatenmotors sind mindestens zwei entgegengesetzt polarisierte Dauermagneten auf einer ferromagnetischen Grundplatte und jeweils über den entgegengesetzt polarisierten Dauermagneten ein ferromagnetisches Rückschlussteil angeordnet. In dem Luftspalt zwischen Dauermagneten und Rückschlussteil befindet sich mindestens eine rechteckige Spule mit weit über die Magnetpolbreite ragenden Spulenköpfen. Diese Spulenköpfe befinden sich in einem als Tischplatte ausgebildeten Teil mit den kraftwirksamen Spulensträngen der Tischmitte zugewandt. In der Tischplatte sind neben den der Tischmitte zugewandten Spulensträngen Aussparungen mindestens in der Größe von Verfahrweg und Querschnitt des Rückschlussteils und in der Tischmitte ein Objektträger aus strahlungsdurchlässigem Werkstoff, z.B. Glas vorgesehen. Bei einer Ausführungsform sind mindestens drei rechteckige Spulen mit ihren zugehörigen Paaren von Dauermagneten unter einem Winkel von vorzugsweise 120° , mit den nichtkraftwirksamen Spulenköpfen der Tischmitte zugewandt, angeordnet. Mit dem vorbekannten Zweikoordinatenschrittmotor sollen kleinste Schrittweiten bis unter $1\ \mu\text{m}$ erreicht werden und ein günstiges dynamisches Verhalten gegeben sein.

Bei dem Positioniersystem für eine Lithografieeinrichtung nach EP 1 243 972 A1 findet ein Planarmotor Anwendung, welcher einen Stator sowie einen Läufer aufweist. Der Stator umfasst eine Anordnung von mehreren segmentierten Magneten mit periodischer Polarisierung, wobei diese mit Strombeaufschlagbaren Spulen wechselwirken, um die gewünschte Positionierbewegung zu bewirken. Darüber hinaus ist die dortige Lösung durch eine Grobpositioniereinheit gekennzeichnet, welche mit einer Feinpositioniereinrichtung zusammenwirkt, um einerseits größere Verfahrswege schnell zurücklegen zu können sowie andererseits die gewünschten Positioniergenauigkeiten zu erreichen.

Die gattungsbildende DE 100 54 376 A1 zeigt einen elektrodynamischen planaren x - y - ϕ -Direktantrieb in flacher Bauweise, welcher geringe Normalkraft- und Tangentialkraftschwankungen aufweist. Ein dortiges Regelsystem ist u.a. in der Lage, sowohl die Größe als auch die Position der Lastmasse zu identifizieren. Bei dem Antrieb nach DE 100 54 376 A1 handelt es sich um einen solchen, bei dem Stator und Läufer zueinander Luftlagerpositioniert sind. Auf dem Stator sind paarig gegenüberliegend Spulen aufgebracht und fixiert. Der Läufer besteht aus einem Läuferahmen, in dessen Zentrum eine Messsystemanordnung vorgesehen ist. Der Läuferahmen weist an seinen Ecken jeweils eine Luftlagerbefestigung auf, die jeweils eine Luftlagerdüse aufnimmt, und besitzt zwischen den Luftlagerbefestigungen Rahmenstege, die ihrerseits jeweils Rahmenaufnahmen beinhalten, in denen jeweils ein permanentmagnetisch erregter Kreis aufgenommen ist. Die permanentmagnetisch erregten Kreise umfassen jeweils zwei Einzelmagneten, die mit einem Rückschlussjoch gebrückt sind. Der Läufer besitzt an seiner Unterseite in seinem Zentrum eine Aussparung zur Aufnahme einer Maßverkörperung, z.B. gebildet durch einen Flächenmaßstab. Direkt unterhalb der Maßverkörperung befindet sich im Zentrum des Stators eine Abtasteinheit, deren Abtastrasterplatte im vorhandenen Abstand die Maßverkörperung abtastet. Jedes der Sensorfelder von Sensormodulen, bestehend aus Sendern und Empfängern, die eine Bestrahlung durch ein Abtastraster auf die Maßverkörperung und wieder zurück durch das Abtastraster auf die Empfänger gestatten, detektiert die bei Relativbewegung zwischen Maßverkörperung und Abtastraster modulierte Lichtstrahlung und wandelt diese in elektrische Signale um. Durch die vorgesehene optische Abtastung lassen sich Bewegungen in x - y -Richtung und

auch Verdrehbewegungen bestimmen. Das Erfassung von Kippbewegungen und/oder Bewegungen in vertikaler, d.h. z-Richtung, ist nicht möglich.

Zum Stand der Technik sei noch auf die DE 195 11 973 A1 verwiesen, die einen planaren Direktantrieb zeigt, welcher aus Antriebsgrundelementen aufgebaut ist, die aus zwei entgegengesetzt polarisierten Magneten bestehen, welche über ferromagnetische Joche und einen ferromagnetischen Stator einen kurzen Magnetkreis bilden. Weiterhin sind Flachspulen auf dem Stator dem Magnetkreis jeweils zugeordnet, wobei Magnete und Joche im Läufer mitbewegt werden. Der Stator der vorbekannten Anordnung trägt symmetrisch gegenüberliegende Paare von Flachspulen, die entsprechend der Position des Läufers kommutiert werden. Eine gegenphasige Bestromung jeweils gegenüberliegender Spulen gestattet die Erzeugung eines Antriebsmoments bezüglich des Massenschwerpunkts des Läufers. Auch der dortige Direktantrieb ist mit einem Messsystem ausgestattet.

Aus dem Vorgenannten ist es Aufgabe der Erfindung, eine weiterentwickelte hochauflösende Positioniereinrichtung mit einem Stator und einem Läufer anzugeben, welche eine Positionierung in sechs Freiheitsgraden ermöglicht. Der Läufer, der eine bewegliche Plattform darstellt, soll frei von elektrischer Verdrahtung sein. Die Positioniergenauigkeit und damit die Bewegungsauflösung soll im unteren Nanometerbereich liegen und vorzugsweise <20 nm sein.

Die Lösung der Aufgabe der Erfindung erfolgt durch die Positioniereinrichtung gemäß der Merkmalskombination nach Anspruch 1, wobei die Unteransprüche mindestens zweckmäßige Ausgestaltungen und Weiterbildungen umfassen.

Die Erfindung geht demnach von einem rein magnetisch geführten und angetriebenen Bewegungssystem aus, wobei die Läuferbewegung ohne jeglichen mechanischen Kontakt zwischen Stator und Läufer auf der Basis magnetischer Feldkräfte erfolgt. Das erfindungsgemäß zum Einsatz kommende Messsystem erfasst alle Bewegungsfreiheitsgrade translatorisch in x-, y- und z-Richtung sowie rotatorisch um die Achsen x, y und z. Damit ist das Messsystem in der Lage, die vertikale Läuferposition und die Läuferkipplage zu erfassen. Die erfindungsgemäße Ausbildung schafft eine ebene Referenzfläche mindestens in der Größe des ebenen Verfahrbereichs des

Läufers. Die Referenzfläche bzw. der Flächenmaßstab bzw. die Maßverkörperung ist zur Minimierung von Messfehlern nahe zum bewegenden oder zum vermessenden Objekt angeordnet.

