



(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **100 36 529.9**  
(22) Anmeldetag: **27.07.2000**  
(43) Offenlegungstag: **15.02.2001**  
(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **03.02.2011**

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: **F16C 32/04 (2006.01)**  
**F16C 39/06 (2006.01)**

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

(30) Unionspriorität:  
**9910313 09.08.1999 FR**

(73) Patentinhaber:  
**Thales, Neuilly sur Seine, FR**

(74) Vertreter:  
**Dreiss Patentanwälte, 70188 Stuttgart**

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

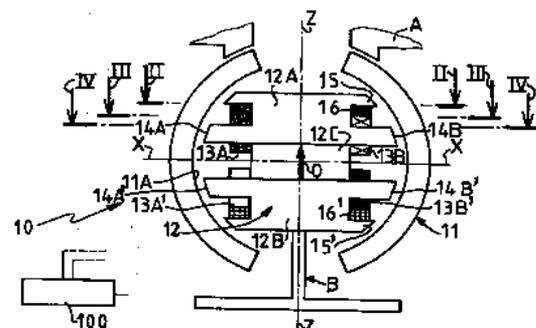
(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
gezogene Druckschriften:

|    |             |    |
|----|-------------|----|
| DE | 693 18 004  | T2 |
| FR | 25 35 479   | A1 |
| US | 47 85 212   | A  |
| US | 46 11 863   | A  |
| WO | 89/12 178   | A1 |
| JP | 58-1 37 618 | A  |

(54) Bezeichnung: **Magnetlager in Form eines Kugelgelenks für einen Kippkörper**

(57) Hauptanspruch: Magnetlager für die Zentrierung eines innerhalb einer Winkelbewegungsfreiheit von wenigstens 5° um einen Kippmittelpunkt (O) kippbeweglichen ersten Körpers (A) in Bezug auf einen zweiten Körper (B) mit einer Bezugsachse (Z-Z) und einer dazu senkrechten Bezugsquerebene (X-X, Y-Y), die durch den Kippmittelpunkt verlaufen, mit

- einem hohlen äußeren Bereich (11, 111), der mit dem ersten Körper (A) fest verbunden ist und eine innere Oberfläche (11A, 111A) hat, deren Form ein Abschnitt einer Kugelfläche ist, deren Mittelpunkt im Wesentlichen mit dem Kippmittelpunkt (O) zusammenfällt, und der sich um eine bewegliche zweite Achse, die eine körpereigene Bezugsachse des ersten Körpers (A) ist und eine verschwindende Neigung im Bezug auf die Bezugsachse (Z-Z) aufweist, beiderseits der senkrecht zur Bezugsachse (Z-Z) verlaufenden Bezugsquerebene (X-X, Y-Y) erstreckt, wobei der hohle äußere Bereich (11, 111) wenigstens zum Teil aus einem ferromagnetischen Material besteht,
- einem mit dem zweiten Körper (B) fest verbundenen inneren Bereich...



**Beschreibung**

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Magnetlager für die Zentrierung eines innerhalb einer Winkelbewegungsfreiheit von wenigstens  $5^\circ$  um einen Kippmittelpunkt kippbeweglichen ersten Körpers in Bezug auf einen zweiten Körper.

**[0002]** 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.

**[0003]** Die Zentrierung eines Körpers in Bezug auf einen anderen in drei verschiedenen, nicht koplanaren Achsen kann aus physikalischen Gründen nur passiv erfolgen.

**[0004]** 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.

**[0005]** 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 Kreisrädern oder bei Reaktionsrädern.

**[0006]** 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.

**[0007]** Es sind bereits Magnetlager vorgeschlagen worden, die die Möglichkeit der Kippung erwähnen. Insbesondere kann das Dokument WO 89/12178 A1 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  $1^\circ$  übersteigt.

**[0008]** Aus der US 4 785 212 A ist ein Magnetlager für ein kippbares Teil bekannt, bei dem die Magneta-

ger voneinander beabstandet sind und sich nicht gegenseitig stören. Die US 4 611 863 A und FR 2 535 479 A1 offenbaren eine magnetische Lagerung bei der ein kippbarer Körper kugelförmig ausgebildet ist. Des Weiteren zeigen die DE 693 18 004 T2 und JP 58 137 618 A zwei Magnetlagerbereiche, die voneinander durch einen Magneten getrennt sind.

**[0009]** Gegenstand der Erfindung ist ein Magnetlager (manchmal wird auch von magnetischer Aufhängung gesprochen) für die Zentrierung eines ersten Körpers, der um einen Kippmittelpunkt kippbeweglich ist, in Bezug auf einen zweiten Körper, das eine Kippbewegungsfreiheit von mindestens  $5^\circ$  erlaubt, die deutlich größer als die der bislang bekannten Magnetlager ist, und die insbesondere Kippwinkel von plus oder minus  $15^\circ$  erreichen und sogar überschreiten kann, ohne dass die Leistungsfähigkeit der Zentrierung in drei nicht koplanaren Achsen gestört ist, bei dem spezifische Elemente mit einer kompakten Geometrie eingesetzt werden, das einen geringen Energieverbrauch hat und nur ein geringes zusätzliches Gewicht für den beweglichen Körper erfordert. Außerdem soll ein derartiges Magnetlager darüber hinaus die Kippbewegung mit der erwähnten Bewegungsfreiheit von wenigstens  $5^\circ$  oder  $15^\circ$  oder mehr steuern.

**[0010]** Zu diesem Zweck wird ein Magnetlager für die Zentrierung eines ersten beweglichen Körpers, der innerhalb einer Winkelbewegungsfreiheit von mindestens  $5^\circ$  um einen Kippmittelpunkt kippbeweglich ist, in Bezug auf einen zweiten Körper mit einer durch den Kippmittelpunkt verlaufenden Bezugsachse mit den Merkmalen des Anspruchs 1.

**[0011]** Man erkennt, dass es einen sehr kompakten inneren Bereich gibt, an dem einige Wicklungen und, innerhalb des die zwei getrennten Elemente trennenden Zwischenraumes, eventuell ein Permanentmagnet montiert sind: 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.

**[0012]** 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 Strom-

fluss in einer der Wicklungen erzeugte Flusslinie durch den Magneten.

**[0013]** 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 nicht-ferromagnetischen 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.

**[0014]** 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.

**[0015]** Es ist leicht zu verstehen, dass die Herstellung des Magnetlagers 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.

**[0016]** 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  $90^\circ$  versetzt sind.

**[0017]** Der hohle äußere Bereich kann eine große Winkelamplitude haben, z. B. plus oder minus  $50^\circ$  in Bezug auf die zu der Bezugsachse senkrechte Querebene.

**[0018]** 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.

**[0019]** Die ersten oder zweiten Vorsprünge der fer-

romagnetischen Zonen eines gegebenen Elementes haben vorzugsweise freie Polflächen, deren Form ein Abschnitt einer gleichen, auf den Kippmittelpunkt zentrierten Kugelfläche ist, wodurch garantiert ist, dass die von diesen ersten Vorsprüngen gebildeten Luftspalte gleiche radiale Breiten haben.

**[0020]** Selbstverständlich ist es vorteilhaft, dass die ersten und zweiten Vorsprünge Polflächen haben, die durch Abschnitte einer einzigen Kugelfläche gebildet sind, so dass alle Luftspalte auf einer Seite der Querebene gleich sind. Dabei ist bevorzugt, dass die Vorsprünge der zwei Elemente auf einer gleichen Kugelfläche liegende Polflächen haben, so dass die Luftspalte normalerweise gleich sind, was die Bestimmung und Erzeugung von für die Zentrierung und die Kippbewegung notwendigen Flussänderungen erleichtert.

**[0021]** Es können zwei Hauptkonfigurationen unterschieden werden, je nachdem, ob die von der Querebene am weitesten entfernten Vorsprünge ständig und zur Gänze der inneren Oberfläche des hohlen äußeren Bereiches unabhängig von der Neigung des hohlen äußeren Bereiches in Bezug auf den inneren Bereich innerhalb der Kippbewegungsfreiheit gegenüberliegen oder nicht.

**[0022]** Der einfachste Fall ist der, wo diese Bedingung erfüllt ist.

**[0023]** In dem etwas komplexeren entgegengesetzten Fall ermöglicht die Existenz von Luftspalten von variablem Querschnitt, durch geeignete Erregung der Wicklungen Kippmomente zu erzeugen, ohne dass andere als die vorgenannten Elemente erforderlich sind.

**[0024]** In diesem zweiten Fall werden die Funktionen der Zentrierung und der Kippsteuerung durch eine kompakte Vorrichtung erreicht (Alles ist im Volumen des hohlen äußeren Bereiches enthalten).

**[0025]** Im zweiten Fall haben die am weitesten von der Querebene entfernten Vorsprünge der ferromagnetischen Zonen eines gegebenen Elementes vorteilhafterweise freie Polflächen, deren Form ein global trapezförmiger Abschnitt einer gleichen, auf den Kippmittelpunkt zentrierten Kugelfläche ist, wobei jeder dieser global trapezförmigen Abschnitte eine Kante hat, die sich bis in die Nähe der Bezugsachse erstreckt. So bilden diese zweiten Vorsprünge zusammen (unter Berücksichtigung der sie in Umfangsrichtung für die Einfügung der Wicklung trennenden Zwischenräume) eine Kugelkalotte, was die mögliche Amplitude deren Bewegungsfreiheit maximiert und garantiert, dass normalerweise, bei einer korrekt zentrierten Konfiguration des hohlen äußeren Bereiches, die von den zweiten Vorsprüngen mit der inneren Oberfläche dieses hohlen äußeren Bereiches gebil-

deten Luftspalte gleiche Breiten haben.

**[0026]** Es ist nicht notwendig, dass die äußeren Vorsprünge sich bis in die Nähe der Bezugsachse erstrecken; es ist allerdings bevorzugt, dass die zwei Mehrzahlen von zweiten Vorsprüngen der zwei Elemente symmetrisch sind (unter dem Gesichtspunkt der Winkelamplitude in einer durch die Bezugsachse verlaufenden Ebene, es ist aber nicht notwendig, dass die zweiten Vorsprünge individuell in Bezug auf diese Querebene symmetrisch sind), und dass die zwei kreisrunden Ränder der inneren Oberfläche des hohlen äußeren Bereiches gleiche Radien haben; dies garantiert eine gewisse Symmetrie der Kippsteuerungseigenschaften.

**[0027]** Im ersten Fall bilden die am weitesten von der Querebene entfernten Vorsprünge 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.

