



18 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

12 **Offenlegungsschrift**
10 **DE 100 36 526 A 1**

61 Int. Cl. 7:
F 16 C 32/04
H 02 K 7/09

21 Aktenzeichen: 100 36 526.4
22 Anmeldetag: 27. 7. 2000
43 Offenlegungstag: 15. 2. 2001

DE 100 36 526 A 1

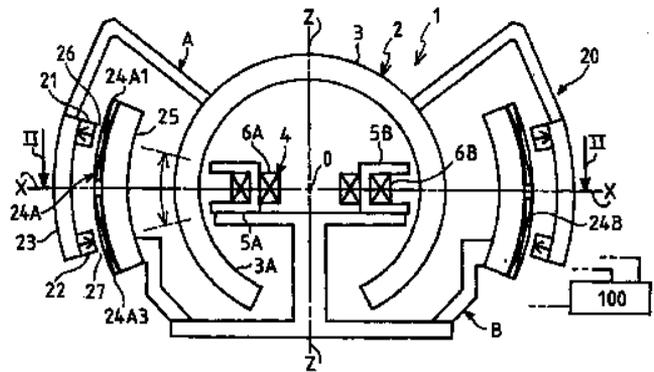
30 Unionspriorität:
9910314 09. 08. 1999 FR
71 Anmelder:
Alcatel, Paris, FR
74 Vertreter:
Dreiss, Fuhlendorf, Steimle & Becker, 70188
Stuttgart

72 Erfinder:
Chassoulier, Damien, Mouans-Sartoux, FR; Chillet,
Christian, Seyssinet-Pariset, FR; Delamare, Jérôme,
Grenoble, FR; Yonnet, Jean-Paul, Meylan, FR

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

54 Zentrierbares Magnetlager mit Kippsteuerung mit großer Amplitude

57 Ein Magnetlager für die Zentrierung und Kippsteuerung eines ersten Körpers (A) in Bezug auf einen zweiten Körper (B) umfaßt: Zentrierelemente (2), die in der Lage sind, diesen ersten Körper in Bezug auf den zweiten Körper wenigstens quer zu der Bezugsachse zu zentrieren; zwei von einem mit dem ersten Körper fest verbundenen ersten ferromagnetischen Anker (23) getragene Kränze (21, 22) mit permanenter Magnetisierung; eine ringförmige Mehrzahl von wenigstens drei Kippwicklungen (24A, 24B), die mit dem zweiten Körper fest verbunden sind und jeweils zwei Gruppen von umlaufenden Adern (24A1, 24A3) umfassen, die in der Lage sind, jeweils gegenüber jedem der Kränze mit permanenter Magnetisierung zu liegen, unabhängig von der Orientierung des hohlen äußeren Bereiches, und eine Erregerschaltung (100), die konstruiert ist, um an die Kippwicklungen Erregerströme anzulegen, die in der Lage sind, in den Luftspalten Kippkräfte zu erzeugen.



DE 100 36 526 A 1

Die Erfindung betrifft ein Magnetlager für die magnetische Zentrierung eines beweglichen Körpers entlang wenigstens einer Achse in Bezug auf einen festen Körper, das ferner Mittel aufweist, die geeignet sind, eine Kippsteuerung mit einer Winkelbewegungsfreiheit von wenigstens plus oder minus 5° zu gewährleisten, die plus oder minus 15° erreichen oder sogar überschreiten kann.

Bekanntlich kann die magnetische Zentrierung eines Körpers in Bezug auf einen anderen entlang einer gegebenen Achse passiv oder aktiv erfolgen, je nachdem, ob die magnetischen Flüsse, die diese Zentrierung gewährleisten, passiv von permanent magnetisierten Elementen oder wenigstens zum Teil aktiv durch Wahl der geeigneten Amplitude eines an Wicklungen angelegten Erregerstromes erzeugt werden.

Die Zentrierung eines Körpers in Bezug auf einen anderen in drei verschiedenen, nicht koplanaren Achsen kann aus physikalischen Gründen nur passiv erfolgen.

Die Verwendung von Permanentmagneten hat bei einer gegebenen Zentrierleistung den Vorteil, daß die für die Zentrierung erforderliche elektrische Energie im Vergleich zu einer Konfiguration ohne Magnet minimiert wird.

In der Praxis kann der Körper, der in Bezug auf einen festen Körper zentriert werden soll, unterschiedliche Freiheitsgrade in Bezug auf diesen festen Körper haben. Zum Beispiel kann der bewegliche Körper ein Rotor sein, der zu einer permanenten oder nicht-permanenten Drehbewegung um eine Drehachse angetrieben ist, die häufig mit einer der drei Zentrierachsen zusammenfällt. Eine solche Konfiguration hat eine große praktische Bedeutung, insbesondere auf dem Gebiet der Raumfahrt, bei Trägheits- oder Kreislerädern oder bei Reaktionsrädern.

Zusätzlich zu dieser Drehbewegung kann es notwendig sein, eine Kippbewegung um eine oder mehrere zur Drehachse transversale Achsen zu gewährleisten. Deshalb ist es auf dem Gebiet der Satelliten nützlich, die Drehachse eines Trägheits- oder Reaktionsrades neigen zu können, z. B. um zur Lagesteuerung des Satelliten beizutragen.

Es sind bereits Magnetlager vorgeschlagen worden, die die Möglichkeit der Kippung erwähnen. Insbesondere kann das Dokument WO 89/12178 genannt werden.

Im allgemeinen verlieren die Magnetlager, bei denen eine Möglichkeit der Kippung erwähnt wird, schnell ihre Zentrierfähigkeit, sobald die Kippung Winkel in der Größenordnung von 1° übersteigt. Bei dem oben genannten Dokument WO 89/12178 wird eine Kippbewegung um zur Drehachse transversale Achsen nur als eine Störung erwähnt, die kompensiert werden muß. Außerdem erlaubt die global plane (parallel zur Drehachse stark abgeflachte) Konfiguration der diversen Komponenten der beschriebenen Vorrichtung keine Kippbewegung mit großer Amplitude (nicht mehr als in der Größenordnung von einem Grad).

Eine Kippsteuerung mit einer großen Bewegungsfreiheit scheint a priori schwer zu realisieren, denn um starke Drehmomente elektromagnetisch erzeugen zu können, scheint es notwendig, über starke Wicklungen zu verfügen (um lokal starke Kräfte zu erzielen), und sie in einem großen Abstand um eine durch diesen Mittelpunkt verlaufende Bezugsachse anzuordnen (damit diese Kräfte zu großen Drehmomenten führen). Diese zwei Anforderungen zwingen dazu, die Elemente, die gemeinsam die Kippsteuerung gewährleisten, auf einem Kreis von großem Durchmesser anzuordnen; wenn man eine Kippbewegung mit einer großen Winkelbewegungsfreiheit steuern will, ist es notwendig, daß die Elemente, die diese Bewegung gewährleisten, sich parallel zu der Bezugsachse über eine große Entfernung erstrecken,

doch stellt sich dann das Problem, daß die Kippbewegung bestimmte Oberflächen verschiebt und neigt, die die Luftspalte bilden, durch die die von den Wicklungen erzeugten magnetischen Flüsse fließen, was zu einer Verringerung der Breite von manchen dieser Luftspalte führt; wenn man verhindern will, daß diese Breite Null wird, muß man diesen Luftspalten eine große nominale Breite geben, was für einen gegebenen Flußpegel in diesen dazu zwingt, die Größe der Wicklungen und die an sie anzulegende Leistung zu erhöhen. Außerdem ist darauf zu achten, daß jeder Kontakt zwischen den Oberflächen, die die anderen Luftspalte des Lagers bilden, insbesondere denjenigen, die zur Zentrierung des beweglichen Körpers, parallel oder quer zu der Bezugsachse, dienen, vermieden wird.

Gegenstand der Erfindung ist ein Magnetlager (manchmal wird sprachmißbräuchlich von magnetischer Aufhängung gesprochen), das in der Lage ist, eine Kippbewegung eines um einen Kippmittelpunkt kippbeweglichen ersten Körpers in Bezug auf einen zweiten Körper mit Kippbewegungsfreiheiten von wenigstens plus oder minus 5° zu steuern, die deutlich größer als die mit den gegenwärtig bekannten Magnetlagern erreichbaren sind, und die insbesondere Kippwinkel von plus oder minus 15° erreichen oder sogar überschreiten können, das gute Zentriereigenschaften parallel und quer zu einer Bezugsachse aufweist, aber nur einen geringen Energieverbrauch hat.

Des weiteren hat sie ein Magnetlager des oben erwähnten Typs zum Gegenstand, das kompakt innerhalb eines freien mittleren Raum umgebenden ringförmigen Volumens ist, so daß ein Einbau eines Gerätes in der Mitte des Lagers bequem möglich ist.

Zu diesem Zweck schlägt die Erfindung ein Magnetlager für die Zentrierung und Kippsteuerung eines um einen Kippmittelpunkt mit einer Winkelbewegungsfreiheit von wenigstens plus oder minus 5° kippbeweglichen ersten Körpers in Bezug auf einen zweiten Körper mit einer durch den Kippmittelpunkt verlaufenden Bezugsachse vor, welches aufweist: Zentrierelemente, die in der Lage sind, den ersten Körper in Bezug auf den zweiten Körper wenigstens quer zu der Bezugsachse zu zentrieren, und

- zwei von einem mit dem ersten Körper fest verbundenen ersten ferromagnetischen Anker getragenen Kränzen mit permanenter Magnetisierung, die die Bezugsachse umgeben und jeweils eine Orientierung der Magnetisierung haben, die an jedem Punkt wenigstens ungefähr durch die Bezugsachse verläuft, wobei diese Kränze parallel sind und parallel zu der Bezugsachse beiderseits des Kippmittelpunktes versetzt sind und freie Polflächen haben, die im wesentlichen durch Abschnitte einer gleichen, auf den Kippmittelpunkt zentrierten Kugelfläche gebildet sind,

- eine ringförmige Mehrzahl von wenigstens drei Kippwicklungen, die mit dem zweiten Körper fest verbunden sind und jeweils zwei Gruppen von umlaufenden Adern umfassen, die eingerichtet sind, um jeweils jedem der Kränze mit permanenter Magnetisierung gegenüber zu liegen, unabhängig von der Orientierung des hohlen äußeren Bereiches in Bezug auf den Kippmittelpunkt innerhalb der Kipp-Winkelbewegungsfreiheit, wobei diese Wicklungen von einem zweiten ferromagnetischen Anker getragen sind, der mit den magnetisierten Kränzen Luftspalte bildet, deren Breite über die gesamte Kipp-Winkelbewegungsfreiheit hinweg konstant bleibt,

- und eine Erregerschaltung, die konstruiert ist, um an die Kippwicklungen Erregerströme anzulegen, die geeignet sind, um Kippkräfte in den Luftspalten zu erzeugen.

gen.

Die Tatsache, daß die Oberflächen, welche die zur Erzeugung der Kippkräfte dienenden Luftspalte definieren, eine nicht verschwindende Neigung im Bezug auf die Bezugsachse haben, ermöglicht eine Konstanz der Breite dieser Luftspalte und damit eine Konstanz der Kippsteuereigenschaften bei geringem Stromverbrauch (es genügt, einen geringen Wert für diese konstante Breite zu wählen).

A posteriori mag es offensichtlich erscheinen, diesen Luftspalten eine nichtverschwindende Neigung zu geben, doch ist dies nach den Kenntnissen der Erfinder bislang nicht vorgeschlagen worden, zweifellos aufgrund bestimmter Vorurteile, darunter die Annahme, daß eine Neigung der die Luftspalte definierenden Oberflächen a priori inkompatibel mit der Existenz einer Bewegungsfreiheit parallel zu dieser Bezugsachse sei (einer Bewegungsfreiheit, innerhalb von der die axiale Zentrierung stattfinden muß), und/oder die Annahme, daß es sicher sehr schwierig sei, solche geeigneten Oberflächen praktisch herzustellen und anschließend die diversen ortsfesten und beweglichen Elemente des Lagers berührungslos so zu positionieren, daß die Gesamtheit der sowohl zur Zentrierung als auch zur Kippbewegung beitragenden Luftspalte tatsächlich die gewünschten Geometrien und Abmessungen hätten. Schließlich gab es zweifellos das Vorurteil, das in der Annahme bestand, daß eine Kippsteuerung mit großer Bewegungsfreiheit mit der Existenz einer magnetischen Zentrierung inkompatibel sei, weil die bekannten magnetischen Zentriervorrichtungen eine Zentrierung in drei Richtungen, (z. B. der Bezugsachse und zwei Querachsen) nur dann gewährleisten können, wenn der bewegliche Körper in Bezug auf den ortsfesten Körper (oder allgemeiner in Bezug auf das, demgegenüber der bewegliche Körper zentriert werden soll) eine gleiche Orientierung beibehält. Es hat sich jedoch gezeigt, daß die Neigung, die man den diese Luftspalte bildenden Polflächen geben muß, um eine erhebliche Kippbewegung von $\pm 10^\circ$ oder mehr oder sogar $\pm 15^\circ$ in Bezug auf eine die Bezugsachse im Kippmittelpunkt schneidende Querebene zu erreichen, bescheiden bleibt, und in keiner Weise die axiale Zentrierung behindert und auch keine echten Herstellungs- oder Montageprobleme aufwirft.

Dies gilt selbst dann, wenn man sich entscheidet, die Zentrierelemente radial innerhalb der Kränze mit Permanentmagnetisierung und der ringförmigen Mehrzahl von Wicklungen anzuordnen.

Die Kippwicklungen werden nämlich vorteilhafterweise durch die Erregerschaltung so erregt, daß nicht nur Kippkräfte (z. B. durch Erregen von zwei Wicklungen derart, daß zwei Kräfte in entgegengesetzten Richtungen erzeugt werden), sondern auch Zentrierkräfte parallel zur Bezugsachse (z. B. durch Erregen von zwei Wicklungen derart, daß gleichgerichtete Kräfte erzeugt werden) erzeugt werden.

Außerdem verläuft die lokale Richtung der Magnetisierung der Kränze vorzugsweise durch den Kippmittelpunkt, was den Vorteil hat, daß die diesen Luftspalt kreuzenden Flußlinien maximiert werden.

Vorzugsweise haben die zwei Kränze mit permanenter Magnetisierung gleiche und zueinander im Bezug auf den Kippmittelpunkt symmetrische Durchmesser, wohingegen die Kippwicklungen in Bezug auf die Querebene symmetrisch sind.

Dies vereinfacht die Herstellung der Kippsteuermittel (die zwei Kränze können gleich sein).

In der Praxis führt diese Symmetrie der Positionierung der Kippsteuermittel zu einer Symmetrie der Kippbewegungsfreiheit in Bezug auf die durch den Kippmittelpunkt verlaufende Querebene.

Die zwei Kränze haben vorzugsweise in einer die Bezugsachse enthaltenden Ebene einen Abstand, der bezogen auf den Kippmittelpunkt einem Winkelversatz von wenigstens 10° , vorzugsweise wenigstens 20° entspricht. In dem oben genannten Fall, daß die Kränze in Bezug auf die Querebene symmetrisch sind, läuft diese Konfiguration darauf hinaus, daß die zwei Kränze in Bezug auf die durch den Kippmittelpunkt verlaufende Querebene einen Winkelversatz von wenigstens $\pm 5^\circ$ definieren.

Um die Effizienz der Kippsteuermittel zu maximieren, sind die umlaufenden Adern jeder Gruppe von Wicklungen benachbart, in Form einer abgeflachten Schicht, auf einer Kugeloberfläche des zweiten Ankers angeordnet, die um den Kippmittelpunkt zentriert ist. Diese Nebeneinanderordnung in Schichten der umlaufenden Adern jeder Gruppe hat den Vorteil, daß die Dicke der Luftspalte, in denen sich die Adern befinden, minimiert wird.

Wie bereits gesagt, liegen die umlaufenden Adern der Kippwicklungen über die gesamte Kippbewegungsfreiheit hinweg den magnetisierten Kränzen gegenüber. Hierfür können die Kränze in einer durch die Bezugsachse verlaufenden Ebene eine Winkelamplitude haben, die kleiner ist als die jeder Gruppe von umlaufenden Adern jeder Wicklung. Auf diese Weise liegt in jeder Kippkonfiguration die gesamte freie Polfläche der magnetisierten Kränze umlaufenden Adern gegenüber. Bei einer anderen Variante jedoch haben die Kränze in dieser durch die Bezugsachse verlaufenden Ebene eine Winkelamplitude, die größer ist als die jeder Gruppe von umlaufenden Adern jeder Wicklung, so daß in diesem Fall die umlaufenden Adern jeder Gruppe ständig in einem der von einem der ringförmigen Kränze gebildeten Luftspalte bleiben.