Die vorgeschlagene Positioniereinrichtung besitzt ein auf dem Stator angeordnetes Spulenarray mit wenigstens drei Gruppen von Flachspulen, wobei jede Gruppe mindestens zwei Einzelspulen aufweist. Das Spulenarray schließt einen Freiraum auf dem Stator bzw. der Statoroberfläche ein. Weiterhin sind auf, an oder in dem Läufer permanentmagnetisch erregte Kreise befindlich, welche ein Magnetarray bilden. Dieses Magnetarray schließt ebenfalls einen Freiraum ein. Die vorerwähnten Freiräume nehmen das Positionsmesssystem auf, welches einen Messkopf mit Sensoren und einen Flächenmaßstab besitzt. Die Freiräume sind derart gewählt, dass eine Fläche zur Verfügung steht, die im Wesentlichen der Größe des ebenen Fahrbereichs entspricht.

Die Positioniereinrichtung ist erfindungsgemäß als freischwebender, rein magnetisch geführter sechsdimensionaler Antrieb ausgebildet, wobei sich der Messkopf im Spulenarray-Freiraum und der Flächenmaßstab im Magnetarray-Freiraum befinden. Der Läufer selbst ist frei von antriebsrelevanten und sensorrelevanten elektrischen oder elektronischen und diesbezüglich stromführenden Teilen.

In einer bevorzugten Ausgestaltung besitzt der Messkopf eine an den Spulenarray-Freiraum angepasste, den zur Verfügung stehenden Platz ausnutzende Flächenform.

Weiterhin weist der Messkopf optische Inkrement-Sensoren sowie kapazitive Sensoren auf.

Die kapazitiven Sensoren sind bei einer bevorzugten Ausführungsform im Flächenrandbereich des Messkopfes und weiterhin mindestens ein optischer Sensor im Zentrum des Messkopfes angeordnet. Mit Hilfe der kapazitiven Sensoren kann eine Bewegung in z-Richtung mit einer Auflösung von ca. 1 nm erfasst werden. Ebenso können Kippwinkel und diesbezügliche Bewegungen erfasst werden.

Die optischen Inkrement-Sensoren erfassen die Horizontalbewegungen in x- und y-Richtung sowie Dreh- oder Rotationsbewegungen des Läufers um z.

Die kapazitiven Sensoren bestehen jeweils aus einem Sensorpaar, welche den jeweiligen Abstand zur Oberfläche des Flächenmaßstabs erfassen, um hieraus Winkellagen u , v und Bewegungen in z-Richtung zu erfassen.

Bei einer bevorzugten Ausgestaltung weist der Messkopf die Form eines Dreiecks auf. In den Eckbereichen des Dreiecks befinden sich bei dieser bevorzugten Ausführungsform die paarweise ausgebildeten kapazitiven Sensoren. Bevorzugt im Zentrum des dreieckförmigen Messkopfes sind die optischen Sensoren angeordnet. Vorstehende Maßnahmen sichern die aufgabengemäß geforderte hohe Dynamik und die gewünschte Auflösung in allen Freiheitsgraden.

Die jeweiligen Spulengruppen als Bestandteil des Spulenarrays sind als Baueinheit mit Kühlrohren, eine Sandwichanordnung bildend, ausgeführt.

Die permanentmagnetisch erregten Kreise bestehen aus jeweils einem mehrere Segmente umfassenden Halbach-Array.

Unter Halbach-Array wird eine spezielle Konfiguration von Permanentmagneten verstanden, die es ermöglicht, dass sich der magnetische Fluss an einer Seite der Konfiguration fast aufhebt, an der anderen Seite jedoch verstärkt. Diesbezüglich setzt sich ein Halbach-Array aus Segmenten von Permanentmagneten zusammen, deren Magnetisierungsrichtung gegeneinander jeweils um 90° in Richtung der Längsachse des Arrays gekippt ist. Hierdurch rücken die Feldlinien auf der Seite, in deren Richtung der Direktor des Feldes gekippt wird, enger zusammen. Letzteres bewirkt eine Erhöhung der magnetischen Flussdichte. Auf der gegenüberliegenden Seite liegen die Feldlinien weniger eng als im ungestörten Magneten. Hierdurch wird das Feld schon in geringem Abstand abgeschwächt oder hebt sich auf, da sich Nord- und Südpole jeweils abwechseln. Durch ein Halbach-Array lässt sich die Länge an magnetischem Material bezogen auf die gewünschten Kraftwirkungen reduzieren. Dies wiederum führt zu einer gewünschten Reduzierung der Masse des Läufers, in dem die Magnete integriert bzw. untergebracht sind.

Die jeweilige Spulengruppe kann bei einer weiteren Ausgestaltung eine Einhausung mit Mitteln zur Zu- und Abführung eines Kühlmediums aufweisen. Eine Kühlung der Spulengruppen ist auch mittels Wärmerohr (heat pipe) möglich. Durch die kompakte Anordnung von Kühlrohr und Spule werden unerwünschte Temperaturgradienten über die Flächenausdehnung des Spulenarrays bzw. der jeweiligen Spulenpaare wirksam verhindert.

Zur Aufnahme des Magnetarrays ist bei einer Ausgestaltung der Erfindung der Läufer als Tragkörper mit Hohlräumen ausgebildet.

Zur Gewichtskompensation des Läufers können elektro- und/oder permanentmagnetische Mittel vorgesehen werden. Hier besteht bei einer Ausgestaltung die Möglichkeit, Läufer und Fahrbereich überdeckende ferromagnetische Platten mit dem Stator und permanentmagnetisch erregte Magnetkreise mit dem Läufer zu verbinden und zwischen den ferromagnetischen Platten und den permanentmagnetisch erregten Magnetkreisen einen Luftspaltabstand vorzusehen, wobei die ferromagnetischen Platten bei jeder Lage des Läufers die Polflächen der permanentmagnetisch erregten Magnetkreise vorzugsweise vollständig überdecken.

Ausgestaltend können Läufer- und Fahrbereich überdeckende ferromagnetische Platten mit dem Stator verbunden sein und mit den ferromagnetischen Platten wechselwirkende Elektromagnete ausgebildet werden, wobei zwischen den ferromagnetischen Platten und den Elektromagneten ein Luftspaltabstand besteht und die ferromagnetischen Platten bei jeder Lage des Läufers die Polflächen der Elektromagnete, vorzugsweise vollständig, überdecken.

Für eine definierte Start- oder Ruhelage des Läufers relativ zum Stator in eine hierfür vorgesehene Position sind Referenzsensoren vorhanden.

Das Spulenarray ist bevorzugt im Stator eingebettet und schließt mit der Statoroberfläche im Wesentlichen bündig ab. Als Statormaterial kommt beispielsweise ein Natur- oder Kunststein, insbesondere Granitblock, zur Anwendung.

Die Erfindung soll nachstehend anhand eines Ausführungsbeispiels sowie unter Zuhilfenahme von Figuren näher erläutert werden.