**[0028]** In diesem ersten Fall ist vorteilhafterweise eine zusätzliche Wicklung 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.

**[0029]** 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.

**[0030]** In jedem Falle können die spezifischen Wicklungen der ferromagnetischen Zonen einfach um einen der Vorsprünge gewickelt sein, den die betreffende ferromagnetische Zone aufweist; dabei kann es sich um den ersten oder den zweiten der Vorsprünge dieser Zone handeln. Um den Verlauf der Flusslinien und damit den Magnetfluss durch jeden der Luftspal-

te genau zu steuern, umfasst jede ferromagnetische Zone zwei spezifische Wicklungen, die jeweils um den ersten bzw. den zweiten Vorsprung gewickelt sind.

**[0031]** Die spezifischen Wicklungen der ferromagnetischen Zonen eines gegebenen Elementes sind vorteilhafterweise benachbart, zumindest in Umfangsrichtung, was es ermöglicht, die Gesamtoberfläche der freien Polflächen der Vorsprünge, um die diese Wicklungen gewickelt sind (und damit der zugeordneten Luftspalte) zu maximieren. Wenn jede ferromagnetische Zone zwei Wicklungen umfasst, sind diese vorzugsweise ebenfalls benachbart (parallel zur Bezugsachse), was die Gesamtoberfläche der Polflächen der Vorsprünge dieser ferromagnetischen Zone maximiert.

**[0032]** Der hohle äußere Bereich kann im ersten Fall eine einzige Öffnung aufweisen, die dazu dient, die feste Verbindung der Elemente in Bezug auf ein äußeres Gestell zu ermöglichen, wohingegen der hohle äußere Bereich gegenüber dieser einzigen Öffnung die Bezugsachse schneidet.

**[0033]** Im ersten Fall kann die Kippsteuerung durch zusätzliche Mittel erreicht werden. Diese Kippsteuerungsmittel umfassen z. B. außerhalb des hohlen äußeren Bereiches:

- zwei Kränze mit permanenter Magnetisierung, getragen von einem mit dem hohlen äußeren Bereich fest verbundenen ersten Anker, die die Bezugsachse umgeben und dabei jeweils eine Orientierung der Magnetisierung haben, die an jedem Punkt wenigstens näherungsweise durch die Kippachse verläuft, wobei diese Kränze parallel sind und parallel zur Bezugsachse beiderseits des Kippmittelpunktes versetzt sind und freie Polflächen haben, die Abschnitte einer gleichen, auf den Kippmittelpunkt zentrierten Kugelfläche bilden,

- eine ringförmige Mehrzahl von Kippwicklungen, die mit dem inneren Bereich 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 von wenigstens 5°, 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.

**[0034]** Man erkennt, dass die Konstanz des zwischen dem zweiten ferromagnetischen Anker und den freien Ästen der magnetisierten Kränze gebildeten Luftspaltes eine Konstanz der Kippsteuerungen-

schaften innerhalb der Kippbewegungsfreiheit von wenigstens 5° garantiert. Außerdem ist die Richtung der Magnetisierung der Kränze vorzugsweise lokal zum Kippmittelpunkt hin gerichtet, was den Vorteil hat, dass die den Luftspalt kreuzenden Flusslinien maximiert werden.

**[0035]** 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. In der Praxis führt diese Symmetrie der Positionierung der Kippsteuermittel zu einer Symmetrie der Kippbewegungsfreiheit in Bezug auf die durch den Kippmittelpunkt verlaufende Querebene.

**[0036]** Die zwei Kränze haben vorzugsweise in einer die Bezugsachse enthaltenden Ebene einen Abstand, der bezogen auf den Kippmittelpunkt einem Winkelversatz von wenigstens 10° 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.

**[0037]** Um die Effizienz der Kippsteuermittel zu maximieren, sind die umlaufenden Adern jeder Gruppe von Wicklungen benachbart auf einer Kugeloberfläche des zweiten Ankers angeordnet, die um den Kippmittelpunkt zentriert ist. Diese Nebeneinanderanordnung der umlaufenden Adern jeder Gruppe hat den Vorteil, dass die Dicke der Luftspalte, in denen sich die Adern befinden, minimiert wird.

**[0038]** 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.

**[0039]** Vorzugsweise ist der zweite Anker (derjenige, an dem die Kippwicklungen gehalten sind) radial zwischen dem hohlen äußeren Bereich und dem ersten Anker (der die magnetisierten Kränze trägt) ange-

ordnet.

**[0040]** Gegenstände, Merkmale und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung unter Bezugnahme auf die beigefügten Figuren. Es zeigen:

**[0041]** **Fig. 1** eine Schnittansicht eines erfindungsgemäßen Magnetlagers vom Kugelgelenktyp in einer eine Bezugsachse Z-Z enthaltenden Ebene;

**[0042]** **Fig. 2** einen Querschnitt des inneren Bereiches des Lagers entlang der Schnittlinie II-II aus **Fig. 1**;

**[0043]** **Fig. 3** einen Querschnitt des inneren Bereiches des Magnetlagers aus **Fig. 1** entlang der Schnittlinie III-III;

**[0044]** **Fig. 4** einen anderen Querschnitt entlang der Schnittlinie IV-IV;

**[0045]** **Fig. 5** eine zur **Fig. 1** analoge Ansicht, in der die von dem zentralen Magneten erzeugten magnetischen Flusslinien auftreten;

**[0046]** **Fig. 6** eine Ansicht ähnlich der der **Fig. 1**, in der Pfeile auftreten, deren Amplitude und Richtung den von den magnetischen Flüssen durch die Luftspalte erzeugten Kräften entsprechen;

**[0047]** **Fig. 7** eine Ansicht analog der der **Fig. 5**, die ferner durch Anlegen von Erregerströmen an bestimmte Wicklungen erzeugte Flusslinien zeigt;

**[0048]** **Fig. 8** eine Ansicht analog der der **Fig. 6**, die Pfeile zeigt, deren Amplitude im Bezug auf die der **Fig. 6** durch die von den Erregerströmen in den Wicklungen erzeugten magnetischen Flüsse verändert ist;

**[0049]** **Fig. 9** eine andere Ansicht ähnlich der der **Fig. 5**, die andere, durch Stromfluss in anderen Wicklungen erzeugte Flusslinien zeigt;

**[0050]** **Fig. 10** eine Ansicht ähnlich der der **Fig. 6**, in der Pfeile auftreten, deren Amplitude die von den Wicklungen in **Fig. 9** erzeugten Flusslinien berücksichtigt;

**[0051]** **Fig. 11** und **Fig. 12** sind Varianten der **Fig. 7** und **Fig. 8** gemäß einer Ausführungsvariante des Lagers;

**[0052]** **Fig. 13** und **Fig. 14** sind Varianten der **Fig. 9** und **Fig. 10**;

**[0053]** **Fig. 15** ist eine Schnittansicht eines anderen Ausführungsbeispiels eines erfindungsgemäßen Magnetlagers vom Kugelgelenktyp entlang der Bezugs-

achse Z-Z;

[0054] **Fig. 16** ist ein Querschnitt entlang der gestrichelten Linie XVI-XVI;

[0055] **Fig. 17** ist ein Schnitt in einer eine Bezugsachse Z-Z enthaltenden Ebene durch ein zweites erfindungsgemäßes Magnetlager vom Kugelgelenktyp;

[0056] **Fig. 18** ist ein Querschnitt des inneren Bereiches entlang der Schnittlinie XVIII-XVIII aus **Fig. 17**;

[0057] **Fig. 19** ist eine Draufsicht auf den inneren Bereich des Magnetlagers von **Fig. 17** entlang dem Pfeil XIX;

[0058] **Fig. 20** ist eine Ansicht analog zu der der **Fig. 17**, in der die von dem zentralen Magneten erzeugten magnetischen Flusslinien auftreten;

[0059] **Fig. 21** ist eine Ansicht ähnlich der der **Fig. 17**, in der Pfeile auftreten, deren Amplitude und Richtung den von den die Luftspalte kreuzenden magnetischen Flüssen erzeugten Kräften entsprechen;

[0060] **Fig. 22** ist eine Ansicht analog zu der der **Fig. 20**, die ferner durch Anlegen von Erregerströmen an bestimmte Wicklungen erzeugte Flusslinien zeigt, die zu einer Zentrierung entlang einer zu der Bezugsachse transversalen Achse dienen;

[0061] **Fig. 23** ist eine Ansicht analog zu der der **Fig. 21**, die Pfeile zeigt, deren Amplitude im Vergleich zu denen der **Fig. 22** unter Berücksichtigung der von den Erregerströmen in den Wicklungen erzeugten Flusslinien verändert ist;

[0062] **Fig. 24** ist eine andere Ansicht ähnlich der der **Fig. 20**, die andere durch den Fluss von Strömen in anderen Wicklungen für eine Zentrierung entlang der Bezugsachse erzeugte Flusslinien zeigt;

[0063] **Fig. 25** ist eine Ansicht ähnlich der der **Fig. 21**, in der Pfeile auftreten, deren Amplitude die von den Wicklungen in **Fig. 24** erzeugten Flusslinien berücksichtigt

[0064] **Fig. 26** ist eine weitere, der **Fig. 20** ähnliche Ansicht, die andere durch den Fluss von Strömen in anderen Wicklungen für die Steuerung einer Kippbewegung erzeugte Flusslinien zeigt;

[0065] **Fig. 27** ist eine Ansicht ähnlich der der **Fig. 21**, in der Pfeile auftreten, deren Amplitude die von den Wicklungen in **Fig. 26** erzeugten Flusslinien berücksichtigt;

[0066] **Fig. 28** und **Fig. 29** sind Varianten der **Fig. 22** und **Fig. 23**;

[0067] **Fig. 30** und **Fig. 31** sind Varianten der **Fig. 24** und **Fig. 25**;

[0068] **Fig. 32** und **Fig. 33** sind Varianten der **Fig. 26** und **Fig. 27**;

[0069] **Fig. 34** ist ein axialer Schnitt durch ein erfindungsgemäßes Lager nach dem Schema der **Fig. 17**; und

[0070] **Fig. 35** ist eine perspektivische Ansicht dieses Lagers unter teilweiser Weglassung des äußeren Bereiches.

[0071] **Fig. 1** zeigt ein allgemein mit **10** bezeichnetes Magnetlager, das zur Zentrierung eines mit einer Winkelbewegungsfreiheit von wenigstens  $5^\circ$  um einen Kippmittelpunkt O kippbeweglichen ersten Körpers A in Bezug auf einen zweiten Körper B dient, der eine hier vertikale Bezugsachse Z-Z hat, die durch den Kippmittelpunkt O verläuft.