Vorzugsweise ist der zweite Anker (derjenige, an dem die Kippwicklungen gehalten sind), radial innerhalb des ersten Ankers (demjenigen, der die magnetisierten Kränze trägt) angeordnet.

Bei einer ersten Konfiguration können die Zentrierelemente teilweise durch Elemente (die magnetisierten Kränze) der Kippmittel gebildet sein. In diesem Fall umfassen die Zentrierelemente:

- zwei parallele ringförmige Mehrheiten von wenigstens drei mit dem zweiten ferromagnetischen Anker fest verbundenen Zentrierwicklungen, wobei diese Wicklungen jeweils einen Abschnitt dieses zweiten ferromagnetischen Ankers umgeben, diese Abschnitte jeweils auf zwei parallele Mehrheiten von ferromagnetischen Abschnitten aufgeteilt sind, die in der Lage sind, jeweils jedem der Kränze mit permanenter Magnetisierung unabhängig von der Orientierung des hohlen äußeren Bereiches in Bezug auf den Kippmittelpunkt innerhalb der Kipp-Winkelbewegungsfreiheit gegenüberzuliegen, wobei die Erregerschaltung konstruiert ist, um an die Zentrierwicklungen Erregerströme anzulegen, die in der Lage sind, Kräfte zu erzeugen, die zur Herstellung einer radialen Zentrierung dieses beweglichen Körpers geeignet sind.

Dadurch, daß die Zentrierwicklungen einerseits und die Kippwicklungen andererseits mit den gleichen magnetischen Kränzen zusammenwirken, wird innerhalb eines ringförmigen Volumens eine große Kompaktheit erreicht, wobei anzumerken ist, daß die Anbringung dieser diversen Wicklungen auf dem gleichen Anker nicht zu signifikanten Kopplungsproblemen zwischen den verschiedenen durch die Kränze und jeden der Typen von Wicklungen gebildeten Magnetkreisen führt.

Vorteilhafterweise erstrecken sich die umlaufenden

Außerdem der Kippwicklungen entlang der von den Zentrierwicklungen umgebenen ferromagnetischen Abschnitte, wodurch vermieden wird, daß die diversen Wicklungen in einem axialen Abstand voneinander angeordnet werden müssen, und was zur Kompaktheit der Anordnung beiträgt.

Die Zentrier- oder Kippwicklungen sind vorteilhafterweise in gleicher Zahl vorhanden, was ihre elektrische Steuerung vereinfacht. Außerdem haben diese Wicklungen vorzugsweise die gleiche Winkelausdehnung oder -amplitude um die Bezugsachse, was zur Vereinfachung der Realisierung beiträgt. Die diversen Wicklungen liegen einander vorzugsweise axial gegenüber, wodurch vermieden wird, daß die in der Praxis kugelförmige Oberfläche des zweiten Ankers an zu vielen Stellen gestört werden muß.

Jede Mehrzahl umfaßt vorzugsweise vier Wicklungen, die auf zwei um 90° um die Bezugsachse versetzte Paare von radial gegenüberliegenden Wicklungen verteilt sind.

Vorzugsweise ist der zweite Anker (derjenige, der die Kippwicklungen trägt) radial innerhalb des ersten Ankers (demjenigen, der die magnetisierten Kränze trägt) angeordnet.

Bei einer anderen Konfiguration sind die Zentrierelemente von den oben erwähnten Kränzen und Kippwicklungen unabhängig.

So umfassen die Zentrierelemente vorzugsweise:

- einen mit dem ersten Körper fest verbundenen hohlen äußeren Bereich mit einer inneren Oberfläche, deren Form ein Abschnitt einer Kugelfläche ist, deren Mittelpunkt im wesentlichen mit dem Kippmittelpunkt zusammenfällt und der sich um die Bezugsachse beiderseits einer Querebene erstreckt, die auf dieser Bezugsachse senkrecht steht und durch den Kippmittelpunkt verläuft, wobei der hohle äußere Bereich wenigstens zum Teil aus einem ferromagnetischen Material besteht,
- einen mit dem zweiten Körper fest verbundenen inneren Bereich mit einer Mehrzahl von wenigstens drei um die Bezugsachse winkerversetzten ferromagnetischen Zonen, wobei jede Zone mit der inneren Oberfläche des hohlen äußeren Bereiches zwei Zentrierluftspalte definiert und mit einer spezifischen Wicklung ausgestattet ist, die in der Lage ist, magnetische Flußlinien zu erzeugen, die sich über die zwei Luftspalte schließen, wobei diese Wicklungen Teil einer Anordnung von Wicklungen sind, die an die Erregerschaltung angeschlossen ist, die konstruiert ist, um in den Zentrierluftspalten Magnetflüsse zu erzeugen, die in der Lage sind, den hohlen äußeren Bereich in Bezug auf den inneren Bereich wenigstens quer zu der Bezugsachse zu zentrieren.

Die Zentrierelemente können eine sehr einfache Struktur haben, bei der jede ferromagnetische Zone ein einfacher Elektromagnet (U-förmiges ferromagnetisches Teil mit zwei Polflächen, die der inneren Oberfläche des hohlen äußeren Bereiches zugewandt sind, so daß sie zwei Luftspalte bilden, und eine Wicklung, die es ermöglicht, veränderliche Flußlinien in diesen Luftspalten zu steuern).

Der innere Bereich umfaßt vorteilhafterweise zwei getrennte Elemente, die beiderseits der Querebene angeordnet sind und jeweils eine Mehrzahl von wenigstens drei gegeneinander um die Bezugsachse winkerversetzten ferromagnetischen Zonen aufweisen, wobei jede Zone mit der inneren Oberfläche des hohlen äußeren Bereiches zwei Luftspalte bildet und mit einer spezifischen Wicklung versehen ist, die in der Lage ist, magnetische Flußlinien zu erzeugen, die sich über die zwei Luftspalte schließen, wobei jedes Element

eine Gruppe von Wicklungen umfaßt, die wenigstens die spezifischen Wicklungen der ferromagnetischen Zonen umfaßt, wobei diese Elemente parallel zur Bezugsachse durch einen Zwischenraum getrennt sind, der eine solche Reluktanz aufweist, daß er verhindert, daß von der Gruppe von Wicklungen eines der Elemente erzeugte Flußlinien durch diesen Zwischenraum fließen können, wobei die Wicklungen jeder Gruppe an die Erregerschaltung angeschlossen sind.

Man erkennt, daß die Zentrierelemente somit vorteilhafterweise einen sehr kompakten inneren Bereich umfassen, an dem einige Wicklungen und, innerhalb des die zwei getrennten Elemente trennenden Zwischenraumes, eventuell ein Permanentmagnet montiert sind (siehe unten): der Platzbedarf und das Gesamtgewicht sind deshalb gering. Um diesen inneren Bereich herum befindet sich ein hohler äußerer Bereich, dessen Innenoberfläche als Hohlkugel geformt ist (was es bildlich gesprochen erlaubt, das erfindungsgemäße Magnetlager als Kugelgelenklager zu bezeichnen), so daß die mit der inneren Oberfläche gebildeten Luftspalte in einem Abstand von der erwähnten Querebene gegen die Bezugsachse geneigt sind und zur Erzeugung von Zentrierkräften parallel zu dieser Bezugsachse beitragen können.

Wie oben angegeben, kann der Zwischenraum, der die zwei getrennten Elemente des inneren Bereiches trennt, von einem Magneten belegt sein, dessen Permanentmagnetisierung parallel zu der Bezugsachse orientiert ist. Der Magnet erzeugt so magnetische Flußlinien, und zwar permanent, ohne elektrische Energie zu verbrauchen. Umgekehrt verläuft keine eventuell durch den elektrischen Stromfluß in einer der Wicklungen erzeugte Flußlinie durch den Magneten.

Ein anderer Fall von praktischer Bedeutung ist der, wo dieser Zwischenraum ein freier Raum ist, der einen ortsfesten Luftspalt von großer Ausdehnung bildet, d. h. der kein festes Material abgesehen von einem eventuellen nichtferromagnetischen Verbindungsteil enthält, das die feste Verbindung jedes Elementes mit dem anderen gewährleistet. Dieser Zwischenraum enthält dann, je nach der Umgebung, in der das Magnetlager sich befindet, Vakuum oder Luft.

Jede ferromagnetische Zone bildet mit den Luftspalten und einem ferromagnetischen Abschnitt des hohlen äußeren Bereiches sowie mit der zugeordneten spezifischen Wicklung einen magnetischen Aktor. Diese diversen magnetischen Aktoren können unabhängig sein. Aus Gründen der einfacheren Herstellung sowie der Effektivität ist es günstig, wenn die ferromagnetischen Zonen jedes Elementes Bestandteil ein und desselben ferromagnetischen Teiles sind.

Es ist leicht zu verstehen, daß die Herstellung der Zentrierelemente leichter und preiswerter ist, wenn die zwei getrennten Elemente mit einer gleichen Geometrie gewählt werden. Außerdem ist die Steuerung der spezifischen Wicklungen des Magnetlagers einfacher, wenn die Zonen jedes Elementes symmetrisch in Bezug auf die Querebene angeordnet sind, die den Zwischenraum zwischen den getrennten Elementen kreuzt.

Mit dem gleichen Ziel der Vereinfachung ist die Zahl der ferromagnetischen Zonen jedes Elementes vorzugsweise gerade, und jede ferromagnetische Zone ist bezogen auf die Bezugsachse einer anderen ferromagnetischen Zone gegenüberliegend angeordnet. Ein besonders einfacher Fall ist der, wo jedes Element vier ferromagnetische Zonen aufweist, die in zwei Paare von diametral in Bezug auf die Bezugsachse gegenüberliegenden Zonen aufgeteilt sind, wobei diese Paare um die Referenzachse um 90° versetzt sind.

Jede ferromagnetische Zone jedes Elementes umfaßt vorzugsweise erste und zweite gegen die innere Oberfläche des hohlen äußeren Bereiches gerichtete Vorsprünge oder Schenkel, um die Luftspalte dieser Zone zu bilden, wobei

der erste dieser Vorsprünge oder Schenkel von der spezifischen Wicklung umgeben ist. Die zweiten Vorsprünge dieser ferromagnetischen Zonen bilden vorteilhafterweise einen Teil eines gleichen ringförmigen Vorsprunges, was zur Vereinfachung der Herstellung des Elementes beiträgt. Dieser ringförmige Vorsprung ist vorteilhafterweise gegenüber den ersten Vorsprüngen in Bezug auf die Querebene angeordnet, die den die Elemente trennenden Zwischenraum kreuzt. Sofern der innere Bereich global die Form einer Kugel hat, ermöglicht es dies, die spezifischen Wicklungen in einer Region mit dem größten Durchmesser anzuordnen und so die Wicklungsmenge zu optimieren, die in dem Magnetlager montiert werden kann.

Eine zusätzliche Wicklung ist vorteilhafterweise um jedes Element zwischen den ersten und den zweiten Vorsprüngen der ferromagnetischen Zonen angeordnet, um auf besonders einfache Weise, in Kombination mit den vorgenannten spezifischen Wicklungen oder ohne, Flußlinien zu erzeugen, die in der Lage sind, sich um die gesamte Bezugsachse zu verteilen.

Selbstverständlich sind diese zusätzlichen Wicklungen an die Erregerschaltung angeschlossen, die konstruiert ist, um selektiv Erregerströme an diese zusätzlichen Wicklungen anzulegen. Die magnetischen Flüsse, zu deren Erzeugung solche zusätzlichen Wicklungen angelegt sind, tragen zu einer Zentrierung des hohlen äußeren Bereiches parallel zur Bezugsachse bei. Die spezifischen Wicklungen jeder der ferromagnetischen Zonen können ihrerseits auch elektrisch versorgt werden, um die gesamte Zentrierung parallel zu dieser Bezugsachse oder einen Teil davon zu gewährleisten.

So können nicht nur die Kippwicklungen, sondern auch die spezifischen Wicklungen und die zusätzlichen Wicklungen erregt werden, um nach Wahl die gesamte axiale Zentrierung oder einen Teil davon (parallel zur Bezugsachse) zu gewährleisten.

Der hohle äußere Bereich kann eine große Winkelausdehnung oder -amplitude von z. B. plus oder minus 50° in Bezug auf die zu der Bezugsachse senkrechte Querebene haben. Dieser hohle äußere Bereich kann sogar nur eine einzige Öffnung aufweisen, die zur festen Verbindung der Elemente mit einem äußeren Gestell bestimmt ist, wobei dieser hohle äußere Bereich die Bezugsachse gegenüber dieser einzigen Öffnung schneidet.

Innerhalb eines gleichen Elementes sind die Wicklungen jeder der ferromagnetischen Zonen vorteilhafterweise in Umfangsrichtung benachbart, um die Oberfläche der Polfläche der Vorsprünge zu maximieren, um die die Wicklungen gewickelt sind. Dies führt zu einer Maximierung der Zentrierleistung. Die zusätzliche Wicklung ist, wenn sie existiert, ebenfalls vorteilhafterweise parallel zu der Bezugsachse den spezifischen Wicklungen jeder der ferromagnetischen Zonen benachbart, was eine optimale Ausnutzung des Platzes innerhalb des hohlen äußeren Bereiches garantiert.

Gegenstände, Merkmale und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden, als nicht einschränkendes Beispiel angegebenen Beschreibung mit Bezug auf die beigefügten Zeichnungen. Es zeigen:

Fig. 1 einen axialen Schnitt entlang der Linie I-I aus **Fig. 2** durch ein erfindungsgemäßes Magnetlager in einer Ebene, die die Bezugsachse Z-Z enthaltend ist;

Fig. 2 einen Querschnitt entlang der Linie I-I aus **Fig. 1**;

Fig. 3 eine Teilansicht dieses Lagers in der Ebene der **Fig. 1**, die einen Erregungszustand der Wicklungen zeigt, der ein Kippmoment erzeugt;

Fig. 4 eine andere Teilansicht dieses Lagers in der Ebene der **Fig. 1**, die einen Erregungszustand der Wicklungen zeigt, der eine axiale Zentrierkraft erzeugt;

Fig. 5 einen Schnitt, der eine Ausführungsvariante des

Lagers aus **Fig. 1** zeigt;

Fig. 6 eine axiale Ansicht entlang der Linie VI-VI aus **Fig. 7** einer anderen Ausgestaltung eines erfindungsgemäßen Lagers;

Fig. 7 einen Querschnitt entlang der Schnittlinie VII-VII aus **Fig. 6**;

Fig. 8 eine Teilansicht des Lagers aus **Fig. 6**, die die Zentrierelemente zeigt, und in der von dem zentralen Magneten erzeugte Flußlinien auftreten;

Fig. 9 eine Ansicht analog der der **Fig. 8**, in der Pfeile auftreten, deren Amplitude und Richtung den von den die Luftspalte kreuzenden Magnetflüssen erzeugten Kräften entsprechen;

Fig. 10 eine Ansicht analog der der **Fig. 8**, die aber zusätzlich Flußlinien zeigt, die durch Anlegen von Erregerströmen an bestimmte Wicklungen erzeugt werden, die für eine Querzentrierung bestimmt sind;

Fig. 11 ist eine Ansicht analog zu der der **Fig. 9**, die Pfeile zeigt, deren Amplitude im Vergleich zu denen der **Fig. 9** in Abhängigkeit von den Flußlinien verändert ist, die von den Erregerströmen der **Fig. 10** in den Wicklungen erzeugt werden;

Fig. 12 ist eine Ansicht ähnlich der der **Fig. 8**, die andere Flußlinien zeigt, die durch den Fluß von Strom in anderen, für eine axiale Zentrierung bestimmten Wicklungen erzeugt werden;

Fig. 13 ist eine Ansicht ähnlich der der **Fig. 9**, in der Pfeile auftreten, deren Amplitude die von den Wicklungen der **Fig. 12** erzeugten Flußlinien berücksichtigt;

Fig. 14 und **16** sind Varianten der **Fig. 10** und **11** gemäß einer Ausführungsvariante des Lagers der **Fig. 6** und **7**;

Fig. 16 und **17** sind Varianten der **Fig. 12** und **13**;

Fig. 18 ist ein axialer Schnitt entlang der Linie XVIII-XVIII aus **Fig. 19** eines anderen erfindungsgemäßen Magnetlagers in einer Ebene, die die Bezugsachse Z-Z enthaltend ist;

Fig. 19 ist ein Querschnitt entlang der Linie XIX-XIX aus **Fig. 18**;

Fig. 20 ist eine andere Ansicht dieses Lagers, die den eine radiale Zentrierkraft erzeugenden Erregungszustand der Wicklungen zeigt; und

Fig. 21 ist ein axialer Schnitt einer anderen Ausgestaltung eines erfindungsgemäßen Lagers.