Hierbei zeigen:

- Fig. 1 eine Schnittdarstellung der erfindungsgemäßen Positioniereinrichtung längs der Linie A-A gemäß Fig. 2;
- Fig. 2 eine Draufsicht auf die erfindungsgemäße Anordnung mit erkennbarem Stator, Spulenarray sowie Läufer und darin vorgesehenen Magneten;
- Fig. 3a eine Anordnung von Magnetbrücken, bestehend aus Magnetelementen und Joch sowie darunter befindlichen Spulen mit angedeuteten Bestromungsrichtungen sowie Kraftvektoren und Polaritäten;
- Fig. 3b eine Darstellung eines permanentmagnetischen Kreises in Form eines Halbach-Arrays und zugehörigen entsprechend positionierten Spulen mit entsprechenden Bestromungsrichtungen, Kraftvektoren und Polaritäten;
- Fig. 4 eine perspektivische Ansicht der Anordnung von unten unter Weglassung des Statorkörpers bzw. der Statorplatte;
- Fig. 5 eine perspektivische Ansicht von oben mit Blick auf den Läufer und erkennbaren Statorplatten nebst Spulenarray;
- Fig. 6 Draufsicht und perspektivische Ansicht der Positioniereinrichtung mit Anordnung zur Gewichtskompensation des Läufers sowie Teilschnitt längs der Linie A-A der Draufsicht;
- Fig. 7 Darstellungen zur Gewichtskompensation des Läufers gemäß weiterer Ausführungsform mit Läufer- oder Fahrbereich überdeckenden ferromagnetischen Platten, befestigt am Stator, und auf dem Läufer befindlichen Elektromagneten in Draufsicht,

perspektivischer Darstellung und Teilschnittdarstellung B-B senkrecht der Linie B gemäß Draufsicht und

Fig. 8 eine weitere Variante einer Anordnung zur Gewichtskompensation des Läufers mit ferromagnetischen Platten auf dem Läufer und darüber befindlichen, am Stator befestigten Elektromagneten in Draufsicht, perspektivischer Darstellung und Teilschnittdarstellung A-A längs der Linie A-A gemäß der Draufsicht.

Die Positioniereinrichtung gemäß Erfindung und Ausführungsbeispiel geht von einem planaren Spulenarray aus, welches vorzugsweise auf einer Statorplatte angeordnet und befestigt ist. Das Spulenarray besteht aus beispielsweise sechs Flachspulen, die in drei Paaren sternförmig symmetrisch versetzt angeordnet sind.

Im Zentrum der Anordnung befindet sich ein Freiraum, der für die Anordnung eines Messkopfes für die Erfassung von sechs Freiheitsgraden genutzt wird, wobei dieser Messkopf wiederum auf der Statorplatte definiert positioniert ist oder dort kalibrierbar positioniert werden kann.

Zum Spulenarray gehört wenigstens ein Magnetarray, das aus mindestens drei Reihen von wechselseitig polarisierten Magneten besteht, die bei Mittellage des Läufers jeweils mittig zu einem Spulenpaar des Spulenarrays angeordnet sind.

Die Magnetreihen sind, wie z.B. in Fig. 2 erkennbar, in Form einer Dreieckanordnung ausgeführt, an deren Zentrum sich ein weiterer Freiraum befindet.

Dieser Freiraum wird vorzugsweise für die Anordnung eines 6D-Flächenmaßstabs zur flächenhaften Maßverkörperung für das 6D-Messsystem genutzt.

Bei entsprechender Bestromung und Kommutierung eines Spulenpaars des Spulenarrays der Anordnung können durch die magnetische Wechselwirkung in der zugehörigen Reihe des Magnetarrays jeweils horizontale und vertikale Kräfte als auch Momente auf den Läufer eingepreßt werden.

Die Kraftvektoren sind gemäß den Fig. 3a und 3b als Pfeile oberhalb der Magnetbrücken bzw. des Halbach-Arrays dargestellt.

Die vertikalen Komponenten F_z der Kräfte dienen zum Tragen des Läufergewichts und der vertikalen Positionierung. Die horizontalen Kraftkomponenten F_x oder F_y (nicht gezeigt) dienen zur horizontalen Beschleunigung und Positionierung.

Bei Außerbetriebnahme der in den Figuren nicht dargestellten Regelung kann der Läufer auf Gleitfüßen abgestellt werden. Die Gleitfüße dienen ebenso bei der Inbetriebnahme der Regelung zum Gleiten des Läufers auf dem Stator während des Abscannens vorhandener Referenzmarken des 6D-Messsystems.

Nach dem Abscannen der Referenzmarken wird die 6D-Regelung in Betrieb genommen. Die erfindungsgemäße Lösung benötigt zum Tragen und zur definierten hochpräzisen 6D-Positionierung des Läufers im Raum vorteilhafterweise nur sechs Aktorelemente, die als Kombination des Spulenarrays und des Magnetarrays zusammengefasst sind.

Die Schnittdarstellung längs der Linie A-A nach Fig. 2 zeigt eine prinzipielle Darstellung der hochauflösenden Positioniereinrichtung. Das Spulenarray 1 ist hier auf einem Stator 9 angeordnet und befestigt. Das Spulenarray 1 besteht aus sechs Flachspulen, die in drei Paaren, sternförmig um jeweils 120° versetzt angeordnet sind (siehe Fig. 2). Jedes Spulenpaar des Spulenarrays 1 umfasst eine erste Spule 12 und eine zweite Spule 13. Die Spulen 12 und 13 können in einer entsprechenden Ausnehmung des Stators eingebettet sein und mit diesem oberflächenbündig abschließen.

Im Zentrum des Spulenarrays 1 befindet sich ein Freiraum 6, in der Beschreibung auch als Spulenarray-Freiraum bezeichnet.

Der Freiraum 6 wird für die Anordnung des 6D-Messkopfes 8 genutzt, der wiederum auf der Statorplatte 9 angeordnet und befestigt ist.

Die Fig. 1 lässt weiterhin den Läufer 3 mit Magnetarray 2 erkennen. Dargestellt sind darüber hinaus der Objektträger 4 und der 6D-Flächenmaßstab 7.

Die Fig. 3a zeigt das zum Spulenarray 1 zugehörige Magnetarray 2. Bei der Ausführungsform nach Fig. 3a wird das Magnetarray 2 aus drei Reihen wechselseitig polarisierter Magnete nebst Magnetbrücke 11 gebildet. Bei Mittellage des Läufers 3 sind die Magnetbrücken 11 jeweils mittig zu den Spulenpaaren des Spulenarrays 1 angeordnet.

Die Fig. 3b zeigt eine Ausführungsform eines Magnetarrays 2 in der Form eines Halbach-Arrays 14, bestehend aus wechsellipolarisierten Magneten mit rotierendem Magnetisierungsvektor (angedeutet durch die Pfeildarstellungen).

Die Halbach-Arrays 14 sind bei Mittellage des Läufers 3 jeweils mittig zu den Spulenpaaren des Spulenarrays 1 angeordnet.

Die Fig. 4 und 5 zeigen perspektivisch dargestellt je drei Magnetreihen, die die Form eines Dreiecks einnehmen. Im Zentrum der Anordnung befindet sich der Freiraum 5, welcher erfindungsgemäß für die Anordnung des 6D-Flächenmaßstabs 7 genutzt wird. Mit dem Bezugszeichen 10 sind die bereits erwähnten Gleitfüße bezeichnet. Die Ansicht von unten nach Fig. 4 unter Weglassung des Stators 9 stellt ein Magnetarray umfassend drei Halbach-Arrays 14 dar. Es sei an dieser Stelle klargestellt, dass mit dem Bezugszeichen 1 z.B. gemäß Fig. 2, 4 oder 5 nicht ein einzelnes Spulenpaar gekennzeichnet ist, sondern hierunter die Anordnung der drei Spulenpaare, umfassend jeweils die Einzelspulen 12 und 13, das Spulenarray bildend, zu verstehen ist.