[0072] Dieses Magnetlager umfasst einen hohlen äußeren Bereich **11**, der mit dem ersten Körper A fest verbunden ist und der eine nicht dargestellte bewegliche zweite Achse besitzt, die durch den Kippmittelpunkt O geht und eine körpereigene Bezugsachse des ersten Körpers A ist sowie eine verschwindende Neigung zur Bezugsachse Z-Z des zweiten Körpers B aufweist, und einen mit dem zweiten Körper B fest verbundenen inneren Bereich **12**.

[0073] Dieser hohle äußere Bereich **11** hat eine innere Oberfläche **11A**, deren Form ein Teil einer Kugeloberfläche ist, deren Mittelpunkt im Wesentlichen mit dem Kippmittelpunkt O zusammenfällt; dieser hohle äußere Bereich erstreckt sich um die Bezugsachse Z-Z auf beiden Seiten einer Querebene, die auf dieser Bezugsachse senkrecht steht und durch den Kippmittelpunkt O verläuft. In **Fig. 1** ist der Verlauf dieser Querebene definiert durch eine zur Bezugsachse Z-Z am Punkt O senkrechte Querachse X-X.

[0074] Dieser hohle äußere Bereich **11** ist wenigstens zum Teil aus einem ferromagnetischen Material von beliebiger bekannter Art.

[0075] 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.

[0076] Jedes Element umfasst eine Mehrzahl von wenigstens drei um die Bezugsachse winkerversetzten ferromagnetischen Zonen, wobei jede Zone mit der inneren Oberfläche **11A** des hohlen äußeren Bereiches **11** zwei Luftspalte bildet und mit einer spezi-

fischen Wicklung **13A**, **13B**, **13C** oder **13D** versehen ist, die in der Lage ist, magnetische Flusslinien zu erzeugen, die sich über diese zwei Luftspalte schließen.

**[0077]** Bei dem in **Fig. 1** dargestellten Beispiel, und wie sich aus **Fig. 3** und **Fig. 4** ergibt, ist diese Mehrzahl von ferromagnetischen Zonen vorzugsweise durch zwei Paare von diametral gegenüberliegenden ferromagnetischen Zonen gebildet, die um die Bezugsachse um  $90^\circ$  winkelfersetzt sind.

**[0078]** Genauer gesagt gibt es ein Paar von auf die Zentrierungsachse X-X der **Fig. 1** ausgerichteten Paar von ferromagnetischen Zonen und ein Paar von ferromagnetischen Zonen, das dazu dient, die Zentrierung entlang einer mit Y-Y bezeichneten dritten Achse senkrecht zu den vorgenannten Achsen X-X und Z-Z zu ermöglichen.

**[0079]** 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. 1** bis **Fig. 4** 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.

**[0080]** 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.

**[0081]** Die Polflächen der diversen Vorsprünge sind vorzugsweise Abschnitte einer gleichen Kugelfläche, so dass alle Luftspalte eine gleiche Breite haben.

**[0082]** 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**).

**[0083]** Wie sich aus den **Fig. 3** und **Fig. 4** ergibt, sind die Wicklungen **13A** bis **13D**, die die Vorsprünge **14A** bis **14D** umgreifen, in Umfangsrichtung im Wesentlichen benachbart.

**[0084]** 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.

**[0085]** Man erkennt in **Fig. 1**, 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.

**[0086]** Jede der Wicklungen, spezifisch oder zusätzlich, des oberen oder des unteren Elementes, ist an eine schematisch mit **100** bezeichnete Erregerschaltung angeschlossen, die in der Lage ist, an jede dieser Wicklungen einen geeigneten Erregerstrom anzulegen.

**[0087]** Bei dem in **Fig. 1** 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.

**[0088]** Als nicht dargestellte 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.

**[0089]** Die **Fig. 5** bis **Fig. 14** zeigen magnetische Flusslinien bzw. daraus in den Luftspalten resultierende Kräfte in verschiedenen Erregungskonfigurationen der Wicklungen. Um die Lesbarkeit der **Fig. 5** bis **Fig. 14** hinsichtlich der nur durch ihre Schnittflä-

chen dargestellten Wicklungen zu verbessern, sind diese für jede der Wicklungen anders dargestellt.

**[0090]** Zum Beispiel erkennt man in **Fig. 5** leicht die zusätzliche Wicklung **16** des oberen Elementes **12A** sowie zwei diametral gegenüberliegende spezifische Wicklungen **13A** (links) und **13B** (rechts).

**[0091]** 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.

**[0092]** In **Fig. 5** sind vereinfacht die magnetischen Flusslinien dargestellt, die von dem Permanentmagneten erzeugt werden, der den Zwischenraum **12C** zwischen den Elementen **12A** und **12B** belegt.

**[0093]** Man erkennt, dass es rechts und links in **Fig. 5** 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.

**[0094]** 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.

**[0095]** 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 **O** 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. 6** durch eine Anordnung von Pfeilen dargestellt, die alle zum Kippmittelpunkt **O** 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.

**[0096]** **Fig. 7** 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. 5** die mit **13A**, **13B** und **13A'** und **13B'** bezeichneten, von der Erregerschaltung **100** aus **Fig. 1** 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. 7** 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. 7** 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.

**[0097]** 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. 8** 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. 8** mit dem Bezugszeichen **F1** bezeichnet ist. Die **Fig. 7** und **Fig. 8** entsprechen also einer Erregungsart der Wicklungen, mit der eine Zentrierung des hohlen äußeren Bereiches quer zur Bezugsachse entlang der Achse **X-X** der **Fig. 1** und **Fig. 3** erreicht werden kann. Man versteht leicht, dass durch Anlegen von Erregerströmen an die anderen Wicklungspaare, nämlich die entlang der Achse **Y-Y** der **Fig. 3** angeordneten, in ähnlicher Weise eine Querzentrierungskraft 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.

**[0098]** **Fig. 9** entspricht einem anderen Beispiel der Erregung der Wicklungen, bei dem die zwei zusätzli-

chen Wicklungen (in **Fig. 5** 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 auf. Die **Fig. 9** und **Fig. 10** entsprechen also einem Fall der Erregung der Wicklungen entsprechend einer Zentrierung des hohlen äußeren Bereiches parallel zur Bezugsachse.

**[0099]** 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. 10** mit **F2** bezeichneten Kraft erzeugt werden kann.

**[0100]** Wenn es um eine Zentrierung parallel zur Querebene geht, werden nur die spezifischen Wicklungen, nicht aber die zusätzlichen Wicklungen elektrisch versorgt.

**[0101]** Bei einer Zentrierung parallel zur Bezugsachse kann es genauso sein, weil mit den in **Fig. 9** 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.

**[0102]** 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 Elemente zwei Paare von einander bezogen auf die Bezugsachse gegenüberliegend angeordneten Wicklungen aufweist, wobei diese

Paare um 90° gegeneinander winkelvezsetzt sind.

**[0103]** 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.

**[0104]** Die **Fig. 11** bis **Fig. 14** zeigen Varianten der **Fig. 7** bis **Fig. 10**.

**[0105]** Unter dem strukturellen Gesichtspunkt ist das in den **Fig. 11** bis **Fig. 14** dargestellte Magnetlager einfacher als das in den vorhergehenden Figuren dargestellte, weil der Zwischenraum zwischen unterem und oberem 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.

**[0106]** Wie noch deutlich werden wird, zeigen diese **Fig. 11** bis **Fig. 14**, 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. 7** bis **Fig. 10** beschrieben.

**[0107]** So ist im Beispiel von **Fig. 11** nur eine einzige spezifische Wicklung jedes Elementes aktiviert, nämlich die in **Fig. 5** 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. 12** 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 **F'1** 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.

**[0108]** In **Fig. 13** 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. 14** 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  $F^2$ .

**[0109]** Wie bereits für die **Fig. 9** und **Fig. 10** 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.

**[0110]** 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 aktiviert werden.

**[0111]** Die **Fig. 15** und **Fig. 16** zeigen ein Lager, das im Wesentlichen dem der **Fig. 1** bis **Fig. 10** entspricht, und das ferner Mittel für die Kippsteuerung aufweist.

**[0112]** Diese Mittel für die Kippsteuerung umfassen außerhalb des hohlen äußeren Bereiches 11:

- 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. 16** mit 24A, 24B, 24C, 24D bezeichnet, die von einem mit dem inneren Bereich fest verbundenen zweiten ferromagnetischen Anker 25 getragen sind.

**[0113]** Der erste ferromagnetische Anker 23 erstreckt sich um die Bezugsachse; das gleiche gilt für jeden der zwei Kränze mit Permanentmagnetisierung 21 und 22.

**[0114]** 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. 15** ergibt, ist diese Orientierung derart, dass sie an allen Punkten im Wesentlichen durch den Kippmittelpunkt verläuft.

**[0115]** Diese Kränze mit Permanentmagnetisierung haben entgegengesetzte Magnetisierungsrichtungen, d. h., dass, wie es sich aus **Fig. 15** 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 Bezugsach-

se hin gerichtete Magnetisierung hat.

**[0116]** 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. 15**) oder zu dieser entgegengesetzt ausgerichtet sind. Die zwei freien Polflächen sind zwei Abschnitte einer gleichen, auf den Kippmittelpunkt des Lagers zentrierten Kugelfläche.

**[0117]** Die zwei Kränze sind im Wesentlichen parallelen, parallel zur Bezugsachse versetzten Ebenen beiderseits des Kippmittelpunktes angeordnet.

**[0118]** 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.

**[0119]** 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 Kippwicklung 24A in **Fig. 15** 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. 16** mit den Bezugszeichen 24A2 und 24A4 bezeichnet sind, zu einem Kreis geschlossen sind.

**[0120]** 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.

**[0121]** 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.

**[0122]** Die freien Polflächen der zwei Kränze haben in einer die Bezugsachse enthaltenden Ebene, z. B. der Ebene der **Fig. 15**, einen Abstand, der bezogen auf den Kippmittelpunkt einem Winkelversatz von wenigstens 10° entspricht. Mit anderen Worten, wenn man in dieser **Fig. 15** zwei Linien durch den Kippmittelpunkt O und die Mitte der Luftspalte 26 und 27, wie sie links in **Fig. 15** gezeigt sind, zieht, so bilden diese zwei Linien einen Winkel von wenigstens 10°.