Fig. 1 zeigt ein allgemein mit **1** bezeichnetes Magnetlager, das zur Zentrierung und Kippsteuerung eines mit einer Winkelbewegungsfreiheit von wenigstens 5° um einen Kippmittelpunkt **0** kippbeweglichen ersten Körpers **A** in Bezug auf einen zweiten Körper **B** dient, der eine hier vertikale Bezugsachse Z-Z hat, die durch den Kippmittelpunkt verläuft.

Das Lager **1** umfaßt

- Zentrierelemente zum magnetischen Zentrieren des ersten Körpers **A** im Bezug auf den zweiten Körper **B**, allgemein mit **2** bezeichnet, und
- Kippsteuerelemente, mit **20** bezeichnet.

Die Zentrierelemente **2** sind hier radial innerhalb der Kippsteuerelemente angeordnet und umfassen im wesentlichen einen hohlen äußeren Bereich **3** und einen inneren Bereich **4**.

Dieser hohle äußere Bereich **3** ist mit dem ersten Körper fest verbunden und hat eine innere Oberfläche **3A**, deren Form ein Teil einer Kugelfläche ist, deren Mittelpunkt im wesentlichen mit dem Kippmittelpunkt zusammenfällt und die sich um die Bezugsachse beiderseits einer zur Bezugsachse senkrechten Querebene erstreckt, deren Verlauf in der **Fig. 1** mit X-X bezeichnet ist, und die ferner eine Querachse

Y-Y (siehe Fig. 2) enthält. Diese Querebene ist senkrecht zur Bezugsachse und verläuft durch den Kippmittelpunkt. Der hohle äußere Bereich besteht wenigstens zum Teil aus einem ferromagnetischen Material.

Der innere Bereich 4 ist mit dem zweiten Körper B fest verbunden und umfaßt eine Mehrzahl von wenigstens drei allgemein U-förmigen ferromagnetischen Zonen, mit 5A, 5B, 5C und 5D bezeichnet, die um die Bezugsachse winkerversetzt sind, wobei jede Zone mit der inneren Oberfläche des hohlen äußeren Bereiches zwei Zentrierluftspalte bildet und mit einer spezifischen Wicklung 6A, 6B, 6C und 6D ausgestattet ist, die in der Lage ist, magnetische Flußlinien zu erzeugen, die sich über die zwei Luftspalte schließen. Diese Wicklungen sind an eine mit 100 bezeichnete Erregerschaltung angeschlossen, die konstruiert ist, um in den Zentrierluftspalten magnetische Flüsse zu erzeugen, die in der Lage sind, den hohlen äußeren Bereich in Bezug auf den inneren Bereich quer zu der Bezugsachse zu zentrieren.

Jede ferromagnetische Zone ist ein Elektromagnet, dessen Wicklung, wenn ein elektrischer Strom durch die Schaltung 100 an sie angelegt wird, magnetische Flußlinien erzeugt, die sich unter Durchquerung der Luftspalte in dem hohlen äußeren Bereich schließen. Die Existenz von Flußlinien in einem Luftspalt führt jedoch zu einer Kraft, die dazu neigt, die Breite dieses Luftspaltes zu minimieren, und deren Amplitude um so größer ist, je höher der Magnetfluß in diesem Luftspalt ist. Deshalb genügt es z. B., an die Wicklung 6A des linken Elektromagneten (5A) einen Strom anzulegen, um eine Kraft zu erzeugen, die dazu neigt, die linken Luftspalte schmaler zu machen und somit den hohlen äußeren Bereich nach rechts zu verschieben.

Wenn die innere Oberfläche 3A des Bereiches 3 eine normalerweise ein auf 0 zentrierter Bereich einer Kugeloberfläche ist, so versteht sich, daß das oben Gesagte gültig bleibt, wenn dieser äußere Bereich um 0 kippt, selbst bei großen Kippwinkeln, die in Fig. 1 die Größenordnung von 15° beiderseits der Querebene (X-X, Y-Y) erreichen n.

Die Kippsteuermittel umfassen, im betrachteten Beispiel außerhalb des hohlen äußeren Bereiches 3,

- zwei Kränze mit permanenter Magnetisierung 21 und 22, die von einem mit dem ersten hohlen Bereich fest verbundenen ersten ferromagnetischen Anker 23 getragen sind;
- eine ringförmige Mehrzahl von Kippwicklungen, in Fig. 2 mit 24A, 24B, 24C, 24D bezeichnet, die von einem mit dem inneren Bereich fest verbundenen zweiten ferromagnetischen Anker 25 getragen sind.

Der erste ferromagnetische Anker 23 erstreckt sich um die Bezugsachse; das gleiche gilt für jeden der zwei Kränze mit Permanentmagnetisierung 21 und 22.

Jeder dieser Kränze 21 und 22 hat eine wenigstens näherungsweise radiale Orientierung der Magnetisierung, d. h., daß an jedem Punkt diese Orientierung wenigstens ungefähr durch die Bezugsachse verläuft. Vorzugweise und wie sich aus Fig. 1 ergibt, ist diese Orientierung derart, daß sie an allen Punkten im wesentlichen durch den Kippmittelpunkt verläuft.

Diese Kränze mit Permanentmagnetisierung haben entgegengesetzte Magnetisierungsrichtungen, d. h., daß, wie es sich aus Fig. 1 ergibt, einer der Kränze, hier der obere Kranz 21, eine nach außen gerichtete Magnetisierung und der andere Kranz, hier der untere Kranz 22, eine zur Bezugsachse hin gerichtete Magnetisierung hat.

Diese zwei Kränze haben jeweils eine freie Polfläche, wobei die zwei freien Polflächen dieser zwei Kränze beide zur Bezugsachse hin ausgerichtet sind (Fall von Fig. 1) oder zu

dieser entgegengesetzt ausgerichtet sind. Die zwei freien Polflächen sind zwei Abschnitte einer gleichen, auf den Kippmittelpunkt 0 des Lagers zentrierten Kugelfläche.

Die zwei Kränze sind in im wesentlichen parallelen, parallel zur Bezugsachse versetzten Ebenen beiderseits des Kippmittelpunktes angeordnet und hier im wesentlichen zu diesem symmetrisch.

Als nicht dargestellte Variante wird die Kombination des ersten Ankers 23 und der zwei Kränze 21 und 22 durch eine Anordnung von zwei ringförmigen ferromagnetischen Teilen ersetzt, die freie Polflächen vom oben erwähnten Typ haben, die miteinander durch einen oder mehrere Kränze mit permanenter Magnetisierung, z. B. mit zur Bezugsachse paralleler Magnetisierungsrichtung, verbunden sind. Dies führt zur gleichen Verteilung der Flußlinien.

Jede der Kippwicklungen umfaßt zwei Gruppen von umlaufenden Adern, die jeweils eingerichtet sind, um einer der freien Polflächen gegenüber zu liegen, beim dargestellten Beispiel jeweils gegenüber einem der Kränze 21 und 22. Genauer gesagt erkennt man z. B. für die Wicklung 24A in Fig. 1 zwei Gruppen von umlaufenden Adern, die mit Bezugszeichen 24A1 und 24A3 bezeichnet sind, wobei diese Gruppen von umlaufenden Adern mit Hilfe von zwei axialen Gruppen von Adern, die in Fig. 2 mit den Bezugszeichen 24A2 und 24A4 bezeichnet sind, zu einem Kreis geschlossen sind.

Der zweite ferromagnetische Anker 25 bildet mit den erwähnten freien Polflächen mit 26 und 27 bezeichnete Luftspalte, deren radiale Breite über die gesamte Kipp-Winkelbewegungsfreiheit des hohlen äußeren Bereiches in Bezug auf den inneren Bereich, d. h. innerhalb einer Winkelbewegungsfreiheit von in der Praxis wenigstens 5°, konstant bleibt.

Der durch den ersten ferromagnetischen Anker 23 und die zwei Kränze mit permanenter Magnetisierung 21 und 22 gebildete Magnetkreisabschnitt ist symmetrisch in Bezug auf den Kippmittelpunkt und in Bezug auf die Querebene.

Die freien Polflächen der zwei Kränze haben in einer die Bezugsachse enthaltenden Ebene, z. B. der Ebene der Fig. 1, einen Abstand, der bezogen auf den Kippmittelpunkt einem Winkelversatz von wenigstens 10° entspricht. Mit anderen Worten, wenn man in dieser Fig. 1 zwei Linien durch den Kippmittelpunkt 0 und die Mitte der Luftspalte 26 und 27, wie sie links in Fig. 1 gezeigt sind, zieht, so bilden diese zwei Linien einen Winkel von wenigstens 10° (in der Größenordnung von 30°).

Die umlaufenden Adern jeder Gruppe von Wicklungen, d. h. z. B. die Adern der Gruppen 24A1 und 24A3, sind auf einer Kugeloberfläche des zweiten Ankers 25 (als eine stark abgeflachte Lage) benachbart angeordnet, die um den Kippmittelpunkt zentriert ist. Die Kippwicklungen sind somit stark abgeflacht.

Bei dem betrachteten Beispiel haben die Kränze in der durch die Bezugsachse verlaufenden Ebene, z. B. der Ebene der Fig. 1, eine Winkelamplitude, die kleiner ist als die jeder Gruppe von umlaufenden Adern jeder Wicklung. In Fig. 1 ist nämlich der Winkel, unter dem man die freie Polfläche jedes Kranzes sieht, um etwa das Vierfache kleiner als der Winkel, unter dem man in der gleichen Fig. 1 vom Kippmittelpunkt aus die Gruppe von umlaufenden Adern 24A1 oder 24A3 sieht.

Auf diese Weise gibt es eine im wesentlichen konstante Menge von umlaufenden Adern in dem zwischen dem zweiten Anker und der freien Polfläche der Magnete definierten Luftspalt, unabhängig von der Kippwinkelposition des hohlen äußeren Bereiches, und damit des ersten Ankers, um den Kippmittelpunkt.

Der Magnetfluß durch die Luftspalte 26 und 27 ist maxi-

miert, wenn die Richtung der Permanentmagnetisierung dieser Kränze gegen den Kippmittelpunkt konvergiert, d. h. wenn diese Richtung senkrecht auf den Luftspalten steht. Aus Gründen der einfacheren Fertigung gibt man diesen Kränzen jedoch Magnetisierungsrichtungen senkrecht zur Bezugsachse; die damit verbundene Leistungseinbuße ist gering.

Wenn man einen Strom in einer der Wicklungen, z. B. der Wicklung 24A, fließen läßt, resultiert daraus eine Kraft zwischen den zwei Ankern 23 und 25, die grob durch das Vektorprodukt zwischen dem in den Luftspalten bestehenden Magnetfeld und den in diesen Luftspalten zirkulierenden Gesamtstrom definiert ist.

Da die Adern, die sich im wesentlichen in dem Magnetfeld der Kränze befinden, parallel zu diesen Luftspalten und parallel zu den Kränzen langgestreckt sein können und die Richtung des Stromes und des Flusses sich für jede der Gruppen von Adern gemeinsam ändert, ist zu verstehen (siehe Fig. 3 und 4), daß daraus eine nichtverschwindende vertikale Kraft parallel zur Bezugsachse Z-Z resultiert. Indem man symmetrische Ströme in den zwei einander entgegengesetzt bezogen auf die Bezugsachse angeordneten Kippwicklungen fließen läßt, kann man ein Kippmoment um den Kippmittelpunkt erhalten (siehe Fig. 3).

Wenn man jedoch entgegengesetzte Ströme in den zwei Kippwicklungen fließen läßt, kann man in Bezug auf die Bezugsachse symmetrische Kräfte erhalten, d. h. Kräfte, deren Resultierende eine zu dieser Bezugsachse parallele Kraft ist (Fig. 4); eine geeignete Steuerung der Kippwicklungen ermöglicht also, sofern diese unabhängig voneinander erregt werden können, eine Steuerung der axialen Zentrierung.

Bei dem dargestellten Beispiel ist der zweite Anker 25 radial zwischen dem hohlen äußeren Bereich 3 und dem ersten Anker 23 angeordnet. Es versteht sich, daß als Variante der zweite Anker sich radial außerhalb des ersten Ankers 23 befinden kann. Dies kann die Verbindung zwischen dem hohlen äußeren Bereich 3 und dem ersten Anker vereinfachen; dieser hohle äußere Bereich und dieser erste Anker können in der Praxis wesentlich näher aneinanderliegen, sofern ihr Aufbau eine ausreichende Entkopplung zwischen den der Zentrierung und der Kippbewegung entsprechenden Magnetkreisen garantiert.

Indem man die in jedem der zwei Paare von Kippwicklungen fließenden Ströme kombiniert, kann man willkürlich ein Kippmoment um jede beliebige Achse der zur Bezugsachse Z-Z transversalen Ebene erhalten. Die dargestellte Konfiguration mit vier gleichmäßig (um 90°) versetzten Kippwicklungen ist einfach auszuführen. Es versteht sich jedoch, daß drei Wicklungen ausreichen, um eine Kippbewegung um jede beliebige in dieser Querebene enthaltene Achse zu erzeugen. Das gleiche gilt für die Zentrierung.

Das Lager aus Fig. 1 ist also in der Lage, die Kippbewegung des Körpers A um zwei Kippachsen zu steuern, aber auch, den Körper entlang jeder der drei Achsen X-X, Y-Y, Z-Z zu zentrieren.

Der mittlere Bereich des in Fig. 1 dargestellten Magnetlagers ist in seinem oberen Bereich geschlossen, d. h., es gibt nur eine einzige Öffnung im unteren Bereich, die den Durchgang eines Elementes für die Verbindung des inneren Teiles mit dem Rest des Körpers ermöglicht.

Natürlich, können zwei Öffnungen vorgesehen werden, die z. B. symmetrisch sind.

Fig. 5 ist eine Ausführungsvariante des Lagers aus Fig. 1, bei der die umlaufenden Adern der Wicklungen, z. B. 24A', kleinere Winkelamplituden (gesehen vom Kippmittelpunkt aus) haben, wohingegen die Kränze mit permanenter Magnetisierung 21' und 22' größere Winkelamplituden haben. Die Kippsteuerleistungen bleiben bei gleicher Bewegungs-

freiheit gleich, weil bei jeder beliebigen Neigung eine gleiche Zahl von umlaufenden Adern in den Luftspalten liegt. Anders als im Fall der Fig. 1 gibt es eine größere magnetisierte Masse, doch alle umlaufenden Adern tragen zur Erzeugung der Kipp- oder Zentrierkräfte bei.

Fig. 6 und 7 zeigen ein anderes erfindungsgemäßes Lager, mit 10' bezeichnet, das sich von dem der vorhergehenden Figuren durch die Struktur der Zentrierelemente unterscheidet.

Dieses Magnetlager umfaßt einen mit dem ersten Körper A fest verbundenen hohlen äußeren Bereich 11 und einen mit dem zweiten Körper B fest verbundenen inneren Bereich 12.

Der hohle äußere Bereich 11 hat eine innere Oberfläche 11A, deren Form ein Bereich einer Kugelfläche ist, deren Mittelpunkt im wesentlichen mit dem Kippmittelpunkt O zusammenfällt; dieser hohle äußere Bereich erstreckt sich um die Bezugsachse Z-Z beiderseits der zu der Bezugsachse senkrechten Querebene und verläuft durch den Kippmittelpunkt O. In Fig. 6 ist der Verlauf dieser Querebene definiert durch die zur Bezugsachse Z-Z transversale Achse X-X am Punkt O.

Dieser hohle äußere Bereich 11 ist wenigstens zum Teil aus einem ferromagnetischen Material von beliebiger bekannter Art.