Die Fig. 6 zeigt eine erste Ausführungsform einer Anordnung zur Gewichtskompensation des Läufers 3 mit Läufer- und Fahrbereich überdeckenden ferromagnetischen Platten 17, befestigt am Stator 9, und auf dem Läufer 3 befindlichen permanentmagnetisch erregten Magnetkreisen 18.

Bei der zweiten Ausführungsform zur Gewichtskompensation, dargestellt anhand der Fig. 7, sind Läufer- und Fahrbereich überdeckende ferromagnetische Platten 17 am Stator befestigt und auf dem Läufer 3 befinden sich Elektromagnete 16.

Die dritte Ausführungsform zur Gewichtskompensation des Läufers mit ferromagnetischen Platten 15 auf dem Läufer und darüber befindlichen, am Stator befestigten Elektromagneten 16 zeigen die Abbildungen gemäß Fig. 8.

Bei entsprechender Bestromung und Kommutierung des Spulenpaars können durch die magnetische Wechselwirkung in der zugehörigen Reihe des Magnetarrays 2 jeweils horizontale und vertikale Kräfte als auch Momente auf den Läufer 3 eingeprägt werden.

Die Kraftvektoren sind bei den Fig. 3a und 3b oberhalb der Magnetbrücken bzw. der Halbach-Arrays als Pfeile dargestellt.

Die vertikalen Komponenten der Kräfte dienen zum Tragen des Läufergewichts und zur vertikalen Positionierung. Die horizontalen Kraftkomponenten ermöglichen die horizontale Beschleunigung und Positionierung.

Bei Außerbetriebnahme der Regelung wird der Läufer 3 auf den Gleitfüßen 10 abgestellt. Diese Gleitfüße 10 dienen bei der Inbetriebnahme der Regelung zum Gleiten des Läufers 3 auf dem Stator, insbesondere während des Abscannens von auf dem 6D-Messsystem vorhandenen Referenzmarken.

Zum Tragen und zur definierten hochpräzisen 6D-Positionierung des Läufers im Raum sind, wie in den Fig. 2, 4 und 5 dargestellt, sechs Aktorelemente ausgeführt, die als Kombination des Spulenarrays 1 und des Magnetarrays 2 zusammengefasst sind. Die vorgeschlagene Positioniereinrichtung mit sechsdimensionalem Antrieb kann für unterschiedlichste industrielle und wissenschaftliche Zwecke, aber auch für Inspektionssysteme genutzt werden. Dadurch, dass der Läufer in seiner Bewegung nicht durch z.B. Stromzuführungen oder Ähnliches behindert wird, werden störende Krafteinflüsse ausgeschlossen. Der Läufer selbst ist frei zugänglich, was ebenso auch für den auf dem Läufer befindlichen Objektträger gilt.

Bei einer technisch umgesetzten Positioniereinrichtung liegt der Bewegungsbereich des Läufers horizontal bei ca. 100 mm und es beträgt die Auslenkung in z-Richtung ca. 100 μ m bei einer Positioniergenauigkeit von ca. 5 nm.

Für das Halbach-Array kommen speziell $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ Magnete mit einem Magnetisierungsgrad von ca. 28 zum Einsatz. Die einzelnen Segmente wurden verklebt. Die Gesamtanordnung ist UV-tauglich. Der Messkopf umfasst bei einer realisierten Lösung 3D-optische Inkrement-Sensoren mit einer Auflösung von 5 nm in x-y- sowie in Verdrehungsrichtung ω . Die eingesetzten kapazitiven Sensoren zur Erfassung von Winkelbewegungen u und v sowie der Auslenkung in vertikaler, d.h. z-Richtung sind paarweise ausgeführt und ermöglichen Auflösungen bis hinunter zu einem Nanometer.

Patentansprüche

1. Hochauflösende Positioniereinrichtung mit einem Stator und einem Läufer, einem auf dem Stator angeordneten Spulenarray mit wenigstens drei Gruppen von Flachspulen, wobei jede Gruppe mindestens zwei Einzelspulen aufweist und das Spulenarray einen Freiraum auf dem Stator einschließt, weiterhin mit auf, an oder in dem Läufer befindlichen permanentmagnetisch erregten Kreisen, welche ein Magnetarray bilden, das ebenfalls einen Freiraum einschließt, wobei die Freiräume ein Positionsmesssystem aufnehmen, das einen Messkopf mit Sensoren und einen Flächenmaßstab besitzt, dadurch gekennzeichnet, dass diese als freischwebender, magnetisch geführter sechsdimensionaler Antrieb ausgebildet ist, wobei sich der Messkopf im Spulenarray-Freiraum und der Flächenmaßstab im Magnetarray-Freiraum befinden sowie der Läufer frei von antriebsrelevanten elektrischen oder elektronischen und diesbezüglich stromführenden Teilen ist.
2. Positioniereinrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Messkopf eine an den Spulenarray-Freiraum angepasste, den zur Verfügung stehenden Platz ausnutzende Flächenform besitzt.
3. Positioniereinrichtung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass der Messkopf optische Inkrement-Sensoren und kapazitive Sensoren aufweist.
4. Positioniereinrichtung nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die kapazitiven Sensoren im Flächenrandbereich und mindestens ein optischer Sensor im Zentrum des Messkopfes angeordnet sind.
5. Positioniereinrichtung nach Anspruch 3 oder 4, dadurch gekennzeichnet, dass die kapazitiven Sensoren jeweils aus einem Sensorpaar bestehen, welches den jeweiligen Abstand zur Oberfläche des Flächenmaßstabs erfasst, um hieraus Winkellagen und Bewegungen in z-Richtung zu erfassen.

6. Positioniereinrichtung nach einem der Ansprüche 3 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die optischen Sensoren in Verbindung mit dem Flächenmaßstab Bewegungen in x- und y-Richtung und Dreh- oder Gierbewegungen um die z-Richtung erfassen.
7. Positioniereinrichtung nach einem der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Messkopf eine Dreieckform aufweist.
8. Positioniereinrichtung nach einem der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die jeweilige Spulengruppe als Baueinheit mit Kühlrohren, eine Sandwichanordnung bildend, ausgeführt ist.
9. Positioniereinrichtung nach einem der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die permanentmagnetisch erregten Kreise aus jeweils einem mehrere Segmente umfassenden Halbach-Array bestehen.
10. Positioniereinrichtung nach Anspruch 8 oder 9, dadurch gekennzeichnet, dass die jeweilige Spulengruppe eine Einhausung mit Mitteln zur Zu- und Abführung eines Kühlmediums aufweist.
11. Positioniereinrichtung nach einem der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Läufer als Tragkörper mit Hohlräumen zur Aufnahme des Magnetarrays ausgebildet ist.
12. Positioniereinrichtung nach einem der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass elektro- und/oder permanentmagnetische Mittel zur Gewichtskompensation des Läufers vorgesehen sind.
13. Positioniereinrichtung nach einem der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass

das Spulenarray drei Spulenpaare aufweist, die dreieckförmig und vorzugsweise um jeweils 120° versetzt zueinander angeordnet sind und das Magnetarray drei Magnetreihen aufweist, wobei die Reihen von Magneten bei Mittellage des Läufers in Bezug auf den Stator jeweils mittig zu einem Spulenpaar befindlich sind.