**[0123]** 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** benachbart angeordnet, die um den Kippmittelpunkt zentriert ist. Die Kippwicklungen sind somit stark abgeflacht.

**[0124]** Bei dem betrachteten Beispiel haben die Kränze in der durch die Bezugsachse verlaufenden Ebene, z. B. der Ebene der **Fig. 15**, eine Winkelamplitude, die kleiner ist als die jeder Gruppe von umlaufenden Adern jeder Wicklung. In **Fig. 15** 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. 15** vom Kippmittelpunkt aus die Gruppe von umlaufenden Adern **24A1** oder **24A3** sieht.

**[0125]** 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.

**[0126]** Der Magnetfluss durch die Luftspalte **26** und **27** ist maximiert, 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.

**[0127]** 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.

**[0128]** 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, dass daraus eine nichtverschwindende vertikale Kraft parallel zur Bezugsachse Z-Z resultiert. Indem man Ströme in den zwei einander entgegengesetzt bezogen auf die Bezugsachse angeordneten Kippwicklungen fließen lässt, kann man ein Kippmoment um den Kippmittelpunkt erhalten.

**[0129]** Bei dem dargestellten Beispiel ist der zweite Anker **25** radial zwischen dem hohlen äußeren Bereich **11** 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 **11** 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.

**[0130]** 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.

**[0131]** Der mittlere Bereich des in **Fig. 15** dargestellten Magnetlagers unterscheidet sich von dem Magnetlager der **Fig. 1** dadurch, dass der hohle äußere Bereich in seinem oberen Bereich geschlossen ist, d. h., dass es nur eine einzige Öffnung im unteren Bereich gibt, die den Durchgang eines Elementes für die Verbindung des inneren Teiles mit dem Rest des Körpers ermöglicht.

**[0132]** Selbstverständlich kann das Lager aus **Fig. 1** oder ein Lager entsprechend dem mittleren Bereich der **Fig. 15** mit einem beliebigen Typ von Steuermitteln zum Steuern einer Kippung und/oder Drehung um die Bezugsachse Z-Z kombiniert werden. Es ist jedoch festzuhalten, dass bei bestimmten Anwendungen nur eine Zentrierung in den drei Achsen notwendig ist, ohne dass eine Kippsteuerung vorgenommen werden muss. Im letzteren Fall genügt ein Lager, das nur die Elemente der **Fig. 1** aufweist.

**[0133]** **Fig. 17** zeigt ein zweites, allgemein mit **110** bezeichnetes Magnetlager, das zur Zentrierung eines innerhalb einer Winkelbewegungsfreiheit von wenigstens  $5^\circ$  um einen Kippmittelpunkt O 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.

**[0134]** Dieses Magnetlager umfasst einen hohlen äußeren Bereich **111**, der mit dem ersten Körper A fest verbunden ist, und einen inneren Bereich **112**, der mit dem zweiten Körper B fest verbunden ist.

**[0135]** Dieser hohle äußere Bereich **111** hat eine innere Oberfläche **111A**, deren Form ein Abschnitt einer Kugeloberfläche ist, deren Mittelpunkt im Wesentlichen mit dem Kippmittelpunkt O zusammenfällt; dieser hohle äußere Bereich erstreckt sich um die Bezugsachse Z-Z auf beiden Seiten einer zu dieser Be-

zugsachse senkrechten Querebene, die durch den Kippmittelpunkt **O** verläuft. In **Fig. 17** ist der Verlauf dieser Querebene durch eine Achse X-X quer zur Bezugsachse Z-Z am Punkt **O** definiert.

**[0136]** Dieser hohle äußere Bereich **111** besteht wenigstens zum Teil aus einem ferromagnetischen Material von beliebigem bekanntem Typ.

**[0137]** Seine innere Oberfläche hat eine Symmetrieachse, die in den Zeichnungen nicht ausgewiesen ist, da sie, wenn dieser hohle äußere Bereich in Bezug auf den Kippmittelpunkt korrekt zentriert ist und eine verschwindende Kippneigung hat, mit der Bezugsachse Z-Z zusammenfällt.

**[0138]** Diese innere Oberfläche erstreckt sich winkelmäßig (bezogen auf den Kippmittelpunkt) bis zu zwei kreisrunden Polflächen **111B** und **111C**, die um diese Symmetrieachse zentriert und senkrecht zu dieser sind. Die Winkelamplitude dieser inneren Oberfläche ist vorteilhafterweise groß, wenigstens insgesamt  $50^\circ$ . Vorzugsweise haben die zwei vorgenannten Polflächen gleiche Radien.

**[0139]** Der innere Bereich **112** umfasst zwei getrennte Elemente **112A** und **112B**, die beiderseits der oben definierten Querebene angeordnet sind, wobei diese Elemente parallel zu der Bezugsachse durch einen Zwischenraum, mit **112C** bezeichnet, von hoher Reluktanz getrennt sind.

**[0140]** Jedes Element umfasst eine Mehrzahl von wenigstens drei um die Bezugsachse winkelvesetzten ferromagnetischen Zonen, wobei jede Zone mit der inneren Oberfläche **111A** des hohlen äußeren Bereiches **111** zwei Luftspalte bildet und mit wenigstens einer spezifischen Wicklung ausgestattet ist, die in der Lage ist, magnetische Flusslinien zu erzeugen, die sich über diese zwei Luftspalte schließen. Bei dem dargestellten Beispiel umfasst jede ferromagnetische Zone zwei parallel zur Bezugsachse versetzte Wicklungen, mit **113A** und **114A**, **113B** und **114B**, **113C** und **114C** bzw. **113D** und **114D** bezeichnet.

**[0141]** Bei dem in **Fig. 17** dargestellten Beispiel und wie sich aus den **Fig. 18** und **Fig. 19** ergibt, ist diese Mehrzahl von ferromagnetischen Zonen vorzugsweise durch zwei Paare von diametral gegenüberliegenden ferromagnetischen Zonen gebildet, die um die Bezugsachse um  $90^\circ$  winkelvesetzt sind (siehe auch **Fig. 34** und **Fig. 35**).

**[0142]** Genauer gesagt gibt es ein Paar von ferromagnetischen Zonen, das entlang der Zentrierachse X-X aus **Fig. 17** ausgerichtet ist, und ein Paar von ferromagnetischen Zonen, das dazu dient, die Zentrierung entlang einer in **Fig. 18** und **Fig. 19** mit Y-Y bezeichneten dritten Achse, senkrecht zu den vorgenannten Achsen X-X bzw. Z-Z, zu ermöglichen.

**[0143]** Jede ferromagnetische Zone jedes Elementes umfasst erste und zweite Vorsprünge oder Schenkel **115A** bis **115D** und **116A** bis **116D**, die gegen die innere Oberfläche **111A** des hohlen äußeren Bereiches gerichtet sind, um die Luftspalte dieser ferromagnetischen Zone zu bilden. Wenn die ferromagnetische Zone eine einzige Wicklung umfasst, ist diese vorteilhafterweise um einen dieser Vorsprünge gewickelt; da es aber beim dargestellten Beispiel zwei Wicklungen pro Zone gibt, ist jeder Vorsprung von einer dieser Wicklungen umgeben.

**[0144]** Genauer gesagt und wie sich aus den **Fig. 17** und **Fig. 19** ergibt, umfasst das obere Element **112A** (und in entsprechender Weise das untere Element **112B**) eine ringförmige Reihe von vier primären Vorsprüngen **115A**, **115B**, **115C** und **115D**, deren auf den Kippmittelpunkt **O** zentrierte Polflächen einen der Luftspalte jeder ferromagnetischen Zone definieren, und die von den Primärwicklungen **113A** bis **113D** umgeben sind, sowie, in einem Abstand von dieser ersten ringförmigen Reihe von vier Vorsprüngen, eine zweite, von den vier vorgenannten Vorsprüngen **116A** bis **116D** gebildete Reihe (als sekundäre Vorsprünge bezeichnet), deren Polflächen ebenfalls auf den Kippmittelpunkt zentriert sind und von anderen Wicklungen **114A** bis **114D** (als Sekundärwicklungen bezeichnet) umgeben sind.

**[0145]** Die Polflächen der diversen Vorsprünge sind vorzugsweise Abschnitte einer gleichen Kugeloberfläche, so dass alle Luftspalte eine gleiche Breite haben.

**[0146]** Die diversen ferromagnetischen Zonen jedes Elementes können getrennt sein. Aus Gründen der Einfachheit sind diese verschiedenen ferromagnetischen Zonen jedoch Teilbereiche eines gleichen ferromagnetischen Teiles (hier des gesamten Elementes **112A**).

**[0147]** Wie sich aus den **Fig. 17** und **Fig. 19** ergibt, sind die die ersten Vorsprünge umgebenden Wicklungen **113A** bis **113D** im Wesentlichen in Umfangsrichtung benachbart. Das gleiche gilt vorteilhafterweise für die anderen Wicklungen **114A** bis **114D**. Ferner sind diese zwei Reihen von Wicklungen selber benachbart. So ist der gesamte Zwischenraum zwischen den Vorsprüngen von den Wicklungen belegt.

**[0148]** In **Fig. 17** kann man erkennen, dass die spezifischen Wicklungen **113A** bis **113D** sich entlang eines zylindrischen Abschnittes des Elementes **112A** erstrecken. Selbstverständlich können diese spezifischen Wicklungen in einer einem Vieleck ähnlicheren Konfiguration angeordnet sein.

**[0149]** Jede der Wicklungen ist an eine Erregerschaltung angeschlossen, die schematisch mit dem Bezugszeichen **100** bezeichnet ist und eingerichtet

ist, um an jede dieser Wicklungen einen geeigneten Erregerstrom anzulegen.

**[0150]** Bei dem in **Fig. 17** dargestellten Beispiel ist der Zwischenraum **112C** zwischen den zwei Elementen **112A** und **112C** von einem Permanentmagneten mit hier nach oben orientierter axialer Magnetisierung belegt. Dieser Magnet hat eine solche Reluktanz, dass er verhindert, dass von der Gruppe von Wicklungen des einen oder anderen Elementes erzeugte Flusslinien durch diesen Zwischenraum fließen können.