Der innere Bereich 12 umfaßt zwei getrennte Elemente 12A und 12B, die beiderseits der oben definierten Querebene angeordnet sind, wobei diese Elemente parallel zu der Bezugsachse durch einen mit 12C bezeichneten Zwischenraum mit hoher Reluktanz getrennt sind.

Jedes Element umfaßt eine Mehrzahl von wenigstens drei um die Bezugsachse winkelvesetzten ferromagnetischen Zonen, wobei jede Zone mit der inneren Oberfläche 11A des hohlen äußeren Bereiches 11 zwei Luftspalte bildet und mit einer spezifischen Wicklung 13A, 13B, 13C oder 13D versehen ist, die in der Lage ist, magnetische Flußlinien zu erzeugen, die sich über diese zwei Luftspalte schließen.

Bei dem in Fig. 6 dargestellten Beispiel, und wie sich aus Fig. 7 ergibt, ist diese Mehrzahl von ferromagnetischen Zonen vorzugsweise durch zwei Paare von diametral gegenüberliegenden ferromagnetischen Zonen gebildet, die um die Bezugsachse um 90° winkelvesetzt sind.

Genauer gesagt gibt es ein Paar von auf die Zentrierungsachse X-X der Fig. 1 ausgerichtetes Paar von ferromagnetischen Zonen und ein Paar von ferromagnetischen Zonen, das dazu dient, die Zentrierung entlang der dritten Achse Y-Y zu ermöglichen.

Jede ferromagnetische Zone jedes Elementes umfaßt erste und zweite Vorsprünge oder Schenkel, die gegen die innere Oberfläche des hohlen äußeren Bereiches gerichtet sind, um die Luftspalte dieser ferromagnetischen Zone zu bilden, wobei einer dieser Vorsprünge oder Schenkel, als erster Vorsprung bezeichnet, von der spezifischen Wicklung umgeben ist. Genauer gesagt, und wie sich aus den Fig. 6 und 7 ergibt, umfaßt das obere Element 12A (entsprechendes gilt für das untere Element 12B) eine ringförmige Reihe von vier Vorsprüngen 14A, 14B, 14C, 14D, deren auf den Kippmittelpunkt O zentrierte Polflächen einen der zwei Luftspalte jeder ferromagnetischen Zone definieren.

Das Element 12A umfaßt ferner in einem Abstand von dieser ringförmigen Reihe von vier Vorsprüngen einen hier durchgehenden ringförmigen Vorsprung 15, dessen Polfläche ebenfalls auf den Kippmittelpunkt zentriert ist; dieser ringförmige Vorsprung bildet den zweiten Luftspalt jeder ferromagnetischen Zone.

Die Polflächen der diversen Vorsprünge sind vorzugsweise im wesentlichen Abschnitte einer gleichen Kugelfläche, so daß alle Luftspalte eine gleiche Breite haben.

Die diversen ferromagnetischen Zonen jedes Elementes können getrennt sein. Aus Gründen der Einfachheit sind jedoch die diversen ferromagnetischen Zonen Teilstücke eines gleichen ferromagnetischen Teiles (hier des gesamten Elementes 12A).

Wie sich aus der Fig. 7 ergibt, sind die Wicklungen 13A bis 13D, die die Vorsprünge 14A bis 14D umgreifen, in Umfangsrichtung im wesentlichen benachbart.

Die Wicklungsgruppe, die jedes Element umfaßt, umfaßt vorteilhafterweise ferner eine mit 16 (bzw. 16' für das untere Element) bezeichnete zusätzliche Wicklung, die das Element 12A zwischen erstem und zweitem Vorsprung der ferromagnetischen Zonen umgibt. Diese zusätzliche Wicklung 16 ist vorzugsweise den spezifischen Wicklungen 13A bis 13D benachbart, mit dem Ergebnis, daß der gesamte Zwischenraum zwischen den Vorsprüngen entweder von einer der spezifischen Wicklungen oder der zusätzlichen Wicklung belegt ist.

Man erkennt in Fig. 6, daß die spezifischen Wicklungen einerseits und die zusätzliche Wicklung andererseits an einem zylindrischen Abschnitt des Elementes 12A entlang verlaufen, das einen gleichen Durchmesser hat. Selbstverständlich kann sich als nicht dargestellte Variante die zusätzliche Wicklung auch um einen Abschnitt erstrecken, dessen Durchmesser von dem eines anderen zylindrischen Abschnittes verschieden ist, an dem sich die spezifischen Wicklungen erstrecken. Als Variante können diese spezifischen Wicklungen in einer einem Vieleck ähnlicheren Konfiguration angeordnet sein.

Jede der Wicklungen, spezifisch oder zusätzlich, des oberen oder des unteren Elementes, ist die Erregerschaltung 100 angeschlossen, die in der Lage ist, an jede dieser Wicklungen einen geeigneten Erregerstrom anzulegen.

Bei dem in Fig. 6 dargestellten Beispiel ist der zwischen den zwei Elementen 12A und 12B liegende Zwischenraum 12C von einem Permanentmagneten mit einer axialen, hier nach oben orientierten Magnetisierung belegt. Dieser Magnet hat eine Reluktanz, die in der Lage ist, zu verhindern, daß von der Gruppe von Wicklungen des einen oder anderen Elementes erzeugte Flußlinien durch diesen Zwischenraum zirkulieren können.

Bei der in Fig. 14 bis 17 dargestellten Variante kann dieser Zwischenraum 12C frei und ohne Magnet sein und so im wesentlichen einen Luftspalt mit der gewünschten Reluktanz darstellen. Selbstverständlich kann es eine völlige Unabhängigkeit zwischen den Elementen 12A und 12B geben, wenn jeweils das eine von unten und das andere von oben befestigt ist. Das oben Gesagte (Existenz eines Luftspaltes von sehr hoher Reluktanz) bleibt jedoch gültig, auch wenn ein Verbindungsteil existiert, das für eine feste Verbindung der Elemente 12A und 12B sorgt, vorausgesetzt, daß dieses Verbindungsteil eine ausreichende Reluktanz hat, um eine signifikante Zirkulation der von den Spulen erzeugten Flußlinien zu verhindern.

Die Fig. 8 bis 13 zeigen magnetische Flußlinien bzw. daraus in den Luftspalten resultierende Kräfte in verschiedenen Erregungskonfigurationen der Wicklungen. Um die Lesbarkeit der Figuren hinsichtlich der nur durch ihre Schnittflächen dargestellten Wicklungen zu verbessern, sind diese für jede der Wicklungen anders dargestellt (das Gleiche gilt bei den vorhergehenden Figuren, um die Unterscheidung zwischen den diversen Wicklungen zu erleichtern).

Zum Beispiel erkennt man in Fig. 10 leicht die zusätzliche Wicklung 16 des oberen Elementes 12A sowie zwei diametral gegenüberliegende spezifische Wicklungen 13A (links) und 13B (rechts).

Per Konvention gibt ein Kreis mit einem Punkt nahe am Schnitt einer Wicklung an, daß ein Strom in einer Richtung

heraus aus der Ebene der Zeichnung fließt, und ein Kreis mit einem Kreuz entspricht der entgegengesetzten Richtung. Das oben Gesagte gilt auch für das untere Element 12B (weil dieses im betrachteten Beispiel die gleiche Geometrie wie das obere Element hat und in Bezug auf die durch den Mittelpunkt O verlaufende Querebene symmetrisch zu letzterem angeordnet ist), wobei die Wicklungen dieses unteren Elementes mit den gleichen Bezeichnungen wie die Wicklungen des oberen Elementes, allerdings mit einem hinzugefügten Apostroph, bezeichnet sind.

In Fig. 8 sind vereinfacht die magnetischen Flußlinien dargestellt, die von dem Permanentmagneten erzeugt werden, der den Zwischenraum 12C zwischen den Elementen 12A und 12B belegt.

Man erkennt, daß es rechts und links in Fig. 8 kleine Magnetkreise, die die näher an der Querebene liegenden Luftspalte, beim oberen Element nahe den Vorsprüngen 14A und 14B, kreuzen sowie größere Magnetkreise gibt, die die äußeren Luftspalte kreuzen, die zwischen den äußeren ringförmigen Vorsprüngen 15 (und 15' unter Berücksichtigung der oben angegebenen Schreibweise für das untere Element) und dem hohlen äußeren Bereich gebildet sind.

Bekanntlich führt der Durchgang von magnetischen Flußlinien durch einen Luftspalt zum Auftreten einer Kraft quer zu diesem Luftspalt, deren Amplitude um so größer ist, je zahlreicher die magnetischen Flußlinien durch den Luftspalt sind.

Sofern der Magnet symmetrisch in Bezug auf die Bezugsachse angeordnet ist, impliziert dies, daß die von ihm erzeugten magnetischen Flußlinien sich gleichförmig um die Bezugsachse verteilen, wenn der hohle äußere Bereich im Bezug auf den Kippmittelpunkt 0 korrekt zentriert ist, und der Durchgang der magnetischen Flußlinien durch die verschiedenen Luftspalte führt zum Auftreten von Kräften in diesen Luftspalten auf den hohlen äußeren Bereich, die einerseits in Bezug auf die Bezugsachse und andererseits in Bezug auf die horizontale Querebene symmetrisch sind. Dies ist in Fig. 9 durch eine Anordnung von Pfeilen dargestellt, die alle zum Kippmittelpunkt 0 zusammenlaufen und schematisch als identisch dargestellte Beträge haben. Daraus resultiert für den hohlen äußeren Bereich eine resultierende Kraft von verschwindender Amplitude; der hohle äußere Bereich bleibt an seinem Platz.

Fig. 10 zeigt die Flußlinien, die durch die Luftspalte fließen, wenn zwei spezifische Wicklungen jedes der Elemente, die symmetrisch im Bezug auf die Querebene angeordnet sind, d. h. im Falle der Fig. 8 die mit 13A, 13B und 13A' und 13B' bezeichneten, von der Erregerschaltung 100 versorgt werden, um in dem oberen Element Flußlinien zu erzeugen, die die Luftspalte in einer gleichen Richtung (hier nach links) und im unteren Element Flußlinien zu erzeugen, die die zwei entsprechenden Luftspalte in entgegengesetzter Richtung (im Beispiel der Fig. 10 nach rechts) kreuzen. Sofern, wie oben angegeben, oberes und unteres Element massive Teile aus ferromagnetischem Material sind, können die von den genannten Wicklungen erzeugten Flußlinien, wie in Fig. 10 gezeigt, sich zu einem einzigen großen Magnetkreis überlagern, der das obere Element nach links kreuzt, im hohlen äußeren Bereich nach unten schließt, das rechte untere Element nach rechts kreuzt und, wiederum in dem hohlen äußeren Bereich, nach oben aufsteigt.

Die Symmetrie der Magnetflüsse durch die äußeren Luftspalte zwischen dem hohlen äußeren Bereich und den ringförmigen Vorsprüngen bleibt erhalten. Was jedoch die näher an der transversalen Symmetrieebene angeordneten Luftspalte angeht, so versteht man, daß der durch Anlegen von Erregerströmen an die oben erwähnten Wicklungen erzeugte Magnetkreis zu einer Zunahme der Flüsse durch die

linken Luftspalte und einer Verringerung des Magnetflusses durch jeden der rechten Luftspalte führt. Daraus ergibt sich, wie in Fig. 11 dargestellt, eine Vergrößerung der an den linken Luftspalten wirkenden Kräfte und eine Verringerung der an den rechten Luftspalten wirkenden Kräfte. Daraus ergibt sich eine im wesentlichen zu der Querebene parallele resultierende Kraft, die in Fig. 11 mit dem Bezugszeichen F1 bezeichnet ist. Die Fig. 10 und 11 entsprechen also einer Erregungsbetriebsart der Wicklungen, mit der eine Zentrierung des hohlen äußeren Bereiches quer zur Bezugsachse entlang der Achse X-X erreicht werden kann. Man versteht leicht, daß durch Anlegen von Erregerströmen an die anderen Wicklungspaare, nämlich die entlang der Achse Y-Y angeordneten, in ähnlicher Weise eine Querezentrierungskraft entlang dieser Achse Y-Y erhalten werden kann. Selbstverständlich ist es möglich, je nach Bedarf Erregerströme in jedem der Wicklungspaare zu kombinieren, um jederzeit über eine geeignete Zentrierkraft in der zu der Bezugsachse Z-Z senkrechten Querebene zu verfügen.

Fig. 12 entspricht einem anderen Beispiel der Erregung der Wicklungen, bei dem die zwei zusätzlichen Wicklungen (in Fig. 6 mit 16 und 16' bezeichnet) versorgt werden, um magnetische Flußlinien zu erzeugen, die bei den durch die äußeren ringförmigen Vorsprünge gebildeten Luftspalten nach außen und bei den näher an der Querebene angeordneten Vorsprüngen nach innen gerichtet sind.

Dies führt zu einer globalen Erhöhung des Magnetflusses durch die durch den oberen äußeren ringförmigen Vorsprung gebildeten Luftspalte und einer Verringerung des Flusses in den durch den unteren ringförmigen Vorsprung gebildeten Luftspalten; genauso ergibt sich eine Verringerung der Flußlinien in den näher an der Querebene gebildeten Luftspalten am oberen Element, aber eine Vermehrung der Flußlinien durch die näher an dieser Querebene liegenden Luftspalte des unteren Elementes. Wenn die Luftspalte, in denen das Maximum an magnetischen Flußlinien im oberen Element fließt, stärker gegen die Bezugsachse geneigt sind als die Luftspalte des unteren Elementes, in denen ein Maximum an magnetischen Flußlinien fließt, tritt eine zu dieser Bezugsachse parallele, nach unten gerichtete resultierende Kraft (Pfeil F2 in Fig. 13) auf. Die Fig. 12 und 13 entsprechen also einem Fall der Erregung der Wicklungen entsprechend einer Zentrierung des hohlen äußeren Bereiches parallel zur Bezugsachse.

Es ist leicht zu verstehen, daß durch Umkehrung der Flußrichtung der Erregerströme in den zusätzlichen Spulen eine Zentrierungskraft von entgegengesetzter Richtung zu der in Fig. 13 mit F2 bezeichneten Kraft erzeugt werden kann.

Wenn es um eine Zentrierung parallel zur Querebene geht, werden nur die spezifischen Wicklungen, nicht aber die zusätzlichen Wicklungen elektrisch versorgt.

Bei einer Zentrierung parallel zur Bezugsachse kann es genauso sein, weil mit den in Fig. 12 dargestellten Flußlinien identische Flußlinien erhalten werden können, indem nicht die zusätzlichen Wicklungen, sondern die spezifischen Wicklungen geeignet erregt werden. Es können also Zentrierkräfte entlang einer der drei Achsen X-X, Y-Y, Z-Z unabhängig vom Vorhandensein der zusätzlichen Wicklungen 16 und 16' erhalten werden. Es versteht sich jedoch, daß das Vorhandensein der zusätzlichen Wicklungen 16 und 16' eine sehr einfache Steuerung der Zentrierung entlang der Achse Z-Z erlaubt. Dennoch ist es erfindungsgemäß möglich, für die Zentrierung auf den drei Achsen nur die spezifischen Wicklungen vorzusehen, ohne zusätzliche Wicklung.

Das oben Gesagte war einfach zu erklären aufgrund der Symmetrie der zwei Elemente und der Anordnung der Wicklungen und aufgrund der Tatsache, daß jedes der Ele-

mente zwei Paare von einander bezogen auf die Bezugsachse gegenüberliegend angeordneten Wicklungen aufweist, wobei diese Paare um 90° gegeneinander winkelvezsetzt sind.

Es versteht sich allerdings, daß unter Inkaufnahme einer leichten Verkomplizierung der Steuerung der Erregerströme der verschiedenen Wicklungen Zentrierkräfte quer zu der Bezugsachse sowie Zentrierkräfte parallel zu dieser Bezugsachse erhalten werden können, wenn man in oberem und unterem Element jeweils wenigstens drei Wicklungen in drei ferromagnetischen Zonen anordnet, die bezogen auf die Querebene in jedem der Elemente symmetrisch oder nicht-symmetrisch angeordnet sind.

Die Fig. 14 bis 17 zeigen Varianten der Fig. 10 bis 13.