14. Positioniereinrichtung nach einem der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass zur Gewichtskompensation des Läufers Läufer- und Fahrbereich überdeckende ferromagnetische Platten mit dem Stator und permanentmagnetisch erregte Magnetkreise mit dem Läufer verbunden sind und zwischen den ferromagnetischen Platten und den permanentmagnetisch erregten Magnetkreisen ein Luftspaltabstand besteht, wobei die ferromagnetischen Platten bei jeder Lage des Läufers die Polflächen der permanentmagnetisch erregten Magnetkreise, vorzugsweise vollständig, überdecken.

15. Positioniereinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass zur Gewichtskompensation des Läufers Läufer- und Fahrbereich überdeckende ferromagnetische Platten mit dem Stator verbunden sind und mit den ferromagnetischen Platten wechselwirkende Elektromagnete, mit Läufer verbunden, vorgesehen sind, wobei zwischen den ferromagnetischen Platten und den Elektromagneten ein Luftspaltabstand besteht und die ferromagnetischen Platten bei jeder Lage des Läufers die Polflächen der Elektromagnete, vorzugsweise vollständig, überdecken.

16. Positioniereinrichtung nach einem der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass für eine definierte Start- oder Ruhelage des Läufers relativ zum Stator eine hierfür vorgesehene Position mittels Referenzsensoren kontrolliert anfahrbar ist.

17. Positioniereinrichtung nach einem der vorangegangenen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Spulenarray im Stator eingebettet ist und mit der Statoroberfläche im Wesentlichen bündig abschließt.