**[0151]** Bei der in den **Fig. 28** bis **Fig. 33** dargestellten Variante kann der Zwischenraum **112C** frei und ohne Magnet sein, was im Wesentlichen auf einen Luftspalt von großer Breite hinausläuft, der die gewünschte Reluktanz hat. Selbstverständlich kann es eine vollständige Unabhängigkeit zwischen den Elementen **112A** und **112B** geben, wenn diese jeweils, das eine von unten, das andere von oben (durch jeweils einen der kreisrunden Ränder **1111B** oder **111C** hindurch) befestigt sind. Das oben Gesagte (Bestehen eines Luftspaltes mit sehr großer Reluktanz) bleibt jedoch gültig, wenn ein Verbindungsteil (in den erwähnten **Fig. 28** bis **Fig. 33** durch einen einfachen dicken Strich dargestellt) vorhanden ist, das zum festen Verbinden der Elemente **112A** und **112B** dient, vorausgesetzt, dass dieses Verbindungsteil eine ausreichende Reluktanz hat, um eine signifikante Zirkulation der von den Wicklungen erzeugten Flusslinien zu verhindern.

**[0152]** Der hohle äußere Bereich erstreckt sich winkelmäßig (gesehen vom Kippmittelpunkt aus) auf beiden Seiten der Querebene über wenigstens insgesamt  $50^\circ$ , was eine ganz erhebliche Winkelbewegungsfreiheit erlaubt.

**[0153]** Die zweiten Vorsprünge **116A** bis **116D** jedes Elementes haben Polflächen, die vorteilhafterweise global trapezförmige Abschnitte (siehe **Fig. 19**) einer gleichen, auf dem Kippmittelpunkt zentrierten Kugelfläche sind, und diese trapezförmigen Abschnitte haben eine Kante, die sehr nahe an der Bezugsachse liegt; die Wicklungen **114A** bis **114D** treffen an dieser Bezugsachse praktisch aufeinander. Vorzugsweise haben die anderen Vorsprünge **115A** bis **115D** Polflächen von global rechteckiger Form, die Abschnitte der gleichen Kugelfläche sind. Wenn die Polflächen aller Vorsprünge jedes Elementes Abschnitte einer gleichen Kugelfläche sind, sind normalerweise alle Luftspalte gleich, und der innere Bereich hat insgesamt die Form einer Kugel (siehe **Fig. 35**).

**[0154]** Die **Fig. 20** bis **Fig. 27** stellen die magnetischen Flusslinien oder die aus ihnen resultierenden Kräfte in den Luftspalten in diversen Erregungskonfigurationen der Wicklungen dar.

**[0155]** Um die Lesbarkeit der Figuren zu verbessern, sind bei den Wicklungen, die nur durch ihre Schnittflächen sichtbar sind, diese für jede einzelne Wicklung anders dargestellt.

**[0156]** So kann man z. B. in **Fig. 20** leicht zwei Paare von Wicklungen des oberen Elementes **112A** identifizieren, nämlich die diametral gegenüberliegenden Wicklungen **113A** und **114A** (links) und **113B** und **114B** (rechts). Per Konvention gibt ein Kreis mit einem Punkt darin nahe an der Schnittfläche einer Wicklung an, dass ein Strom in einer Richtung aus der Ebene der Zeichnung herausfließt, und ein Kreis mit einem Kreuz darin entspricht der entgegengesetzten Richtung.

**[0157]** Das oben Gesagte gilt für das untere Element **112B** (weil dies im betrachteten Beispiel die gleiche Geometrie hat und symmetrisch zum oberen Element bezogen auf die durch den Mittelpunkt **O** verlaufende Querebene angeordnet ist), die Wicklungen dieses unteren Elementes sind mit gleichen Bezugszeichen bezeichnet, wie die Wicklungen des oberen Elementes, allerdings unter Hinzufügung eines Apostrophs.

**[0158]** In **Fig. 20** sind vereinfacht die magnetischen Flusslinien gezeigt, die von dem Permanentmagneten erzeugt werden, der den Zwischenraum **112C** zwischen den Elementen **112A** und **112B** belegt.

**[0159]** Man erkennt, dass rechts und links in **Fig. 20** kleine Magnetkreise existieren, die die nahe an der Querebene liegenden Luftspalte, an den Vorsprüngen **115A** und **115B** im Fall des oberen Elementes, kreuzen, sowie größere Magnetkreise, die die äußeren Luftspalte kreuzen, die zwischen den äußeren ringförmigen Vorsprüngen **116A** und **116B** und dem hohlen äußeren Bereich gebildet sind.

**[0160]** Bekanntlich führt der Durchtritt von magnetischen Flusslinien durch einen Luftspalt zum Auftreten einer Kraft quer zu dem Luftspalt, deren Amplitude um so größer ist, je zahlreicher die den Luftspalt kreuzenden magnetischen Flusslinien sind. Wenn ein Luftspalt einen veränderlichen Querschnitt haben kann, so tritt außerdem in diesem Luftspalt eine tangentielle Kraft in einer Richtung auf, die auf eine Maximierung des Querschnittes dieses Luftspaltes hinwirkt.

**[0161]** Sofern die Luftspalte aller Vorsprünge gleich sind, was impliziert, dass die von diesen erzeugten magnetischen Flusslinien sich gleichförmig um die Bezugsachse verteilen, so versteht man, dass, wenn der hohle äußere Bereich korrekt in Bezug auf den Kippmittelpunkt **O** zentriert ist, der Durchgang von magnetischen Flusslinien durch die verschiedenen Luftspalte zum Auftreten von Kräften auf den hohlen äußeren Bereich an den Luftspalten führt, die sym-

metrisch sind, einerseits in Bezug auf die Bezugsachse und andererseits in Bezug auf die horizontale Querebene. Dies ist in **Fig. 21** durch eine Anordnung von Pfeilen dargestellt, die alle gegen den Kippmittelpunkt O korrigieren und als identisch schematisierte Beträge habe. Daraus resultiert für den hohlen äußeren Bereich eine resultierende Kraft mit verschwindender Amplitude: der hohle äußere Bereich bleibt an seinem Platz.

**[0162]** **Fig. 22** zeigt die durch die Luftspalte fließenden Flusslinien, wenn zwei Wicklungen (nahe an der Querebene und radial entgegengesetzt) eines jeden Elementes, die symmetrisch in Bezug auf die Querebene angeordnet sind, d. h. die mit **113A**, **113B** und **113A'** und **113B'** in **Fig. 17** bezeichneten Wicklungen, von der Erregerschaltung **100** aus **Fig. 17** versorgt werden, so dass im oberen Element Flusslinien erzeugt werden, die die näher an der Querebene liegenden Luftspalte in einer gleichen Richtung (hier nach links) kreuzen, und im unteren Element Flusslinien erzeugt werden, die zwei entsprechende Luftspalte in einer entgegengesetzten Richtung (im Beispiel der **Fig. 22** nach rechts) kreuzen. Sofern, wie oben angegeben, oberes und unteres Element massive Teile aus ferromagnetischem Material sind, können sich die von den erwähnten Windungen erzeugten Flusslinien, wie in **Fig. 22** gezeigt, zu einem einzigen großen Magnetkreis überlagern, der das obere Element nach links kreuzt, im hohlen äußeren Bereich nach unten verläuft, das untere Element nach rechts kreuzt und in dem gleichen hohlen äußeren Bereich wieder aufsteigt.

**[0163]** 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. 23** 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. 23** mit dem Bezugszeichen F1 bezeichnet ist. Die **Fig. 22** und **Fig. 23** entsprechen also einer Erregungsart der Wicklungen, mit der eine Zentrierung des hohlen äußeren Bereiches quer zur Bezugsachse entlang der Achse X-X der **Fig. 17** und **Fig. 18** erreicht werden kann. Man versteht leicht, dass durch Anlegen von Erregerströmen an die anderen Wicklungspaare, nämlich die entlang der Achse Y-Y der **Fig. 18** angeordneten, in ähnlicher Weise eine Querzentrierungskraft 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.

**[0164]** **Fig. 24** entspricht einem anderen Beispiel für die Erregung der Wicklungen, bei dem zwei sekundäre Wicklungen **114A** und **114B** bzw. **114A'** und **114B'** jedes Elementes symmetrisch in Bezug auf die Bezugsachse und in Bezug auf die Querebene erregt werden, so dass die Flusslinien aus jedem Element über die sekundären Luftspalte (die weiter von der Querebene entfernt) austreten. Man erkennt, dass es zu einer globalen Erhöhung des Magnetflusses durch die oberen sekundären Luftspalte und zu einer Verringerung des Flusses in den unteren sekundären Luftspalten kommt; entsprechend gibt es eine Verringerung des Flusses in den primären Luftspalten des oberen Elementes, aber eine Erhöhung der Flusslinien durch die primären Luftspalte des unteren Elementes. Da im oberen Element die Luftspalte, in denen das Maximum an magnetischen Flusslinien fließt, weniger 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 auf. Die in den sekundären Luftspalten (den weiter von der Querebene entfernten) auftretenden tangentialen Kräfte sind stärker im oberen als im unteren Element, doch die daraus resultierende, nach oben gerichtete Gesamtkraft ist schwach im Verhältnis zur vorgenannten Resultierenden der Kräfte quer zu den Luftspalten. Aus der Gesamtheit der Querkräfte und Tangentialkräfte resultiert also eine mit dem Pfeil F2 bezeichnete, nach unten gerichtete vertikale Kraft. Die **Fig. 24** und **Fig. 25** entsprechen also dem Fall einer Erregung der Spulen, der einer Zentrierung des hohlen äußeren Bereiches parallel zur Bezugsachse entspricht.

**[0165]** Um die Zentrierkraft parallel zur Bezugsachse zu erhöhen, kann man alle Sekundärwicklungen jedes Elementes (und nicht nur eines Paares von ihnen) erregen.

**[0166]** Wie man leicht sieht, kann man durch Umkehren der Richtung der Erregerströme in den Sekundärwicklungen eine umgekehrt gerichtete Zentrierkraft erhalten.

**[0167]** Wenn es um eine Zentrierung parallel zur Querebene geht, werden bei dem Beispiel der **Fig. 22** nur die Primärwicklungen elektrisch versorgt. Es ist allerdings möglich, die gleiche Zentrierung nur durch Erregen der Sekundärwicklungen zu steuern.

**[0168]** Bei einer Zentrierung parallel zur Bezugsachse kann es genauso sein, weil mit den in **Fig. 24** dargestellten Flusslinien identische Flusslinien erhal-

ten werden können, indem nicht die Sekundärwicklungen sondern die Primärwicklungen erregt werden.