Unter dem strukturellen Gesichtspunkt ist das in den Fig. 14 bis 17 dargestellte Magnetlager einfacher als das in den vorhergehenden Figuren dargestellte, weil der Zwischenraum zwischen oberem und unterem Element hier im wesentlichen leer ist und einen Luftspalt von großer Breite bildet, der lediglich durch ein schmales Verbindungsteil aus einem im Prinzip nicht-ferromagnetischem Material belegt ist, das die feste Verbindung von oberem und unterem Element miteinander gewährleistet.

Wie noch deutlich werden wird, zeigen diese Fig. 14 bis 17, daß es möglich ist, Zentrierkräfte entlang einer beliebigen der Achsen zu erzeugen, wenn eine kleinere Zahl von Wicklungen erregt wird, als mit Bezug auf Fig. 10 bis 13 beschrieben.

So ist im Beispiel von Fig. 14 nur eine einzige spezifische Wicklung jedes Elementes aktiviert, nämlich die in Fig. 6 mit 13A oder 13A' bezeichnete linke spezifische Wicklung. Diese Wicklungen werden hier elektrisch versorgt, um Flußlinien zu erzeugen, die durch die spezifische Wicklung austreten und sich über alle anderen Luftspalte jedes Teiles 12A bzw. 12B schließen. Wie sich aus Fig. 15 ergibt, führt dies in allen Luftspalten zum Auftreten von auf den Kippmittelpunkt zentrierten Kräften, von hoher Amplitude in dem der erregten Wicklung zugeordneten Luftspalt und von geringer Amplitude in allen anderen Luftspalten. Unter Berücksichtigung der symmetrischen Konfiguration der Luftspalte beiderseits der Querebene ergibt sich daraus eine zur Querebene parallele, nach rechts gerichtete resultierende Kraft, mit dem Bezugszeichen F1 bezeichnet. Es genügt also, zwei passend gewählte spezifische Wicklungen zu aktivieren, um eine Zentrierung des hohlen äußeren Bereiches entlang einer zur Bezugsachse Z-Z transversalen Achse zu gewährleisten.

In Fig. 16 ist eine einzige zusätzliche Wicklung, nämlich die zusätzliche Wicklung 16 des oberen Elementes, elektrisch aktiviert, was zum Auftreten von Flußlinien ausschließlich in den Luftspalten des oberen Elementes führt. Daraus resultieren, wie sich aus Fig. 17 ergibt, in Richtung auf den Kippmittelpunkt wirkende Kräfte an den Luftspalten des oberen Elementes. Es ergibt sich eine zu der Bezugsachse Z-Z parallele, nach unten gerichtete vertikale resultierende Kraft.

Wie bereits für die Fig. 12 und 13 erläutert, ist es auch hier möglich, diesen Effekt der Zentrierung parallel zur Bezugsachse zu erhalten, indem zwei oder alle Wicklungen nur eines der Elemente erregt werden, und zwar unabhängig vom Vorhandensein oder Nicht-Vorhandensein einer zusätzlichen Wicklung.

Oben wurde angegeben, daß es möglich ist, die zusätzlichen Wicklungen fortzulassen. Selbstverständlich ist es einfach, wenn gewünscht, starke Zentrierkräfte parallel zur Bezugsachse zu erzeugen, indem gleichzeitig bestimmte der spezifischen Wicklungen und die zusätzliche Wicklung von einem oder beiden ferromagnetischen Elementen – oder, wenn man nur die Kippwicklungen benutzen will, von kei-

nem aktiviert werden.

Die Fig. 18 bis 21 zeigen eine andere Konfiguration eines Magnetlagers, allgemein mit **110** bezeichnet, mit Kippsteuerelementen, mit **120** bezeichnet, und Radialzentrierelementen, allgemein mit **130** bezeichnet.

Die Kippsteuerelemente sind hier identisch mit denen des ersten Lagers und sind mit Bezugszeichen versehen, die sich aus den für die Fig. 1 bis 5 verwendeten durch Addition der Zahl **100** ergeben.

Bei dem betrachteten Beispiel haben die Kränze in der durch die Bezugsachse verlaufenden Ebene, z. B. der Ebene der Fig. 18, eine Winkelamplitude, die kleiner ist als die jeder Gruppe von umlaufenden Adern jeder Wicklung. In Fig. 18 ist nämlich der Winkel, unter dem man die freie Polfläche jedes Kranzes sieht, um etwa das Vierfache kleiner als der Winkel, unter dem man in der gleichen Fig. 18 vom Kippmittelpunkt aus die Gruppe von umlaufenden Adern **124A1** oder **124A3** sieht.

Bei der in Fig. 21 dargestellten Variante haben die Magnete stattdessen eine größere Winkelamplitude als die der umlaufenden Adern. Auf diese Weise gibt es eine im wesentlichen konstante Menge von umlaufenden Adern in dem zwischen dem zweiten Anker und der freien Polfläche der Magnete definierten Luftspalt, unabhängig von der Kippwinkelposition des hohlen äußeren Bereiches, und damit des ersten Ankers, um den Kippmittelpunkt.

Der zweite Anker trägt zwei Mehrzahlen von mit **131A**, **131B**, **131C** und **131D** sowie **132A**, **132B**, **132C** und **132D** bezeichneten umlaufenden Zentrierwicklungen. Diese Mehrzahlen sind parallel und in der Praxis auf beiden Seiten der Querebene angeordnet.

Jede Zentrierwicklung umgibt einen Abschnitt des zweiten Ankers, der parallel zur Bezugsachse so bemessen ist, daß er radial gegenüber einem der Kränze bleibt, wenn der bewegliche Körper sich innerhalb seiner gegebenen Kippbewegungsfreiheit bewegt.

So umfaßt der zweite Anker zwei Mehrzahlen von ferromagnetischen Abschnitten, die ständig den Kränzen gegenüberliegen.

Vorzugsweise ist die Zahl der Zentrierwicklungen die gleiche wie die der Kippwicklungen, hier vier.

Die umlaufenden Adern erstrecken sich entlang der ferromagnetischen Abschnitte, die von den Zentrierwicklungen umgeben sind. Außerdem haben die diversen Wicklungen die gleiche Winkelamplitude, d. h., daß die umlaufenden Adern der Kippwicklungen eine Länge haben, die im wesentlichen gleich der der von den Zentrierwicklungen umgebenen ferromagnetischen Abschnitte ist.

Die Wicklungen jeder Mehrzahl, egal ob sie zum Kippen oder zur Zentrierung dienen, sind im wesentlichen in Umfangsrichtung benachbart.

Wie in Bezug auf die Fig. 3 und 4 angegeben, resultiert, wenn man einen Strom in einer der Wicklungen, z. B. der Wicklung **124A**, fließen läßt, daraus eine Kraft zwischen den zwei Ankern **123** und **125**, die grob durch das Vektorprodukt zwischen dem in den Luftspalten bestehenden Magnetfeld und den in diesen Luftspalten zirkulierenden Gesamtstrom definiert ist. Wie in den Fig. 3 und 4 kann man Kippdrehmomente oder axiale Zentrierkräfte erzeugen.

Wenn man in den zwei axial gegenüberliegenden Zentrierwicklungen Ströme in entgegengesetzter Richtung fließen läßt, so erkennt man (siehe Fig. 20), daß daraus Flüsse durch die Luftspalte resultieren, die in den zwei Luftspalten entweder den von den zwei Kränzen erzeugten permanenten Fluß verstärken oder ihm entgegenwirken. Die Zunahme des Flusses oder die Verringerung des Flusses in den zwei Luftspalten führt zum Auftreten einer zur Bezugsachse hin gerichteten Kraft in diesem Luftspalt, die größer oder klei-

ner ist als die in den radial gegenüberliegenden Luftspalten, wo nur der von den Kränzen mit permanenter Magnetisierung erzeugte Fluß zirkuliert. Es ergibt sich somit eine Zentrierkraft nach rechts oder nach links. Natürlich kann man auch Ströme in den radial gegenüberliegenden Wicklungen fließen lassen, um stärkere Zentrierkräfte zu erzeugen.

Das oben Gesagte läßt sich auf den Fall verallgemeinern, wo es z. B. nur drei Zentrierwicklungen gibt, wobei in diesem Fall die Resultierende aller in den Luftspalten rings um die Bezugsachse erzeugten Kräfte betrachtet werden muß.

Bei dem dargestellten Beispiel ist der zweite Anker **125** radial innerhalb des ersten Ankers **123** angeordnet. Es versteht sich, daß als Variante der zweite Anker sich radial außerhalb des ersten Ankers **123** befinden kann.

Indem man die in jedem der zwei Paare von Kippwicklungen fließenden Ströme kombiniert, kann man willkürlich ein Kippmoment um jede beliebige Achse der zur Bezugsachse **Z-Z** transversalen Ebene erhalten. Die dargestellte Konfiguration mit vier Kippwicklungen ist einfach auszuführen. Es versteht sich jedoch, daß drei Wicklungen ausreichen, um eine Kippbewegung um jede beliebige in dieser Querebene enthaltene Achse zu erzeugen. Das gleiche gilt für die Zentrierung.

Genauso kann man, indem man die Ströme in den diversen Zentrierwicklungen geeignet kombiniert, eine Zentrierung in jeder beliebigen in der Querebene liegenden Richtung erreichen.

Das Lager aus Fig. 18 ist somit in der Lage, sowohl eine Kippung des Körpers **A** um zwei Kippachsen, als auch eine Zentrierung des Körpers entlang jeder drei Achsen **X-X**, **Y-Y** und **Z-Z** zu steuern.

Fig. 21 ist eine Ausführungsvariante des Lagers aus Fig. 18 (Elemente, die denen der Fig. 18 und 19 entsprechen, sind mit einem Apostroph gekennzeichnet), bei der die umlaufenden Adern der Wicklungen, z. B. **124A'**, (vom Kippmittelpunkt aus gesehen) kleinere Winkelamplituden haben, wohingegen die Kränze mit permanenter Magnetisierung **121'** und **122'** größere Winkelamplituden haben. Die Kippsteuerleistung bleibt bei gleicher Bewegungsfreiheit die gleiche (selbst bei einem starken Reluktanzdrehmoment, d. h. einem Rückstellmoment), weil bei jeder beliebigen Neigung sich eine gleiche Zahl von umlaufenden Adern in den Luftspalten befindet. Anders als im Fall der Fig. 18 gibt es eine größere magnetisierte Masse, doch alle umlaufenden Adern tragen zur Erzeugung der Kipp- oder Zentrierkräfte bei.

Patentansprüche

1. Magnetlager für die Zentrierung und Kippsteuerung eines innerhalb einer Winkelbewegungsfreiheit von wenigstens plus oder minus 5° um einen Kippmittelpunkt (O) kippbeweglichen ersten Körpers (A) in Bezug auf einen zweiten Körper (B) mit einer durch den Kippmittelpunkt verlaufenden Bezugsachse (Z-Z), mit Zentrierelementen (**2**, **4**, **11**, **12**, **130**), die in der Lage sind, den ersten Körper in Bezug auf den zweiten Körper wenigstens quer zu der Bezugsachse zu zentrieren, und

– zwei Kränze mit permanenter Magnetisierung (**21**, **22**, **121**, **122**), die von einem mit dem ersten Körper fest verbundenen ersten ferromagnetischen Anker (**23**, **123**) getragen sind, die die Bezugsachse (Z-Z) umgeben und dabei jeweils eine Orientierung der Magnetisierung haben, die an jedem Punkt wenigstens ungefähr durch die Bezugsachse verläuft, wobei diese Kränze parallel sind und parallel zu der Bezugsachse beiderseits

des Kippmittelpunktes parallel versetzt sind und freie Polflächen haben, die im wesentlichen Abschnitte einer gleichen, auf den Kippmittelpunkt zentrierten Kugelfläche bilden,

– eine ringförmige Mehrzahl von wenigstens drei Kippwindungen (24A, 24B, 24C, 24D, 124A, 124B, 124C, 124D), die mit dem zweiten Körper (B) fest verbunden sind und jeweils zwei Gruppen von umlaufenden Adern (24A1, 24A3, 124A1, 124A3) aufweisen, die eingerichtet sind, um jeweils jedem der Kränze mit permanenter Magnetisierung unabhängig von der Orientierung des hohlen äußeren Bereiches in Bezug auf den Kippmittelpunkt innerhalb der Kipp-Winkelbewegungsfreiheit gegenüber zu liegen, wobei diese Windungen von einem zweiten ferromagnetischen Anker (25, 125) getragen sind, der mit den magnetisierten Kränzen Luftspalte (26, 27, 126, 127) bildet, deren Breite über die gesamte Kipp-Winkelbewegungsfreiheit konstant bleibt,

– und eine Erregerschaltung (100), die konstruiert ist, um an die Kippwicklungen Erregerströme anzulegen, die in der Lage sind, in den Luftspalten Kippkräfte zu erzeugen.

2. Lager nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Erregerschaltung (100) ferner konstruiert ist, um an die Kippwicklungen Erregerströme anzulegen, die in der Lage sind, in den Luftspalten Zentrierkräfte parallel zu der Bezugsachse (Z-Z) zu erzeugen.

3. Lager nach Anspruch 1 oder Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Kränze (21, 22, 121, 122) Magnetisierungsrichtungen haben, die an jedem Punkt wenigstens ungefähr durch den Kippmittelpunkt verlaufen.

4. Lager nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die zwei Kränze (21, 23, 121, 123) gleiche Durchmesser haben und symmetrisch zueinander in Bezug auf den Kippmittelpunkt sind, und daß die Kippwicklungen jeweils bezogen auf die Querebene symmetrisch sind.

5. Lager nach einem beliebigen der Ansprüche 1 bis 24, dadurch gekennzeichnet, daß die zwei Kränze (21, 23, 121, 123) in einer die Bezugsachse enthaltenden Ebene einen Abstand haben, der bezogen auf den Kippmittelpunkt einem Winkelversatz von wenigstens 10° entspricht.

6. Lager nach einem beliebigen der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die umlaufenden Adern (24A1, 24A3, 124A1, 124A3) jeder Gruppe einer jeden Wicklung auf einer auf den Kippmittelpunkt zentrierten Kugeloberfläche des zweiten Ankers benachbart angeordnet sind.

7. Lager nach einem beliebigen der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Kränze in einer durch die Bezugsachse verlaufenden Ebene eine größere Winkelamplitude als die jeder Gruppe von umlaufenden Adern jeder Wicklung haben.

8. Lager nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Kränze in einer durch die Bezugsachse verlaufenden Ebene eine kleinere Winkelamplitude als die jeder Gruppe von umlaufenden Adern jeder Wicklung haben.

9. Lager nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß der zweite Anker (25, 125) radial innerhalb des ersten Ankers (23, 123) angeordnet ist.

10. Lager nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Mehrzahl von Kippwicklungen vier Wicklungen aufweist, die auf zwei Paare von

diametral gegenüberliegenden Zonen aufgeteilt sind, die in Bezug auf die Bezugsachse um 90° versetzt sind.

11. Lager nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Zentriermittel zwei parallele ringförmige Mehrzahlen von wenigstens drei Zentrierwicklungen (131A bis 131D, 132A bis 132D) aufweisen, die mit dem zweiten ferromagnetischen Anker fest verbunden sind, wobei diese Wicklungen jeweils einen Abschnitt dieses zweiten ferromagnetischen Ankers umgeben, wobei diese Abschnitte in zwei parallele Mehrzahlen von ferromagnetischen Abschnitten aufgeteilt sind, die in der Lage sind, jeweils jedem der Kränze mit permanenter Magnetisierung unabhängig von der Orientierung des hohlen äußeren Bereiches in Bezug auf den Kippmittelpunkt innerhalb der Kippbewegungsfreiheit gegenüberzuliegen, wobei die Erregerschaltung (100) konstruiert ist, um an die Zentrierwicklungen Erregerströme anzulegen, die in der Lage sind, zur Realisierung einer radialen Zentrierung des beweglichen Körpers geeignete Kräfte zu erzeugen.

12. Lager nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß die umlaufenden Adern der Kippwicklungen entlang der von den Zentrierwicklungen umgebenen ferromagnetischen Abschnitte verlaufen.

13. Lager nach Anspruch 11 oder Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß die Mehrzahlen von Zentrierwicklungen und die Mehrzahl von Kippwicklungen jeweils eine gleiche Zahl von Wicklungen aufweisen.

14. Lager nach einem beliebigen der Ansprüche 11 bis 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Kippwicklungen und die Zentrierwicklungen im wesentlichen die gleiche Winkelamplitude um die Bezugsachse haben und einander axial im wesentlichen gegenüberliegen.