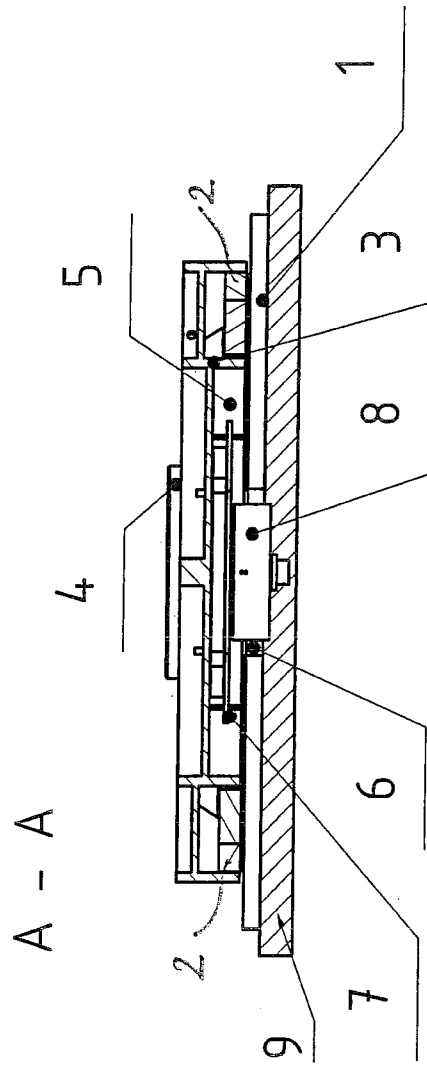


Fig. 1

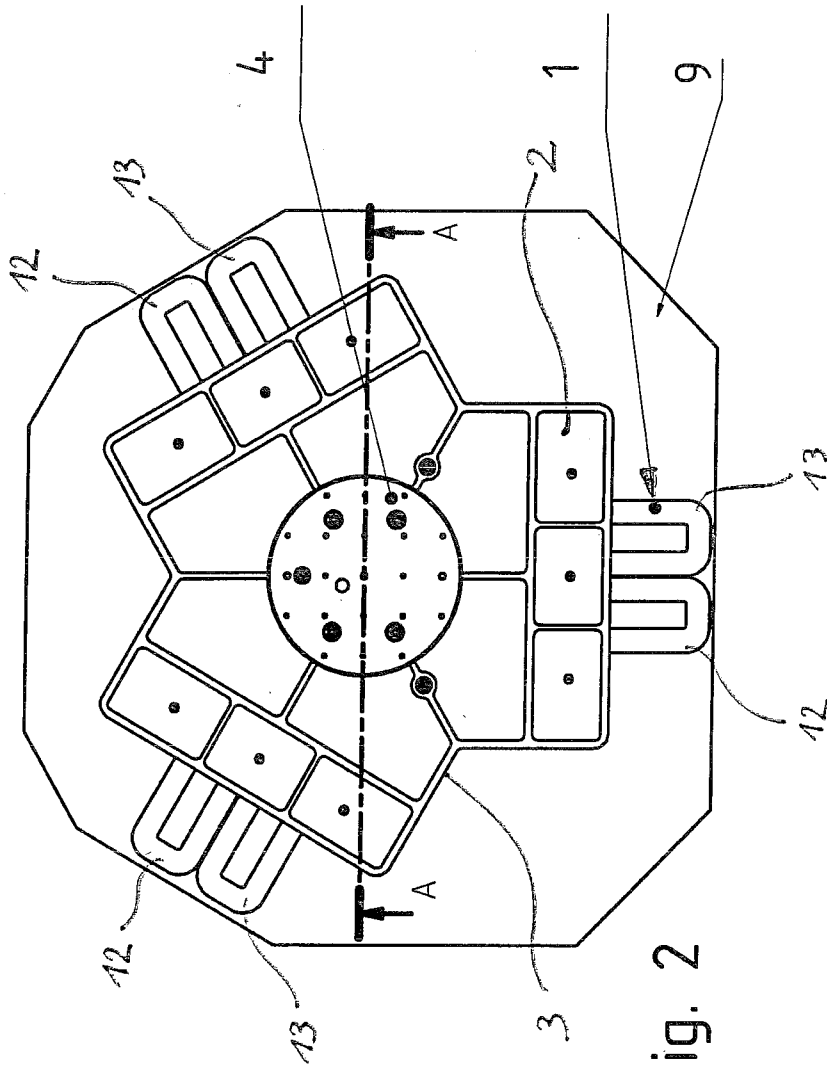


Fig. 2

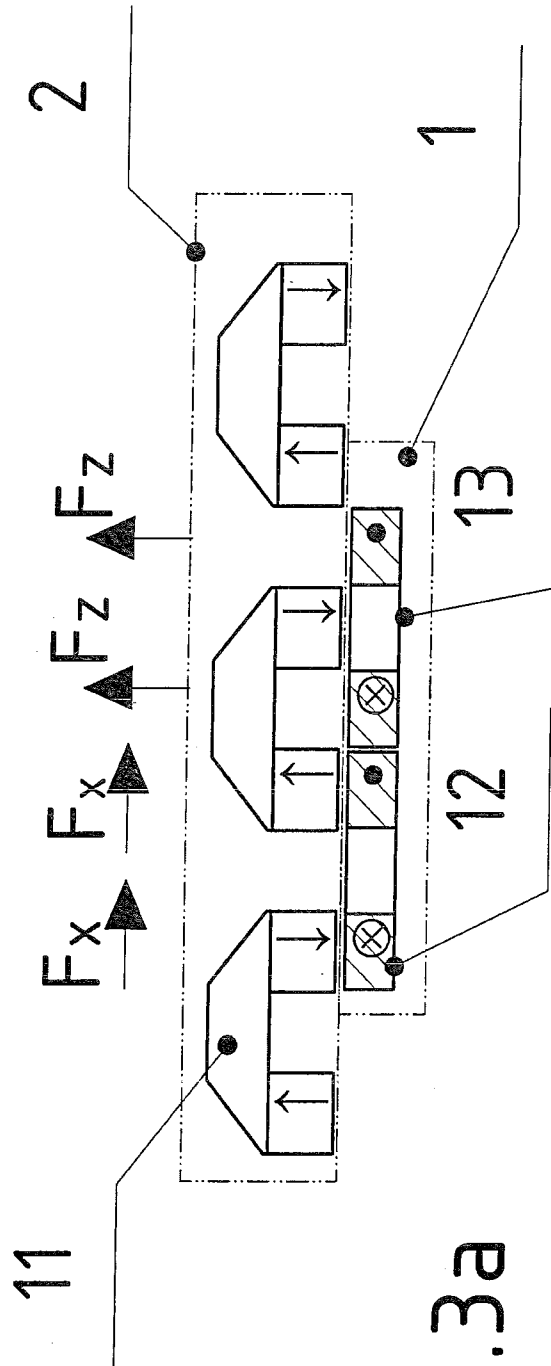


Fig.3a