**[0169]** Es können also Zentrierkräfte entlang einer beliebigen der drei Achsen X-X, Y-Y, Z-Z mit einer einzigen Wicklung pro ferromagnetischer Zone erhalten werden. Es versteht sich jedoch, dass das Vorhandensein der zwei Wicklungen pro Zone eine sehr einfache Steuerung der Zentrierung entlang der Achse Z-Z erlaubt.

**[0170]** 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 Elemente zwei Paare von einander bezogen auf die Bezugsachse gegenüberliegend angeordneten Wicklungen aufweist, wobei diese Paare um 90° gegeneinander winkelfersetzt sind.

**[0171]** 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.

**[0172]** **Fig. 26** zeigt eine andere Erregungskonfiguration der Wicklungen, bei der zwei Sekundärwicklungen **114A** und **114B** des oberen Elementes erregt werden, um in den sekundären Luftspalten nach rechts gerichtete Flüsse zu erzeugen und zwei Sekundärwicklungen des unteren Elementes erregt werden, um in den unteren sekundären Luftspalten einen nach links gerichteten Fluss zu erzeugen.

**[0173]** Daraus resultiert, dass die Flüsse im rechten oberen sekundären Luftspalt, im linken oberen primären Luftspalt, im rechten unteren primären Luftspalt und im linken sekundären unteren Luftspalt zunehmen, wohingegen die Flüsse in den anderen Luftspalten (in der gleichen durch die Bezugsachse verlaufenden Ebene) abnehmen. Die Resultierende der sich daraus ergebenden Kräfte durch die Luftspalte hindurch (zum Kippmittelpunkt hin) ist Null. Die Neigung, den Querschnitt der Sekundärluftspalte zu vergrößern, ist maximal im rechten oberen sekundären Luftspalt und im linken unteren Luftspalt, und ist minimal in den anderen sekundären Luftspalten: man erkennt, dass daraus ein Drehmoment C3 mit nichtverschwindender Amplitude resultiert, das einer Drehung im Gegenuhrzeigersinn entspricht. Die **Fig. 26** und **Fig. 27** entsprechen also einer Kippsteuerungskonfiguration.

**[0174]** Wie zuvor ist es möglich, die für diese Kippbewegung notwendigen Flusslinien durch Erregen

der Primärwicklungen zu steuern, insbesondere, wenn die ferromagnetischen Zonen voneinander magnetisch isoliert sind. Es liegt jedoch auf der Hand, dass die Entscheidung, die Sekundärwicklungen zu erregen, eine bessere Steuerung der Flusslinien durch die Sekundärluftspalte und damit der Kippsteuerung erlaubt. Es bleibt allerdings möglich, nur eine einzige Wicklung pro ferromagnetischer Zone zu verwenden, um sowohl Zentrierkräfte als auch Kippsteuerkräfte zu erzeugen.

**[0175]** Die **Fig. 28** bis **Fig. 33** zeigen Varianten der **Fig. 22** bis **Fig. 27**.

**[0176]** Unter dem strukturellen Gesichtspunkt ist das in den **Fig. 28** bis **Fig. 33** dargestellte Magnetlager einfacher als das in den vorhergehenden Figuren dargestellte, weil der Zwischenraum zwischen unterem und oberem 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.

**[0177]** Wie noch deutlich werden wird, zeigen diese **Fig. 28** bis **Fig. 33**, 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. 22** bis **Fig. 27** beschrieben.

**[0178]** So sind im Beispiel von **Fig. 28** zwei spezifische Wicklungen jedes Elementes aktiviert, nämlich die in **Fig. 20** mit **113A** oder **113A'** bezeichnete linke Primärwicklung und die Sekundärwicklung **114A** oder **114A'**. Diese Wicklungen werden hier elektrisch versorgt, um Flusslinien zu erzeugen, die Luftspalte innerhalb jeder der einzelnen ferromagnetischen Zonen kreuzen, an denen die zwei erwähnten Wicklungen teilhaben, wobei die Magnetflusskreise hier in Bezug auf die Querebene zueinander symmetrisch sind. Wie sich aus **Fig. 29** ergibt, führt dies in den linken Luftspalten zum Auftreten von auf den Kippmittelpunkt zentrierten Kräften (und von ebenfalls nach rechts gerichteten tangentialen Kräften), wohingegen in dem rechten Bereich, in dem kein Fluss in den Luftspalten auftritt, es keine auf den Kippmittelpunkt hin oder entgegengerichtete Kraft gibt. Aufgrund der symmetrischen Konfiguration der Luftspalte beiderseits der Querebene führt dies zu einer zur Querebene parallelen, nach rechts gerichteten Kraft, mit dem Bezugszeichen F'1 bezeichnet. Es genügt also, vier gut ausgewählte spezifische Wicklungen zu aktivieren, um eine Zentrierung des hohlen äußeren Bereiches entlang einer zur Bezugsachse Z-Z transversalen Achse zu gewährleisten.

**[0179]** In **Fig. 30** werden die sekundären Wicklungen eines einzigen Elementes, nämlich des oberen Elementes, elektrisch aktiviert, was zum Auftreten

von Flusslinien ausschließlich in den Luftspalten des oberen Elementes führt. Daraus resultieren, wie sich aus **Fig. 31** ergibt, am Ort der Luftspalte dieses oberen Elementes zum Kippmittelpunkt hin wirkende Kräfte. Dies führt zu einer zur Bezugsachse Z-Z parallelen, nach unten gerichteten vertikalen resultierenden Kraft  $F'2$  (die Resultierende der tangentialen Kräfte, die eine vertikale Komponente nach oben hat, ist wesentlich kleiner als die der radialen Kräfte).

**[0180]** Wie bereits bei den **Fig. 24** und **Fig. 25** angemerkt, ist es möglich, diesen Effekt der Zentrierung parallel zur Bezugsachse durch Aktivieren von zwei oder auch von allen Wicklungen eines der Elemente zu erzielen.

**[0181]** Selbstverständlich ist es einfach, wenn gewünscht, starke Zentrierkräfte parallel zur Bezugsachse durch gleichzeitiges Aktivieren sowohl der Primär- als auch der Sekundärwicklungen des einen ferromagnetischen Elementes oder von beiden zu erzeugen.

**[0182]** Im Unterschied zu **Fig. 26** impliziert das elektrische Erregungsmuster der **Fig. 32** die Erregung der Primär- und Sekundärwicklungen von zwei einander in Bezug auf den Kippmittelpunkt gegenüberliegenden ferromagnetischen Zonen, so dass jede Wicklung Flusslinien erzeugt, die durch die sekundären Luftspalte dieser zwei Zonen austreten, was zu einem Drehmoment  $C'3$  führt.

**[0183]** Auch hier versteht sich, dass es möglich ist, ein solches Muster der Zirkulation von Flusslinien mit einer einzigen Wicklung pro ferromagnetischer Zone zu erzielen.

### Patentansprüche

1. Magnetlager für die Zentrierung eines innerhalb einer Winkelbewegungsfreiheit von wenigstens  $5^\circ$  um einen Kippmittelpunkt (O) kippbeweglichen ersten Körpers (A) in Bezug auf einen zweiten Körper (B) mit einer Bezugsachse (Z-Z) und einer dazu senkrechten Bezugsquerebene (X-X, Y-Y), die durch den Kippmittelpunkt verlaufen, mit

- einem hohlen äußeren Bereich (11, 111), der mit dem ersten Körper (A) fest verbunden ist und eine innere Oberfläche (11A, 111A) hat, deren Form ein Abschnitt einer Kugelfläche ist, deren Mittelpunkt im Wesentlichen mit dem Kippmittelpunkt (O) zusammenfällt, und der sich um eine bewegliche zweite Achse, die eine körpereigene Bezugsachse des ersten Körpers (A) ist und eine verschwindende Neigung im Bezug auf die Bezugsachse (Z-Z) aufweist, beiderseits der senkrecht zur Bezugsachse (Z-Z) verlaufenden Bezugsquerebene (X-X, Y-Y) erstreckt, wobei der hohle äußere Bereich (11, 111) wenigstens zum Teil aus einem ferromagnetischen Material besteht,
- einem mit dem zweiten Körper (B) fest verbundenen

inneren Bereich (12, 112), der zwei getrennte Elemente (12A, 12B, 112A, 112B) umfasst, die beiderseits der Bezugsquerebene (X-X, Y-Y) angeordnet sind und jeweils eine Mehrzahl von wenigstens drei um die Bezugsachse (Z-Z) gegeneinander winkelversetzten ferromagnetischen Zonen aufweisen, wobei die ferromagnetischen Zonen jedes Elementes Bestandteil eines gleichen ferromagnetischen Teiles (12A, 12B) sind und wobei jede Zone an radialen Abschnitten (14A bis 14D, 15; 115A bis 115D, 116A bis 116D) mit der inneren Oberfläche des hohlen äußeren Bereiches (11, 111) zwei bezogen auf die Bezugsachse (Z-Z) axial versetzte Luftspalte bildet und mit einer spezifischen Wicklung (13A, 13B, 13C, 13D, 113A, 113B, 113C, 113D) zum Erzeugen magnetischer Flusslinien versehen ist, die sich über die zwei Luftspalte schließen, wobei jedes der getrennten Elemente (12A, 12B, 112A, 112B) eine Wicklungsgruppe aufweist, die zumindest die spezifischen Wicklungen der ferromagnetischen Zonen umfasst, wobei die getrennten Elemente (12A, 12B, 112A, 112B) parallel zur Bezugsachse (Z-Z) durch einen Zwischenraum (12C, 112C) getrennt sind, der eine Reluktanz aufweist, die verhindert, dass von der Gruppe von Wicklungen erzeugte Flusslinien durch den Zwischenraum (12C, 112C) fließen können, – und einer Erregerschaltung (100) zum selektiven Einstellen der Erregerströme jeder der Wicklungen der Gruppe von Wicklungen jedes Elementes.

2. Lager nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Zwischenraum (12C) von einem Permanentmagneten belegt ist, dessen Permanentmagnetisierung parallel zu der Bezugsachse (Z-Z) orientiert ist.

3. Lager nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Zwischenraum (126) ein freier Zwischenraum ist, der einen ortsfesten Luftspalt bildet.

4. Lager nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die ferromagnetischen Zonen der zwei getrennten Elementen (12A, 12B, 112A, 112B) im Bezug auf die Bezugsquerebene (X-X, Y-Y) symmetrisch sind.

5. Lager nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Mehrzahl der ferromagnetischen Zonen jedes der getrennten Elemente vier ferromagnetische Zonen umfasst, die in zwei Paare von in Bezug auf die Bezugsachse (Z-Z) diametral gegenüberliegenden und um  $90^\circ$  versetzten Zonen aufgeteilt sind.