15. Lager nach einem beliebigen der Ansprüche 11 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß jede Mehrzahl von Zentrierwicklungen vier Wicklungen umfaßt, die auf zwei Paare in Bezug auf die Bezugsachse diametral gegenüberliegenden Zonen aufgeteilt sind, die um 90° winkerversetzt sind.

16. Lager nach einem der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Zentriermittel umfassen:

– einen hohlen äußeren Bereich (11), der mit dem ersten Körper fest verbunden ist und eine innere Oberfläche (11A) hat, deren Form ein Abschnitt einer Kugelfläche ist, deren Mittelpunkt im wesentlichen mit dem Kippmittelpunkt zusammenfällt und die sich um die Bezugsachse beiderseits einer Querebene (X-X, Y-Y) erstreckt, die zu der Bezugsachse senkrecht liegt und durch den Kippmittelpunkt verläuft, wobei der hohle äußere Bereich wenigstens zum Teil aus einem ferromagnetischen Material besteht,

– einen mit dem zweiten Körper fest verbundenen inneren Bereich mit einer Mehrzahl von wenigstens drei um die Bezugsachse gegeneinander winkerversetzten ferromagnetischen Zonen, wobei jede Zone mit der inneren Oberfläche des hohlen äußeren Bereiches zwei Zentrierluftspalte bildet und mit einer spezifischen Wicklung (13A, 13B, 13C, 13D) versehen ist, die in der Lage ist, magnetische Flußlinien zu erzeugen, die sich über die zwei Luftspalte schließen, wobei diese Wicklungen Teil einer Anordnung von Wicklungen sind, die an die Erregerschaltung (100) angeschlossen ist, die konstruiert ist, um in den Zentrierluftspalten Magnetflüsse zu erzeugen, die in

der Lage sind, den hohlen äußeren Bereich in Bezug auf den inneren Bereich wenigstens quer zur Bezugsachse zu zentrieren.

17. Lager nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, daß der innere Bereich zwei getrennte Elemente (12A, 12B) aufweist, die beiderseits der Querebene angeordnet sind und jeweils eine Mehrzahl von wenigstens drei um die Bezugsachse winkelfersetzten ferromagnetischen Zonen aufweisen, wobei jede Zone mit der inneren Oberfläche des hohlen äußeren Bereiches zwei Luftspalte bildet und mit einer spezifischen Wicklung (13A, 13B, 13C, 13D) ausgestattet ist, die in der Lage ist, magnetische Flußlinien zu erzeugen, die sich über die zwei Luftspalte schließen, wobei jedes Element eine Gruppe von Wicklungen umfaßt, die wenigstens die spezifischen Wicklungen der ferromagnetischen Zonen umfaßt, wobei diese Elemente parallel zur Bezugsachse durch einen Zwischenraum (12C) getrennt sind, der eine Reluktanz hat, die geeignet ist, zu verhindern, daß von der Gruppe von Wicklungen des einen Elementes erzeugte Flußlinien durch den Zwischenraum zirkulieren können, wobei die Wicklungen jeder Gruppe an die Erregerschaltung (100) angeschlossen sind.

18. Lager nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, daß der Zwischenraum (12C) von einem Permanentmagneten belegt ist, dessen Permanentmagnetisierung parallel zu der Bezugsachse orientiert ist.

19. Lager nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, daß der Zwischenraum ein freier Zwischenraum ist, der einen ortsfesten Luftspalt bildet.

20. Lager nach einem beliebigen der Ansprüche 17 bis 19, dadurch gekennzeichnet, daß die ferromagnetischen Zonen jedes Elementes Bestandteil eines gleichen ferromagnetischen Teiles (12A, 12B) sind.

21. Lager nach einem beliebigen der Ansprüche 17 bis 20, dadurch gekennzeichnet, daß die ferromagnetischen Zonen der zwei Elemente im Bezug auf die Querebene symmetrisch sind.

22. Lager nach einem beliebigen der Ansprüche 17 bis 21, dadurch gekennzeichnet, daß jede ferromagnetische Zone jedes Elementes erste und zweite Vorsprünge (14A, 14B, 14C, 14D; 15) umfaßt, die gegen die innere Oberfläche des hohlen äußeren Bereiches gerichtet sind, um die Luftspalte dieser Zone zu bilden, wobei der erste dieser Vorsprünge von der spezifischen Wicklung umgeben ist.

23. Lager nach Anspruch 22, dadurch gekennzeichnet, daß die zweiten Vorsprünge der ferromagnetischen Zonen eines gleichen Elementes Teil eines gleichen, um die Bezugsachse zentrierten ringförmigen Vorsprunges (15) sind.

24. Lager nach Anspruch 22 oder Anspruch 23, dadurch gekennzeichnet, daß die Gruppe von Wicklungen jedes Elementes ferner eine zusätzliche Wicklung (16, 16') umfaßt, die dieses Element zwischen den ersten und zweiten Vorsprüngen der ferromagnetischen Zonen dieses Elementes umgibt, wobei diese Wicklung an die Erregerschaltung angeschlossen ist und die Schaltung konstruiert ist, um selektiv Erregerströme an die zusätzlichen Wicklungen der Elemente anzulegen, um in den Luftspalten Magnetfelder zu erzeugen, die in der Lage sind, auf den hohlen äußeren Bereich Zentrierkräfte parallel zur Bezugsachse auszuüben.

25. Lager nach einem beliebigen der Ansprüche 17 bis 24, dadurch gekennzeichnet, daß die Erregerschaltung konstruiert ist, um selektiv Erregerströme an die spezifischen Wicklungen der ferromagnetischen Zonen der

Elemente anzulegen, um in den Luftspalten Magnetfelder zu erzeugen, die in der Lage sind, auf den hohlen äußeren Bereich Kräfte parallel zur Bezugsachse auszuüben.

26. Lager nach einem beliebigen der Ansprüche 17 bis 25, dadurch gekennzeichnet, daß die spezifischen Wicklungen (13A, 13B, 13C, 13D) der ferromagnetischen Zonen benachbart sind.

27. Lager nach einem beliebigen der Ansprüche 16 bis 26, dadurch gekennzeichnet, daß die Mehrzahl von ferromagnetischen Zonen vier ferromagnetische Zonen umfaßt, die auf zwei Paare von in Bezug auf die Bezugsachse diametral gegenüberliegenden Zonen verteilt sind, die um 90° versetzt sind.

28. Lager nach einem beliebigen der Ansprüche 16 bis 27, dadurch gekennzeichnet, daß die Zentrierelemente radial innerhalb der Kränze mit permanenter Magnetisierung und der ringförmigen Mehrzahl von Kippwicklungen angeordnet sind.

Hierzu 7 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

Fig.1

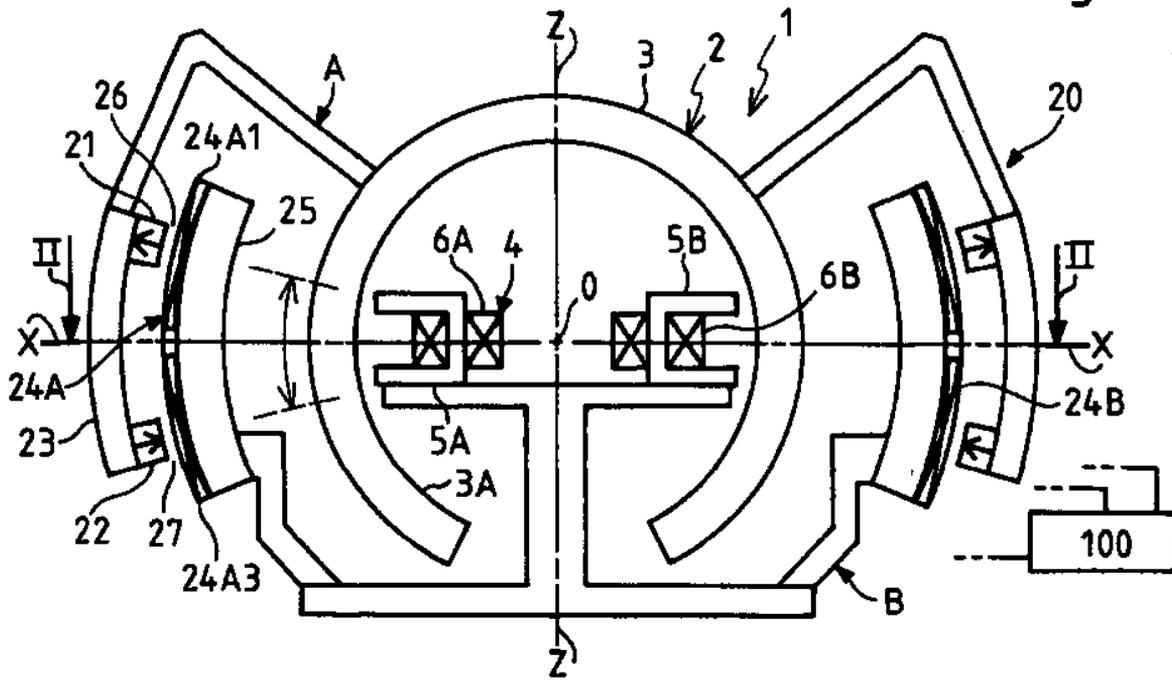
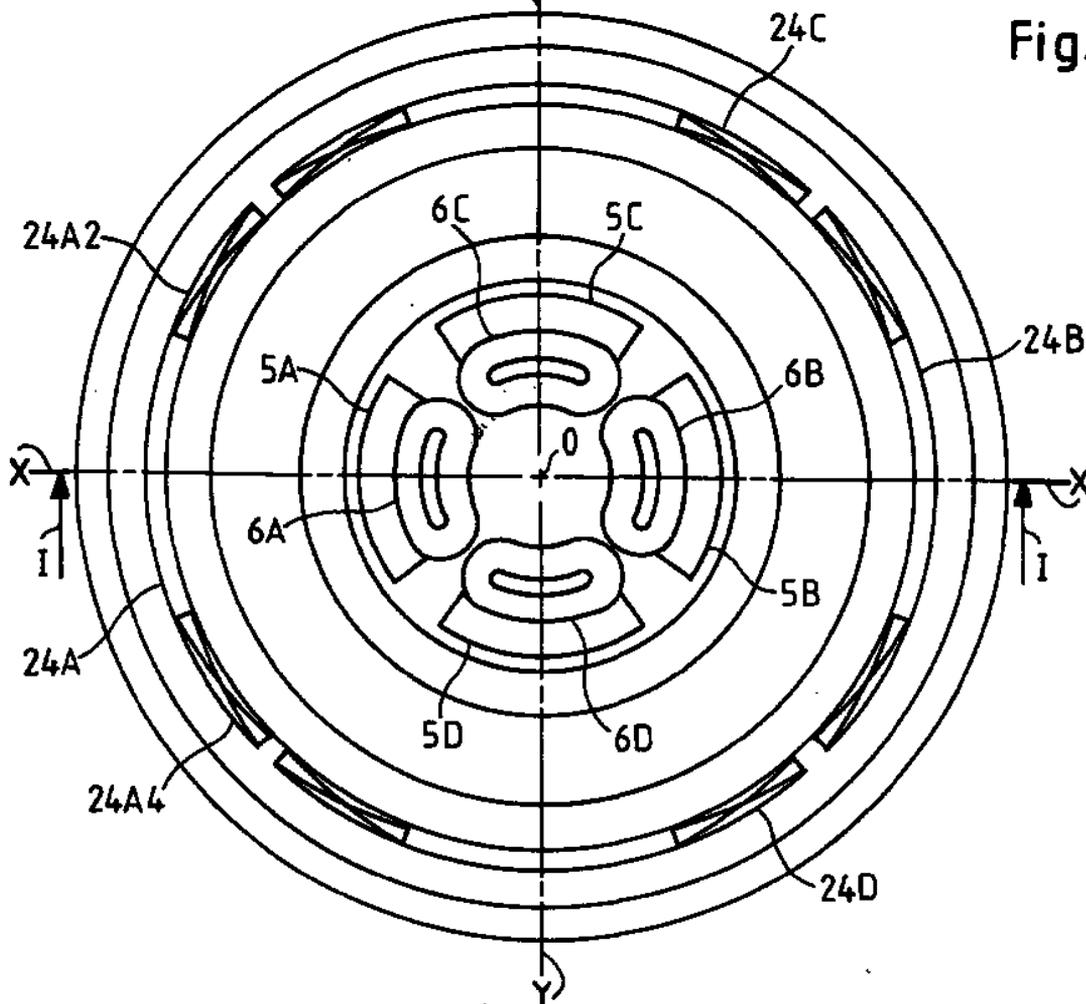
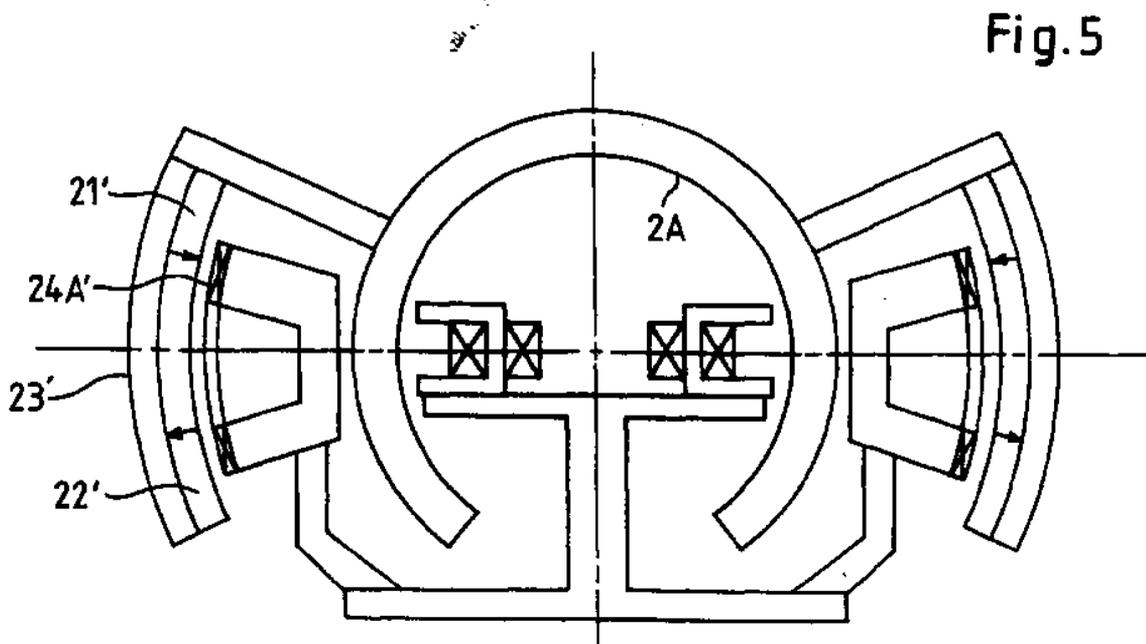
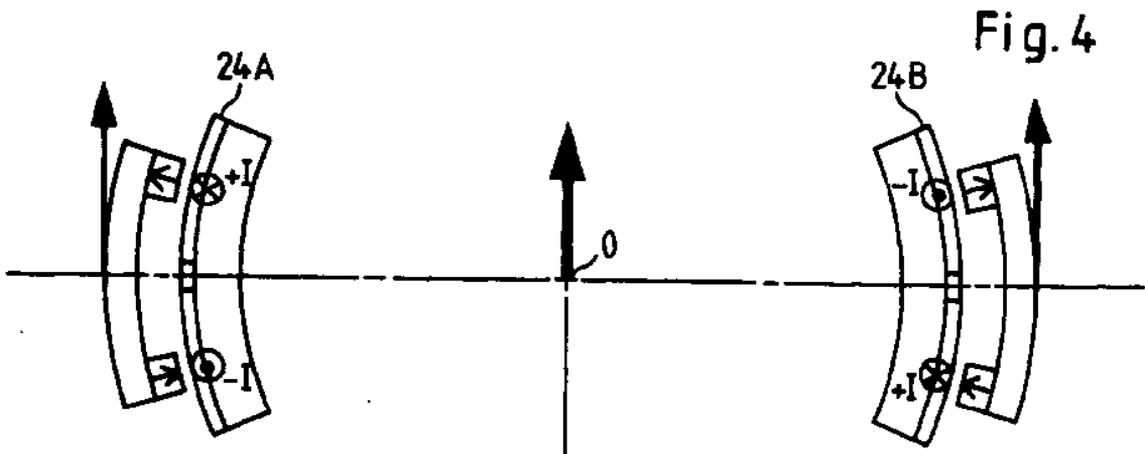
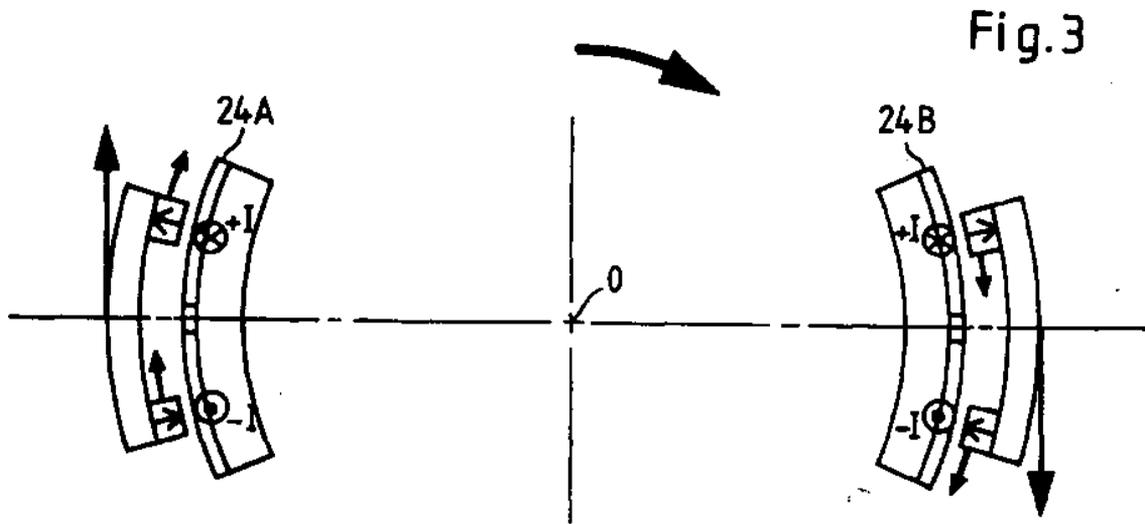