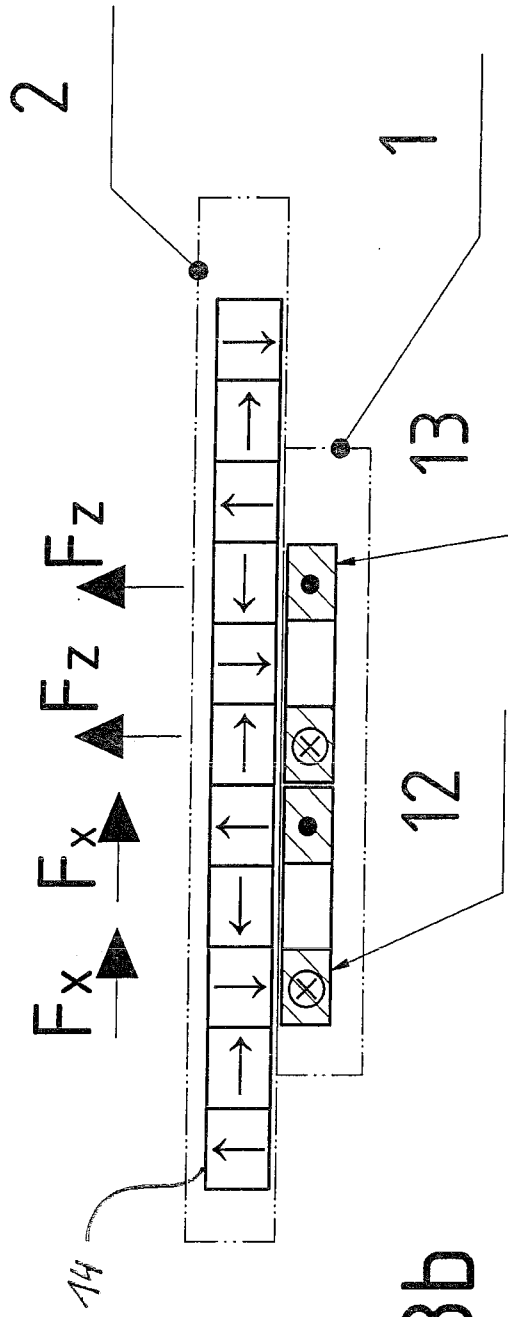


Fig.3b

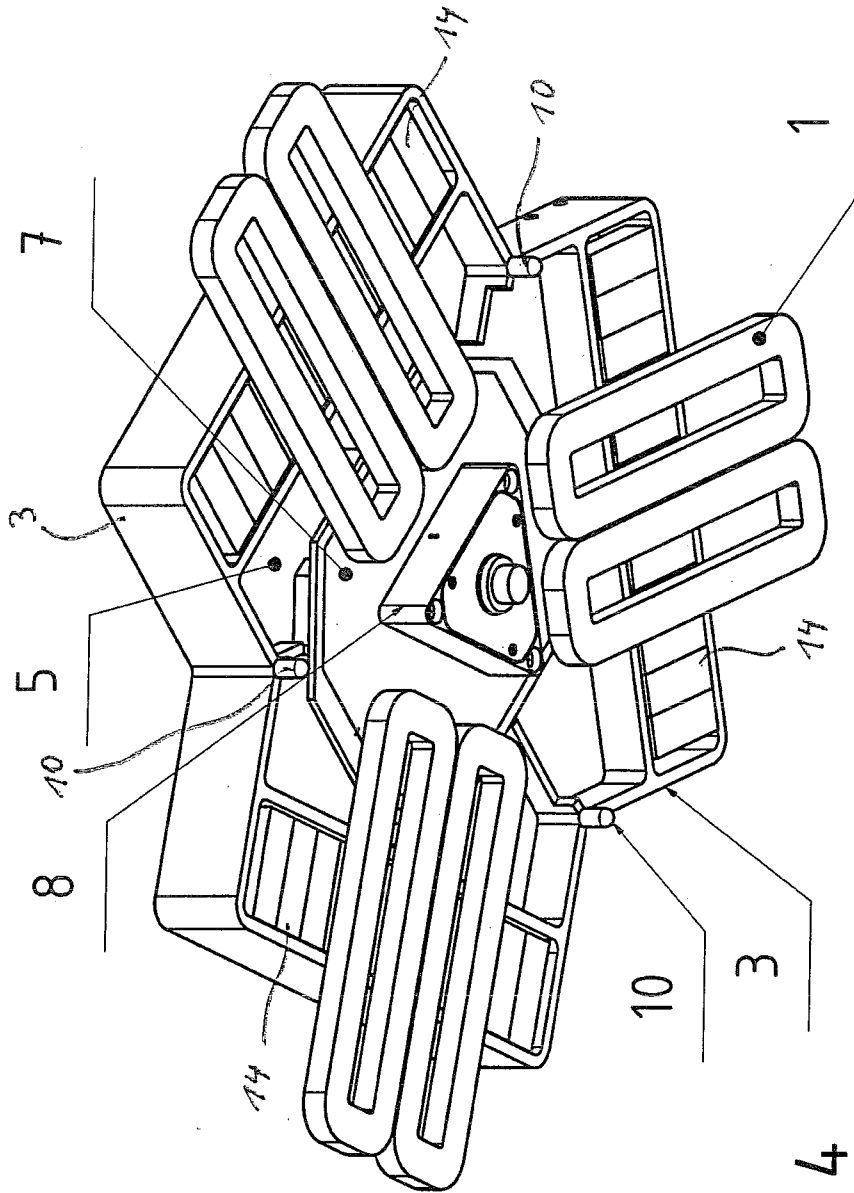


Fig. 4

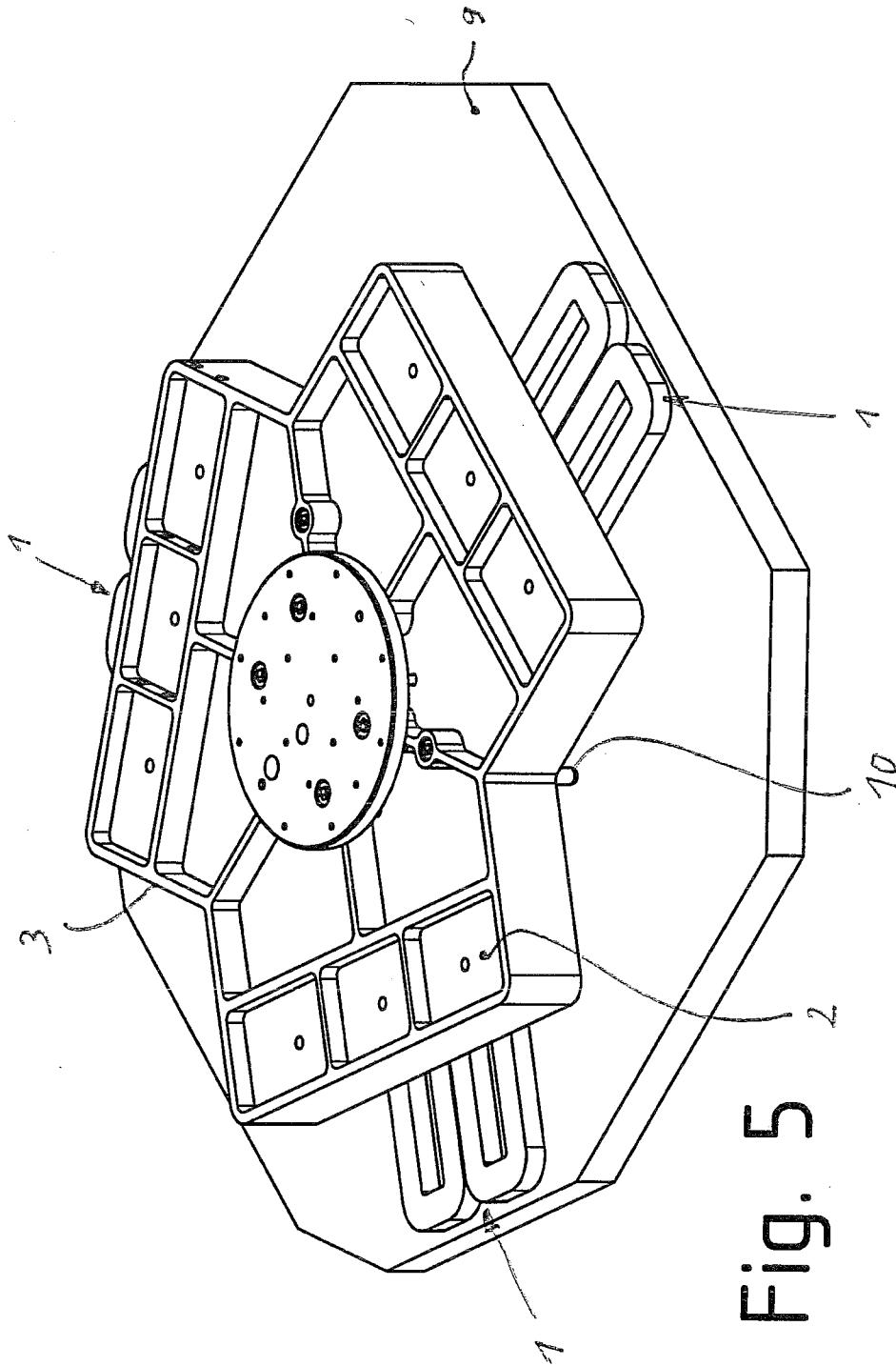


Fig. 5