6. Lager nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass der hohle äußere Bereich (11, 111) eine Winkelamplitude von wenigstens  $50^\circ$  in Bezug auf die zu der Bezugsachse (Z-Z) senkrechte Bezugsquerebene (X-X, Y-Y) hat.

7. Lager nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass jede ferromagnetische Zone jedes getrennten Elementes als radiale Abschnitte erste und zweite Vorsprünge (**14A**, **14B**, **14C**, **14D**; **15**; **115A**, **115B**, **115C**, **115D**, **116A**, **116B**, **116C**, **116D**) umfasst, die gegen die innere Oberfläche (**11A**, **111A**) des hohlen äußeren Bereiches (**11**, **111**) gerichtet sind, um die Luftspalte dieser Zone zu bilden, wobei einer dieser Vorsprünge von der spezifischen Wicklung umgeben ist.

8. Lager nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass die von jedem getrennten Element getragenen spezifischen Wicklungen einander wenigstens in Umfangsrichtung benachbart sind.

9. Lager nach Anspruch 7 oder 8, dadurch gekennzeichnet, dass die ersten und zweiten Vorsprünge der ferromagnetischen Zonen eines gleichen Elementes jeweils eine Polfläche haben, deren Form ein Abschnitt einer gleichen, auf den Kippmittelpunkt (O) zentrierten Kugelfläche ist.

10. Lager nach einem der Ansprüche 7 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass die ersten und zweiten Vorsprünge der Gesamtheit der zwei getrennten Elemente Ränder haben, die Abschnitte einer gleichen, auf den Kippmittelpunkt (O) zentrierten Kugelfläche sind, wobei alle Luftspalten gleiche Breite haben.

11. Lager nach einem der Ansprüche 7 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass:

- der hohle äußere Bereich (**111**) sich um die bewegliche zweite Achse bis hin zu zwei um diese zweite Achse zentrierte kreisrunde Ränder erstreckt, wenigstens in der Nähe dieser Ränder aus einem ferromagnetischen Material hergestellt ist und Polflächen (**111B**, **111C**) bilden,
- der erste Vorsprung jeder Zone des inneren Bereiches vollständig der inneren Oberfläche (**111A**) des hohlen äußeren Bereiches (**111**) gegenüberliegend angeordnet ist, unabhängig von der Kippneigung dieses hohlen äußeren Bereiches im Bezug auf den inneren Bereich innerhalb der Kipp-Winkelbewegungsfreiheit, wohingegen der zweite Vorsprung (**116A**, **116B**, **116C**, **116D**) in der Nähe einer der kreisrunden Polflächen (**111B**, **111C**) des hohlen äußeren Bereiches (**111**) angeordnet ist, so dass er dieser äußeren Oberfläche nur teilweise gegenüberliegt, mit einem von der Neigung der beweglichen zweiten Achse in Bezug zur Bezugsachse (Z-Z) des zweiten Körpers (B) abhängigen Anteil.

12. Lager nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass jede ferromagnetische Zone zwei spezifische Wicklungen umfasst, die jeweils um den ersten oder zweiten Vorsprung gewickelt sind.

13. Lager nach Anspruch 11 oder 12, dadurch

gekennzeichnet, dass die zweiten Vorsprünge der ferromagnetischen Zonen eines gleichen Elementes jeweils eine Polfläche haben, deren Form ein trapezförmiger Abschnitt einer auf den Kippmittelpunkt (O) zentrierten gleichen Kugelfläche ist, wobei jeder dieser trapezförmigen Abschnitte eine nahe an der Bezugsachse (Z-Z) liegende Kante hat.

14. Lager nach einem der Ansprüche 11 bis 13, dadurch gekennzeichnet, dass die Mehrzahlen von zweiten Vorsprüngen der zwei Elemente in Bezug auf die Bezugsquerebene (X-X, Y-Y) symmetrisch sind und dass die zwei kreisrunden Ränder der inneren Oberfläche (**111A**) des hohlen äußeren Bereiches (**111**) gleiche Radien haben.

15. Lager nach einem der Ansprüche 6 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass die ersten und zweiten Vorsprünge (**14A**, **14B**, **14C**, **14D**) der Zonen des äußeren Bereiches vollständig gegenüber der inneren Oberfläche des hohlen äußeren Bereiches (**11**) angeordnet sind, unabhängig von der Kippneigung dieses hohlen äußeren Bereiches in Bezug auf den inneren Bereich innerhalb der Bewegungsfreiheit.

16. Lager nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorsprünge der ferromagnetischen Zonen eines gleichen Elementes Teil eines gleichen, um die Bezugsachse (Z-Z) zentrierten ringförmigen Vorsprunges (**15**) sind.

17. Lager nach Anspruch 15 oder 16, dadurch gekennzeichnet, dass die Gruppe von Wicklungen jedes getrennten Elementes ferner eine zusätzliche Wicklung (**16**, **16'**) umfasst, die das getrennte Element zwischen seinen ersten und zweiten Vorsprüngen der ferromagnetischen Zonen umgibt, wobei die Gruppe von Wicklungen an eine Erregerschaltung (**100**) angeschlossen ist, die selektiv Erregerströme an die spezifischen und/oder zusätzlichen Wicklungen der Elemente anlegt und in den Luftspalten Magnetfelder erzeugt, durch die auf den hohlen äußeren Bereich Zentrierkräfte parallel zur Bezugsachse (Z-Z) ausgeübt werden.

18. Lager nach einem der Ansprüche 15 bis 17, dadurch gekennzeichnet, dass es ferner außerhalb des hohlen äußeren Bereiches aufweist:

- zwei Kränze mit permanenter Magnetisierung (**21**, **22**), die von einem mit dem hohlen äußeren Bereich fest verbundenen ersten ferromagnetischen Anker (**23**) getragen sind, die die Bezugsachse (Z-Z) umgeben und dabei jeweils eine Orientierung der Magnetisierung haben, die an jedem Punkt im Wesentlichen durch die Bezugsachse verläuft, wobei diese Kränze parallel sind und parallel zu der Bezugsachse (Z-Z) beiderseits des Kippmittelpunktes (O) parallel versetzt sind und freie Polflächen haben, die Abschnitte einer gleichen, auf den Kippmittelpunkt (O) zentrierten Kugelfläche bilden,

– eine ringförmige Mehrzahl von Kippwicklungen (24A, 24B, 24C, 24D), die mit dem inneren Bereich (12) fest verbunden sind und jeweils zwei Gruppen von umlaufenden Adern (24A1, 24A3) aufweisen, 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 von wenigstens 5° gegenüber zu liegen, wobei diese Wicklungen von einem zweiten ferromagnetischen Anker (25) getragen sind, der mit den magnetisierten Kränzen Luftspalte (26, 27) bildet, deren Breite über die gesamte Kipp-Winkelbewegungsfreiheit konstant bleibt.

19. Lager nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, dass die Kränze (21, 22) Magnetisierungsrichtungen haben, die an jedem Punkt durch den Kippmittelpunkt (O) verlaufen.

20. Lager nach Anspruch 18 oder 19, dadurch gekennzeichnet, dass die zwei Kränze gleiche Durchmesser haben und symmetrisch zueinander in Bezug auf den Kippmittelpunkt (O) sind, und dass die Kippwicklungen jeweils bezogen auf die Bezugsquelebene (X-X, Y-Y) symmetrisch sind.

21. Lager nach einem der Ansprüche 18 bis 20, dadurch gekennzeichnet, dass die zwei Kränze in einer die Bezugsachse (Z-Z) enthaltenden Ebene einen Abstand haben, der bezogen auf den Kippmittelpunkt einem Winkelversatz von wenigstens 10° entspricht.

22. Lager nach einem der Ansprüche 18 bis 21, dadurch gekennzeichnet, dass die umlaufenden Adern (24A1, 24A3) jeder Gruppe einer jeden Wicklung auf einer auf den Kippmittelpunkt zentrierten Kugeloberfläche eines zweiten Ankers (25) benachbart angeordnet sind.

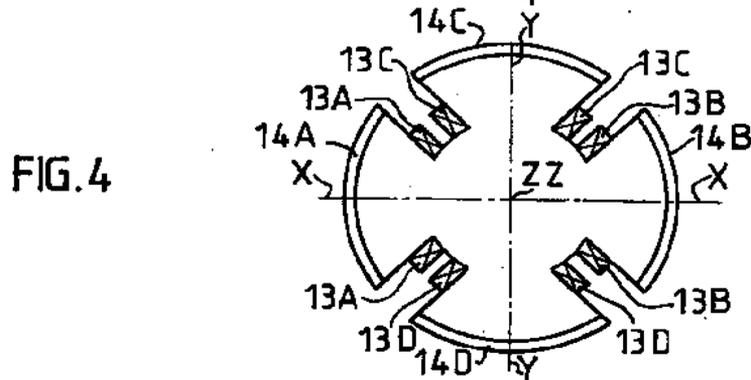
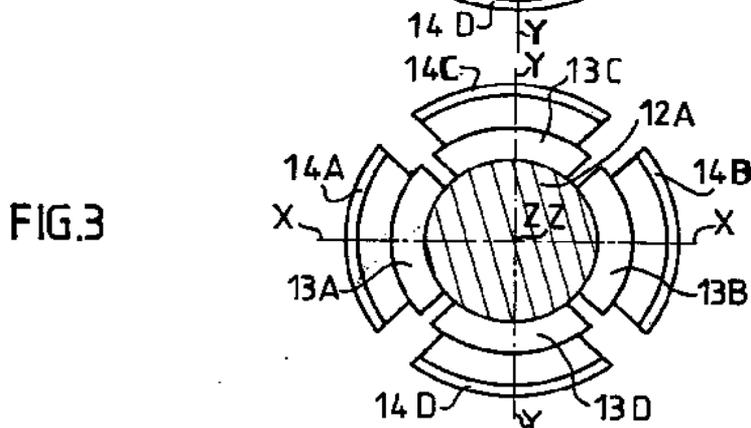
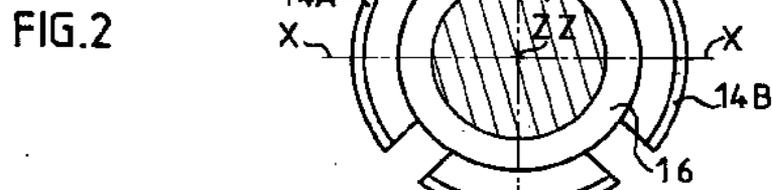
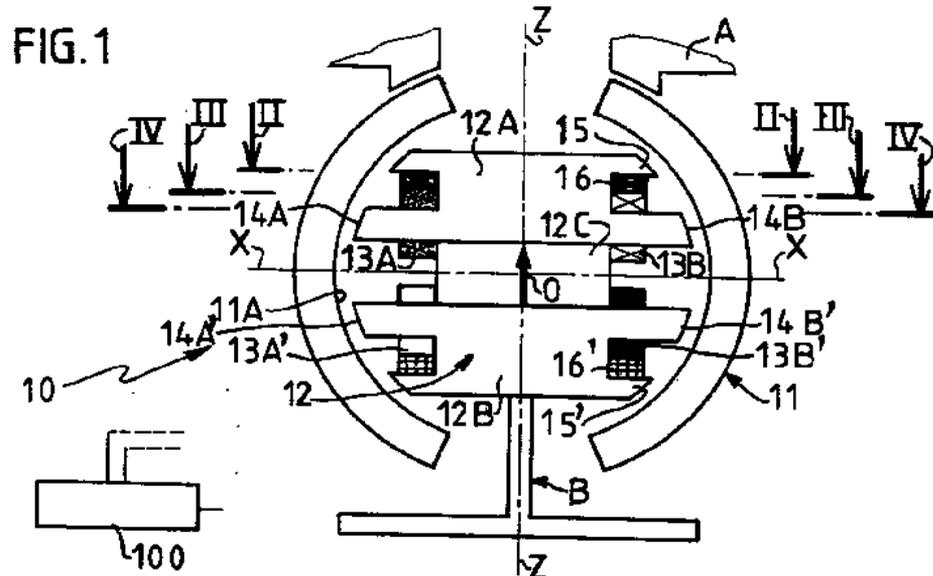
23. Lager nach einem der Ansprüche 18 bis 22, dadurch gekennzeichnet, dass die Kränze in einer durch die Bezugsachse (Z-Z) verlaufenden Ebene eine größere Winkelamplitude als die jeder Gruppe von umlaufenden Adern jeder Wicklung haben.