Fig.2





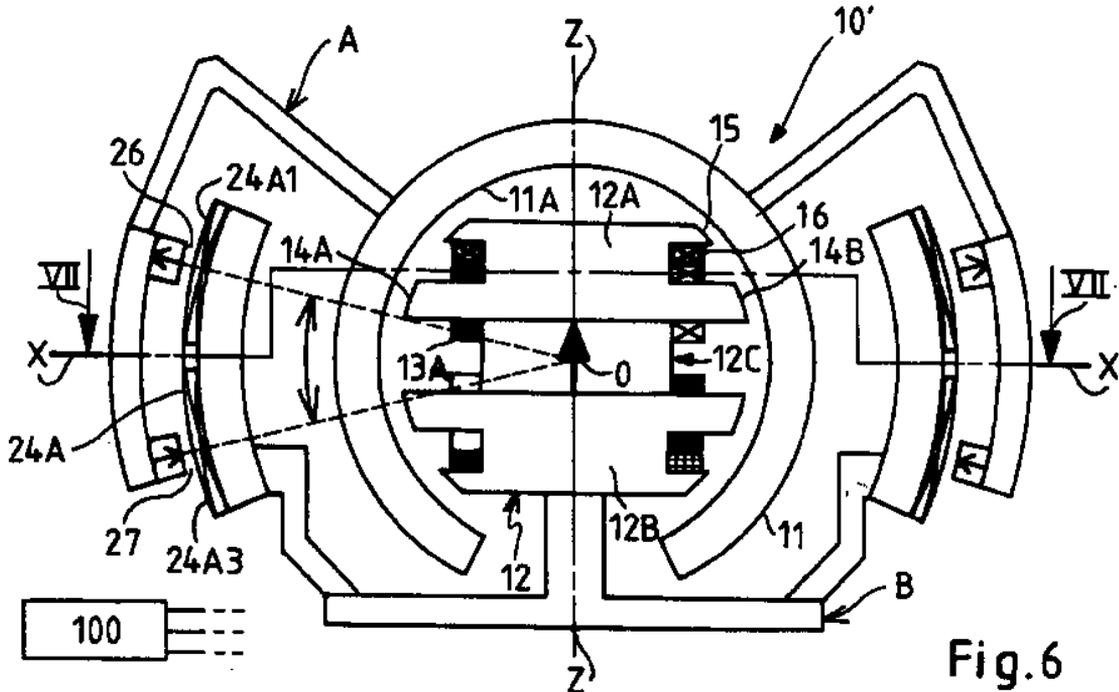


Fig. 6

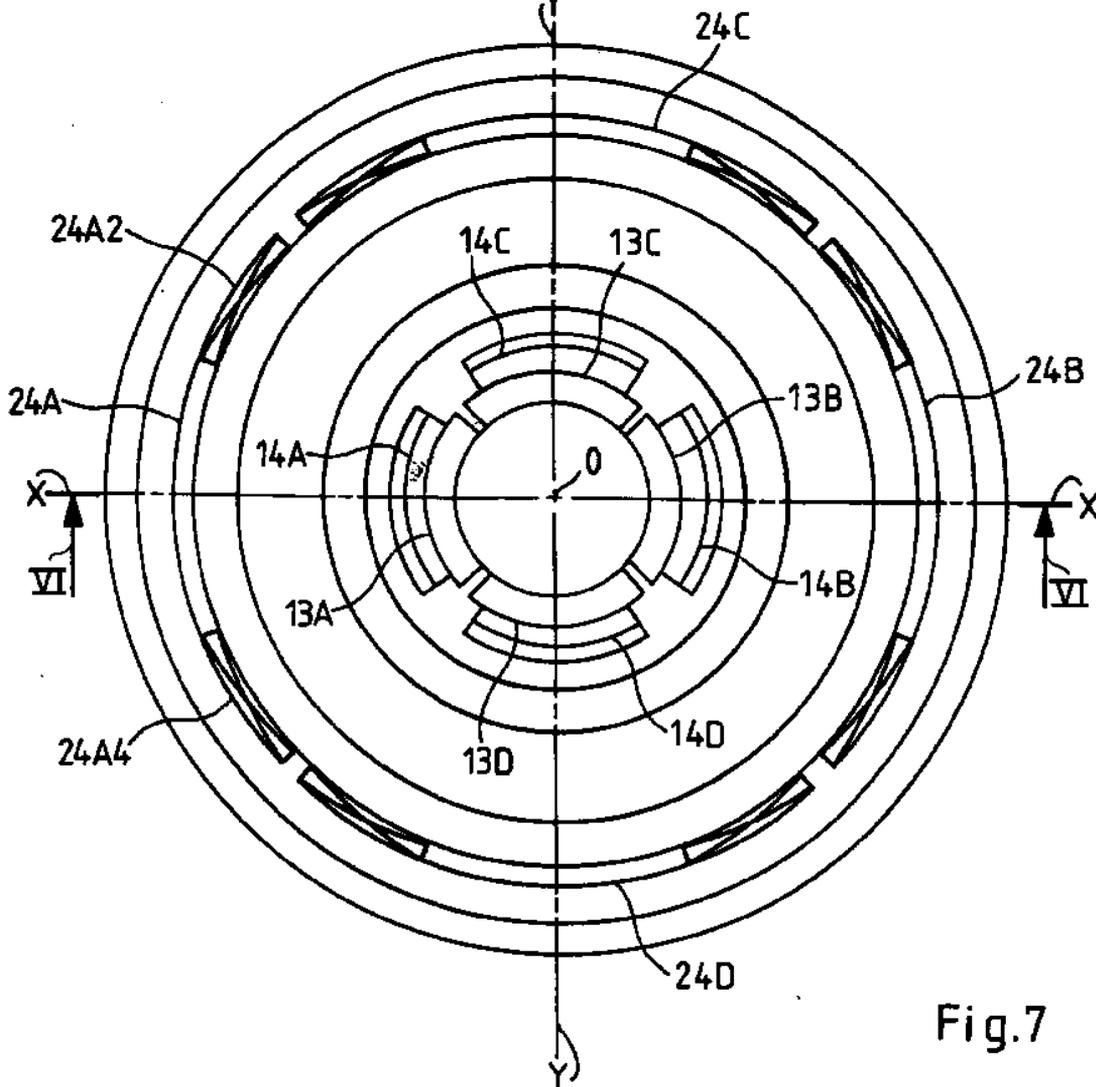


Fig. 7

Fig.12

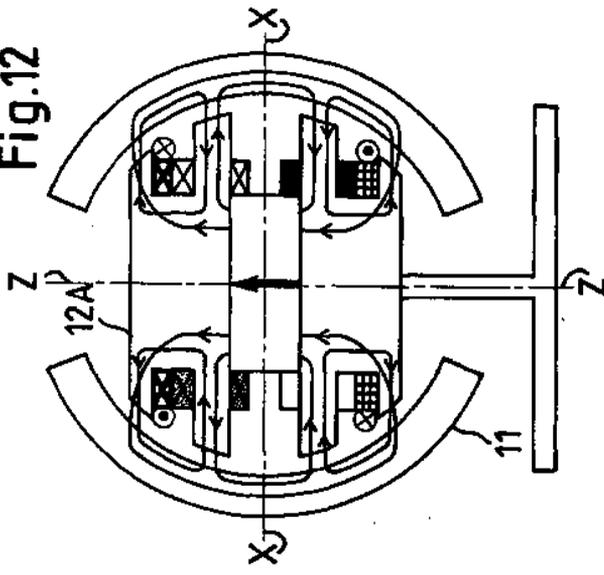


Fig.13

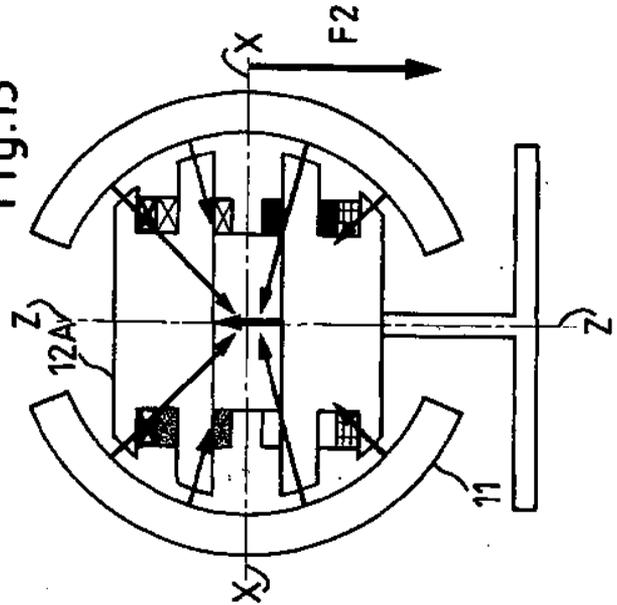


Fig.10

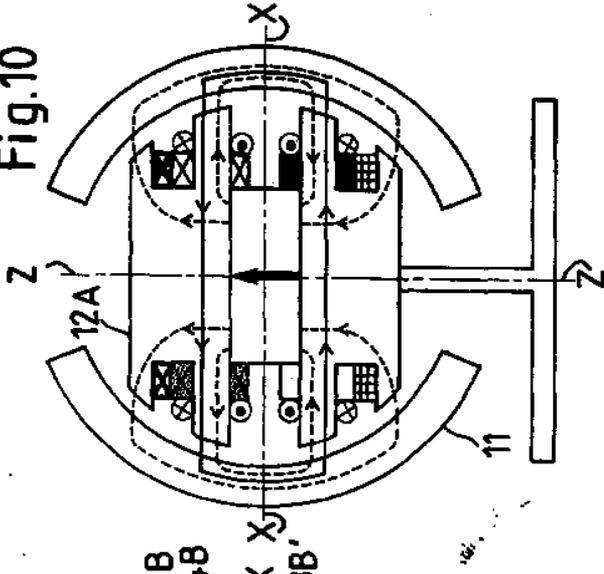


Fig.11

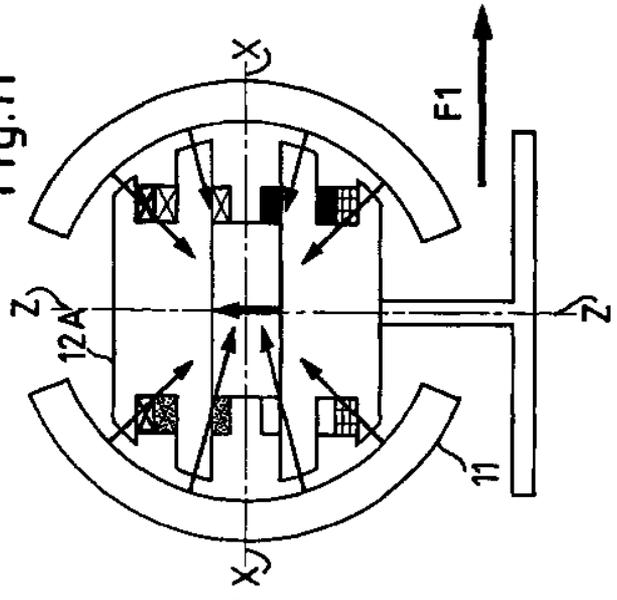


Fig.8

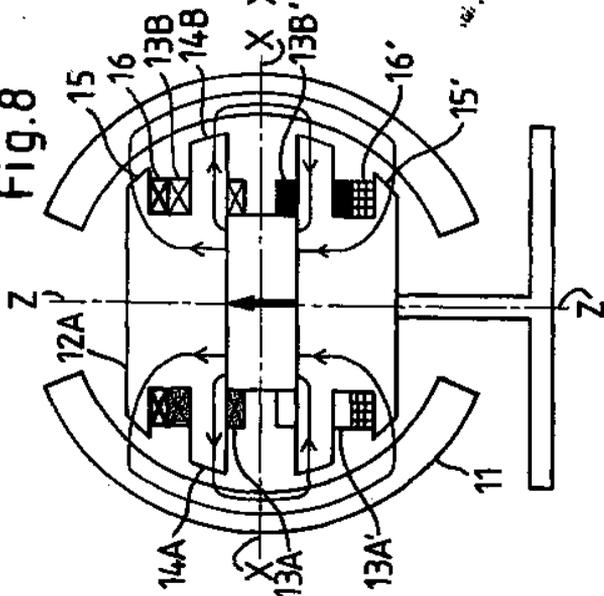
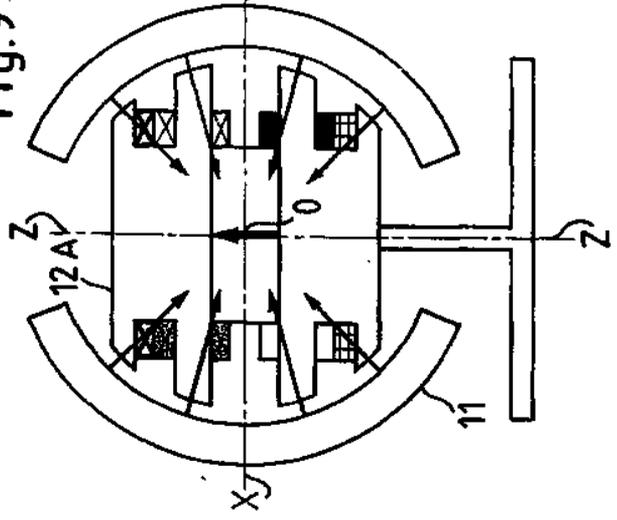