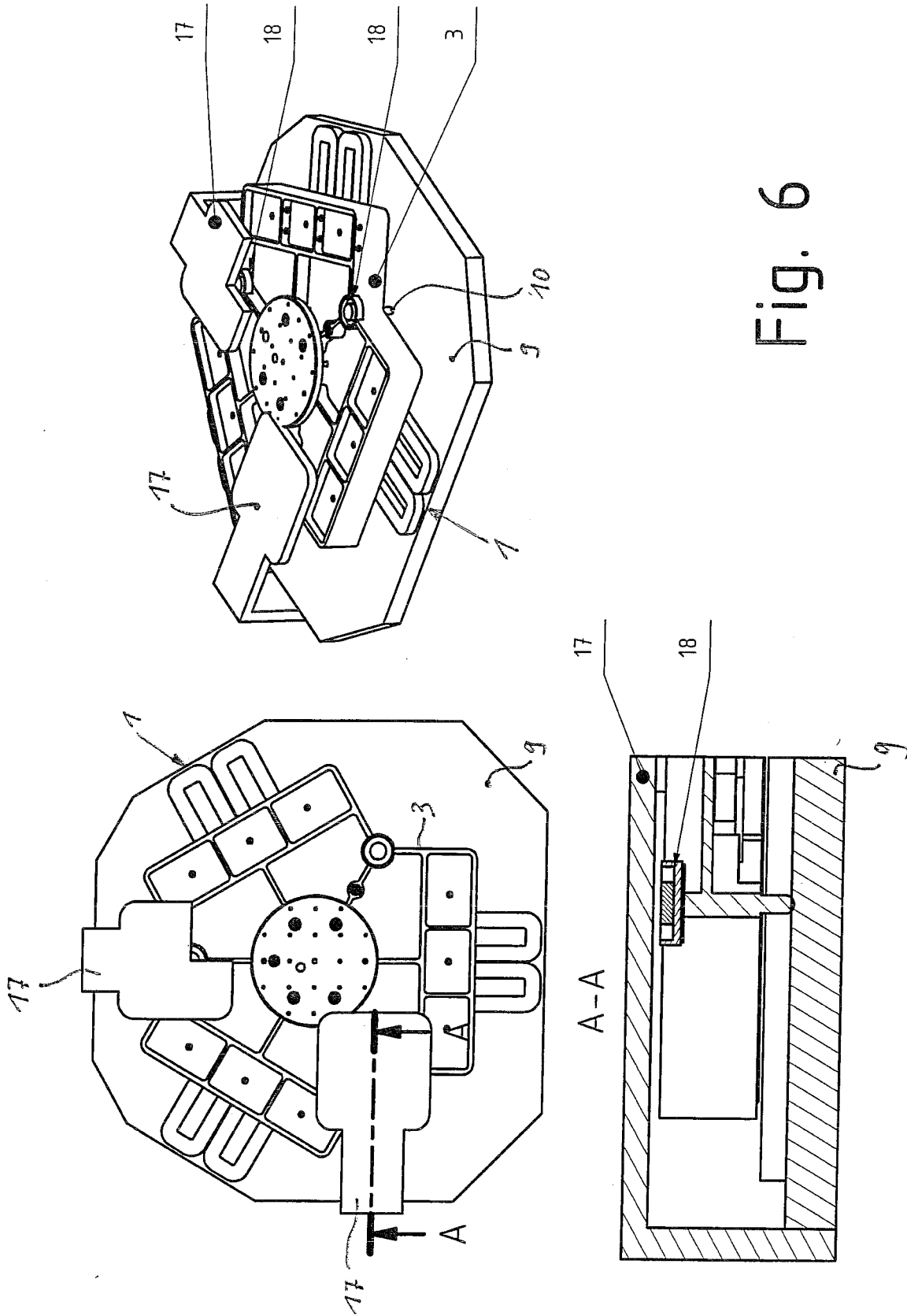


Fig. 6

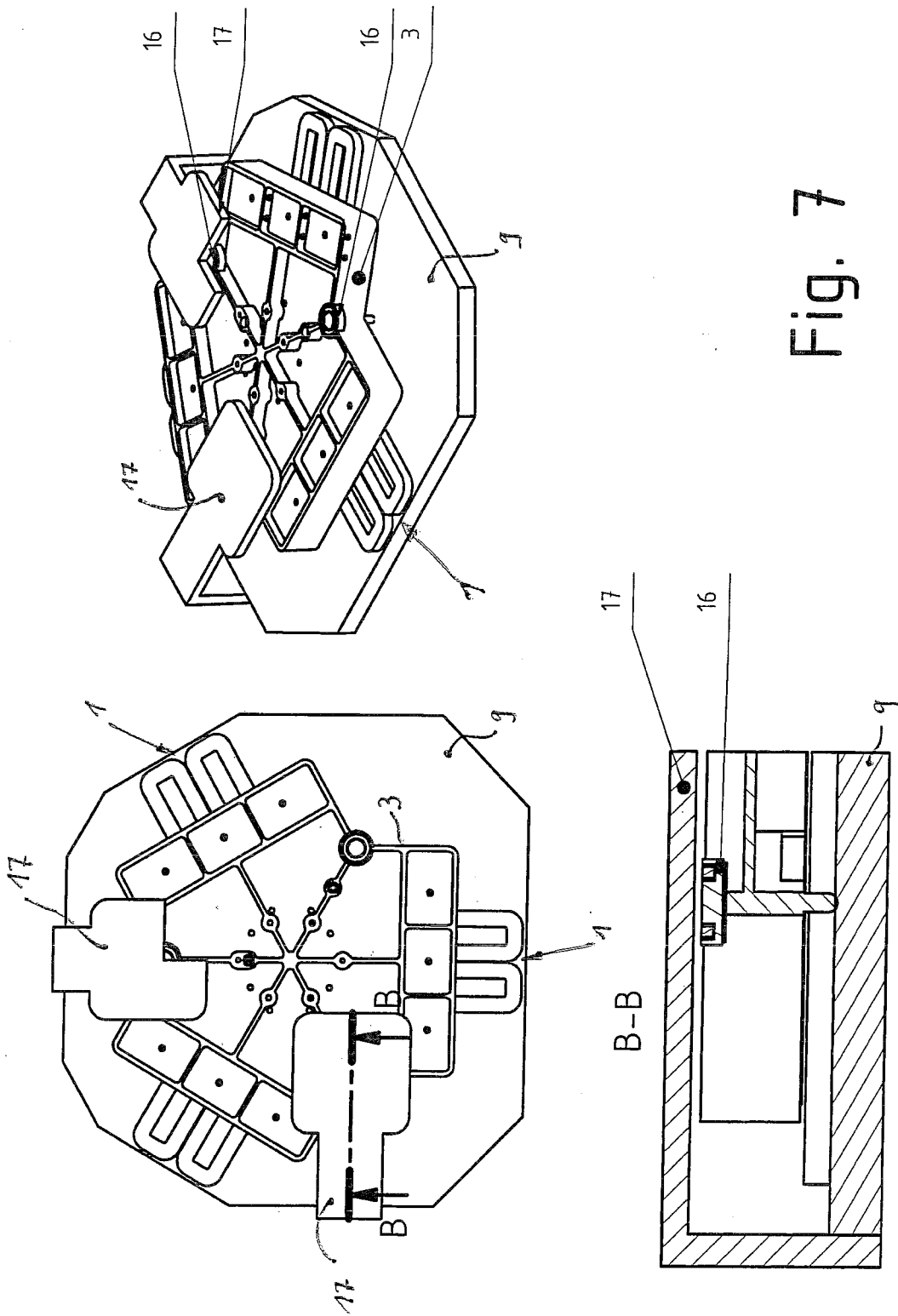


Fig. 7

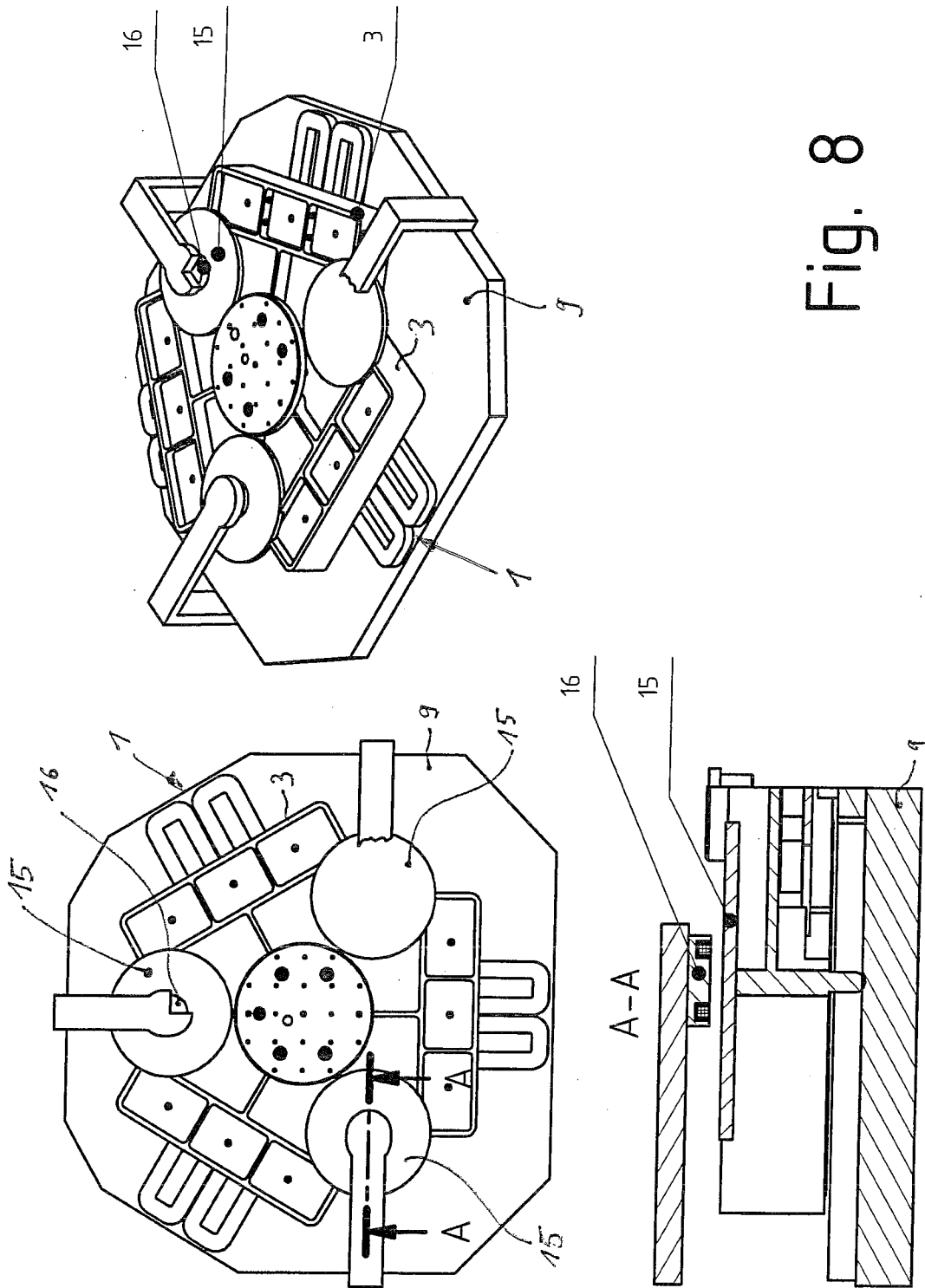


Fig. 8