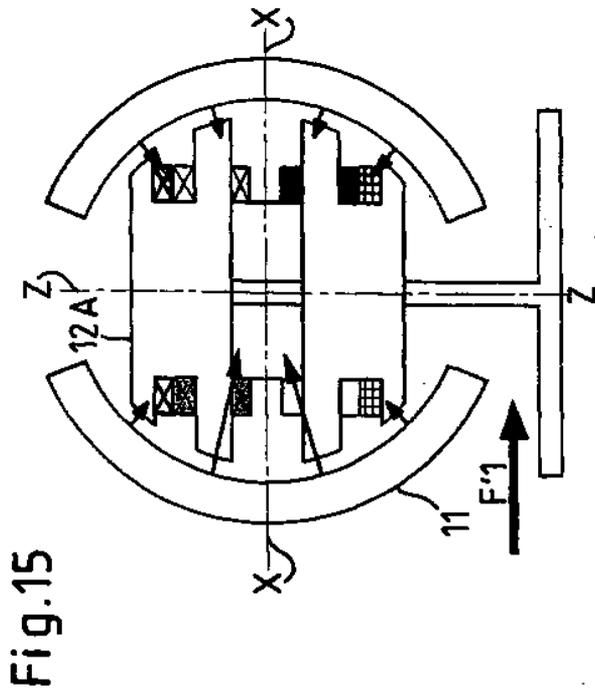
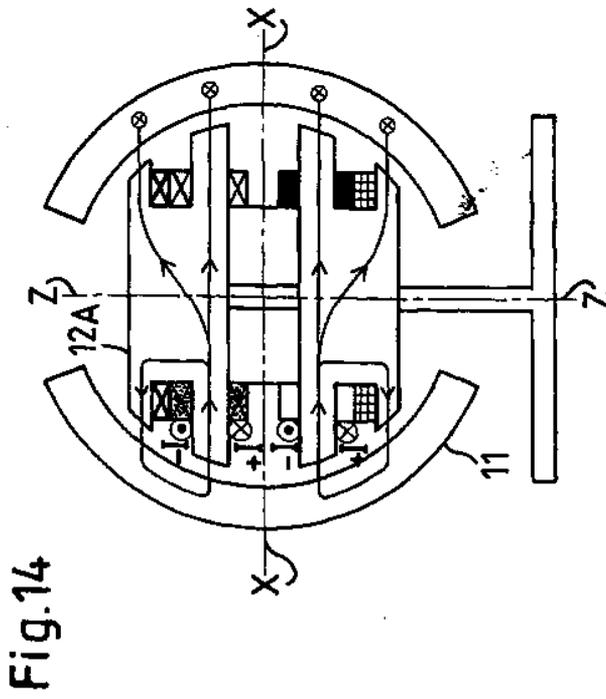
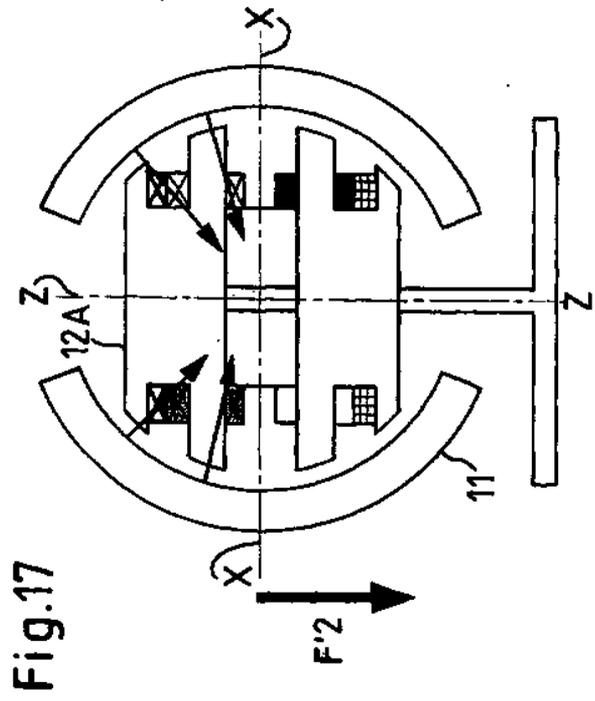
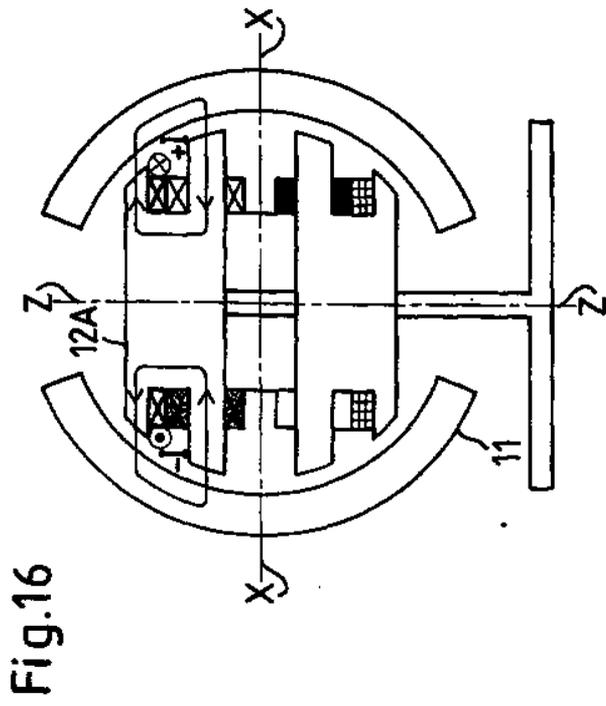


Fig.9





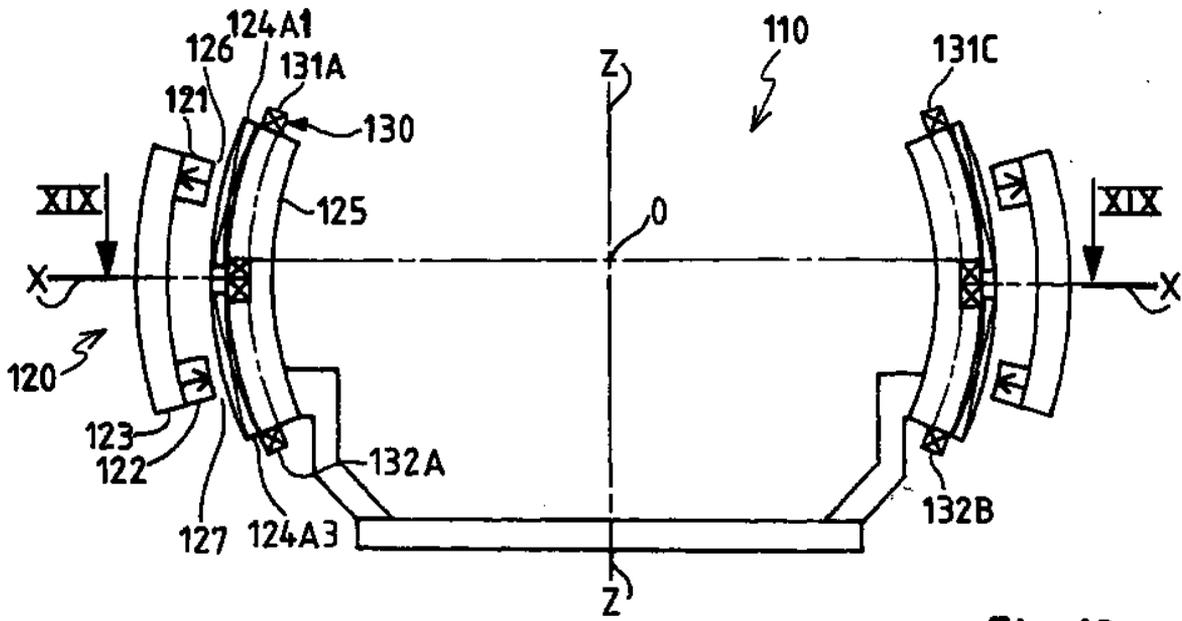


Fig.18

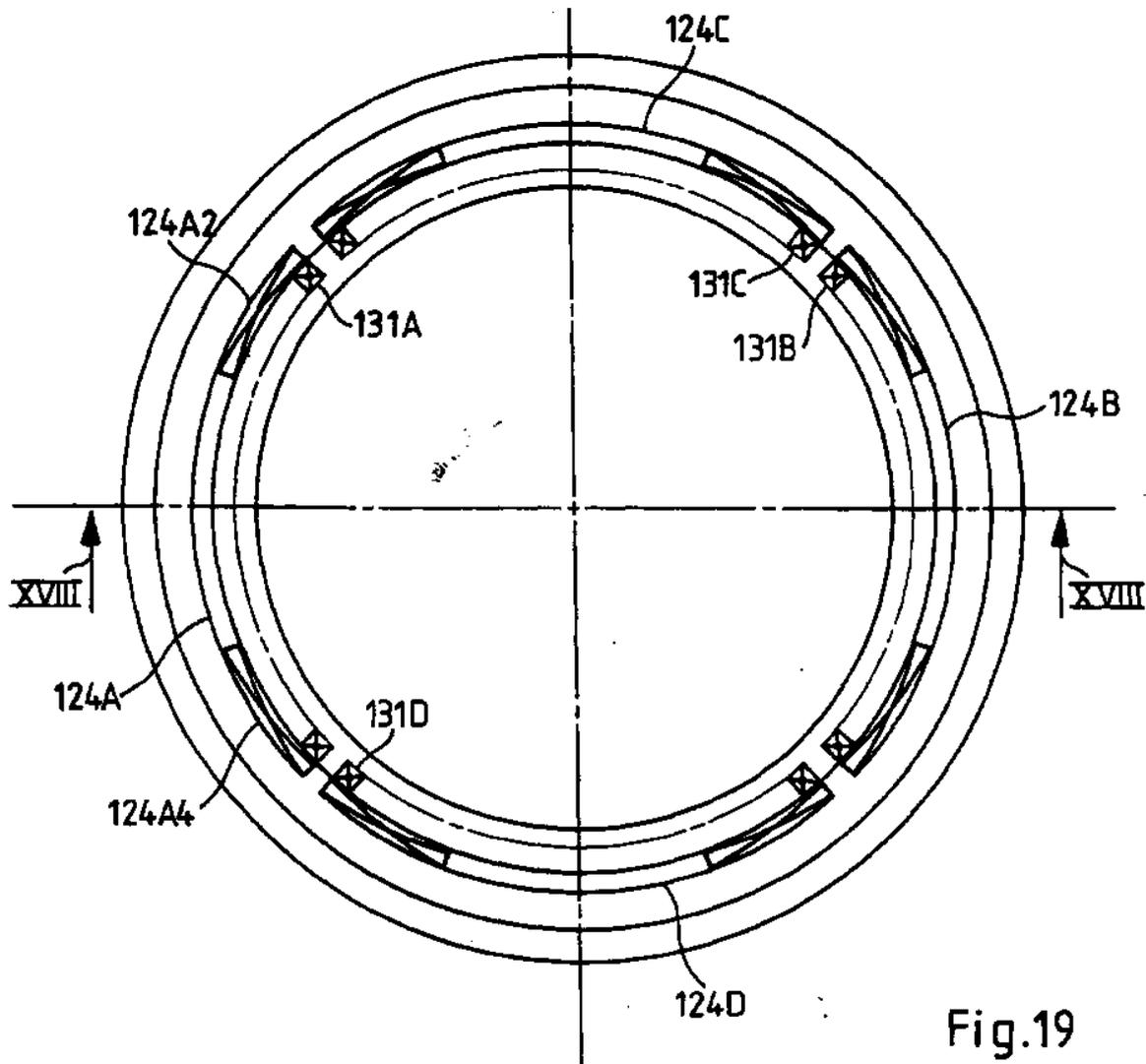


Fig.19

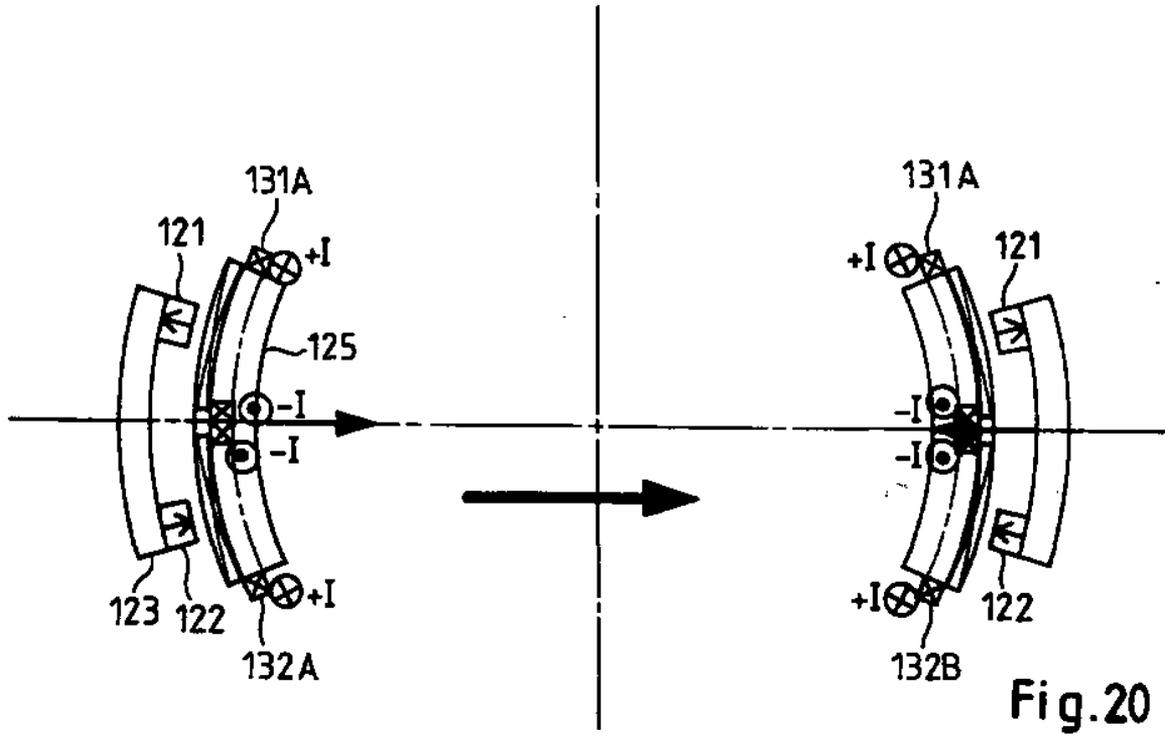


Fig. 20

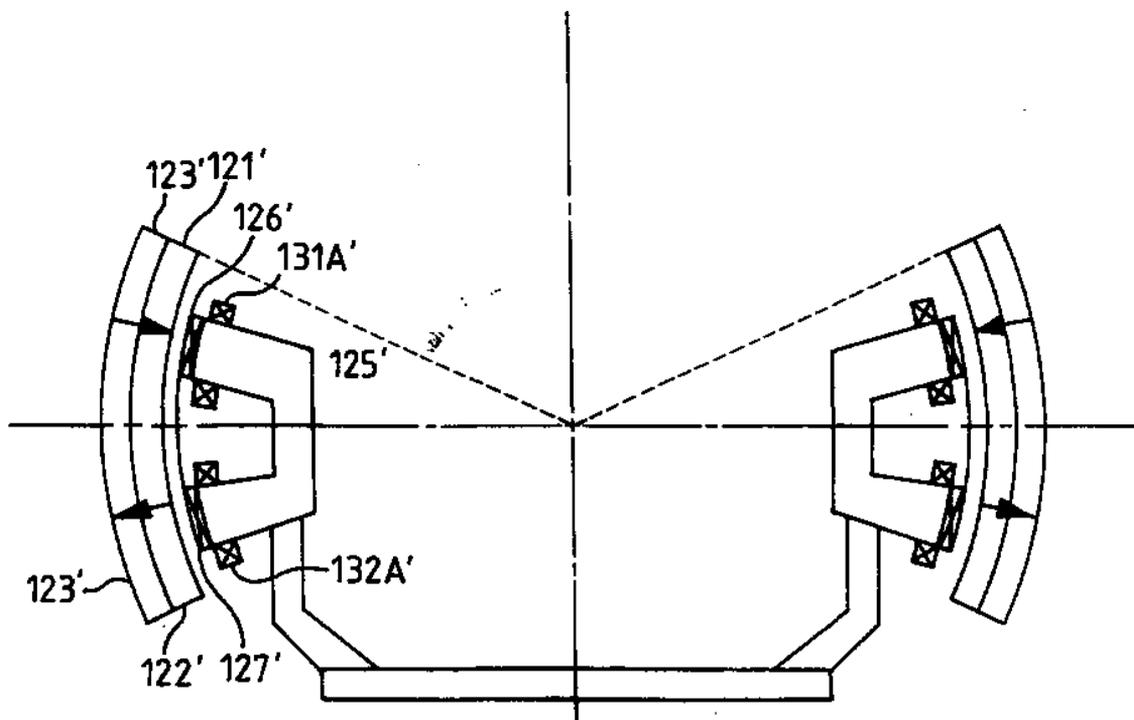


Fig. 21