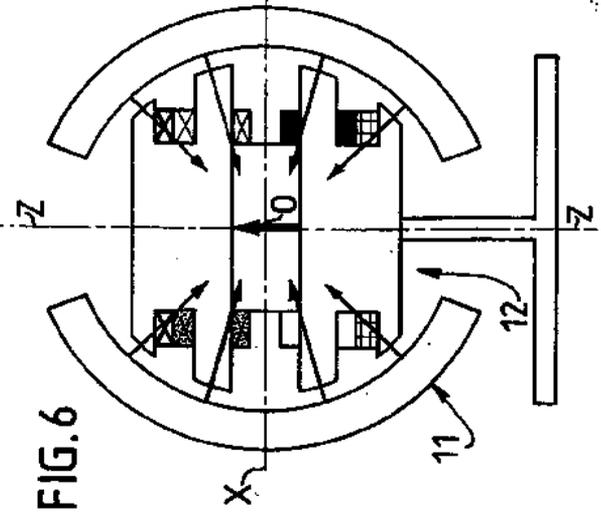
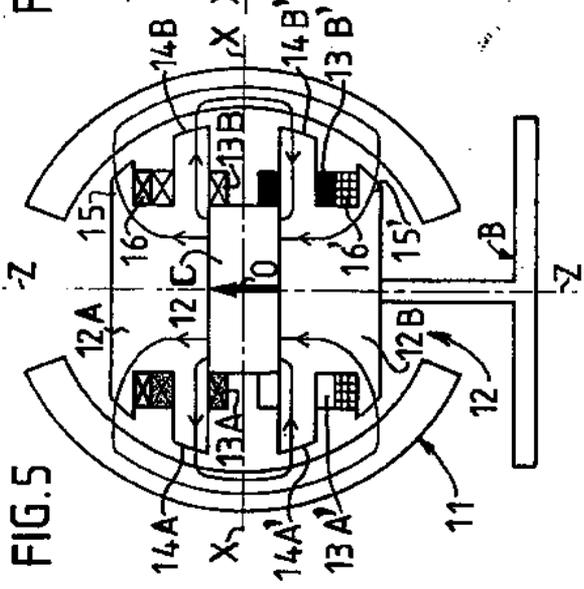
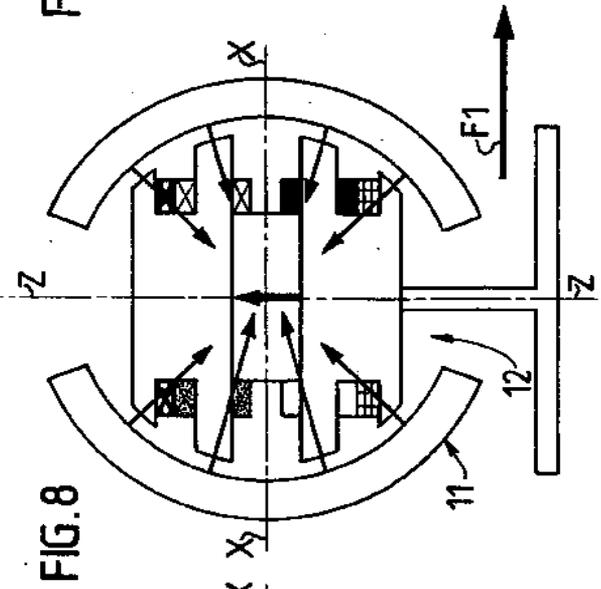
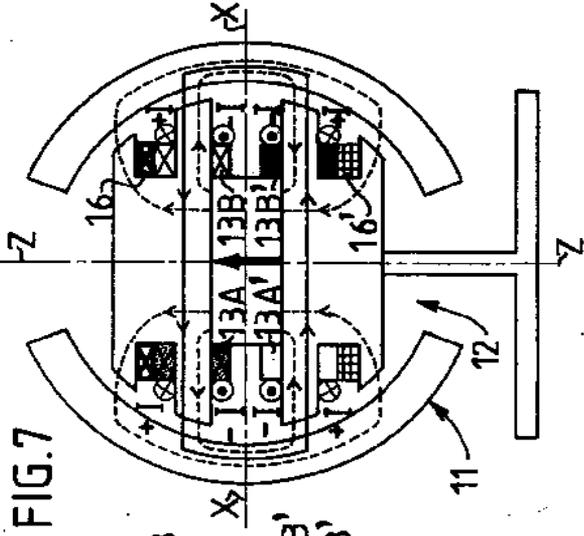
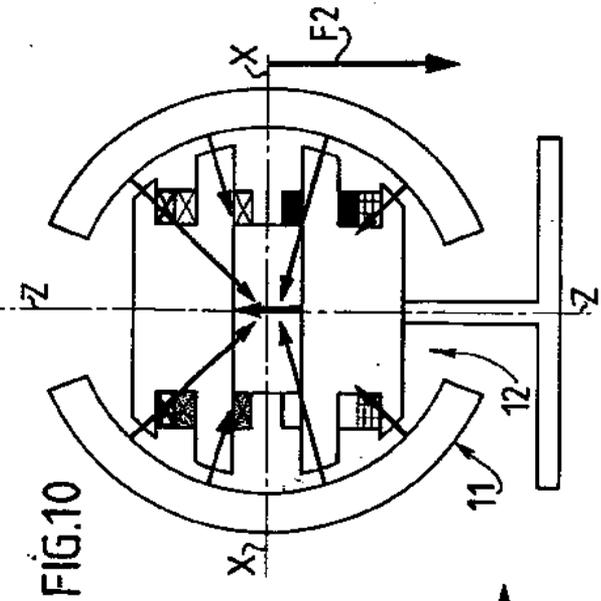
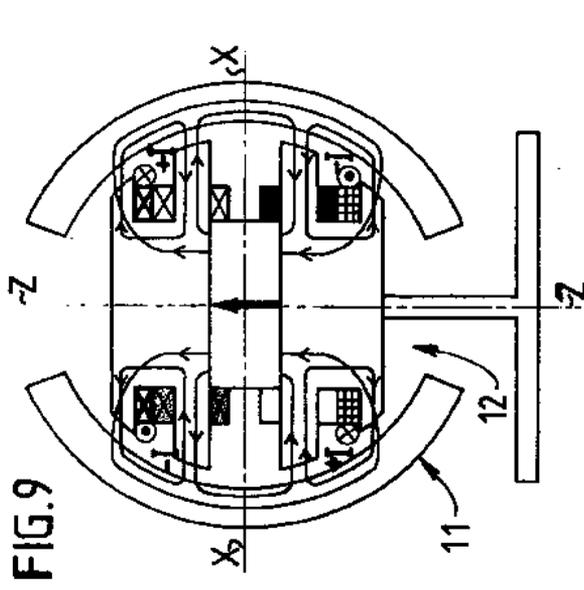
24. Lager nach einem der Ansprüche 18 bis 22, dadurch gekennzeichnet, dass die Kränze in einer durch die Bezugsachse (Z-Z) verlaufenden Ebene eine kleinere Winkelamplitude als die jeder Gruppe von umlaufenden Adern jeder Wicklung haben.

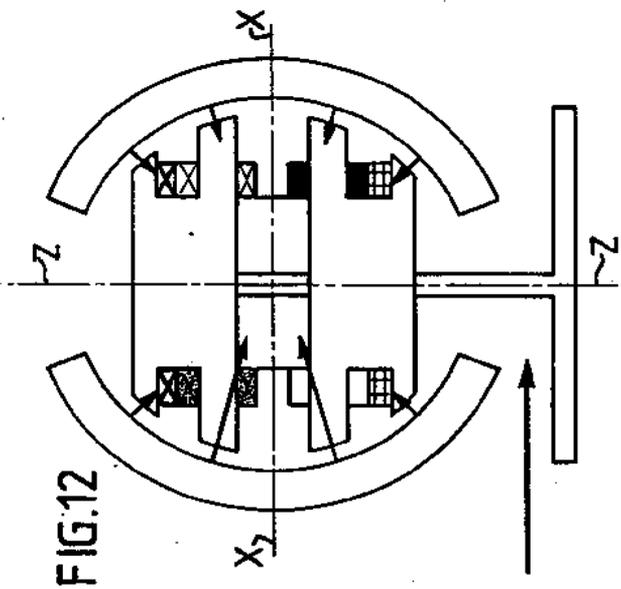
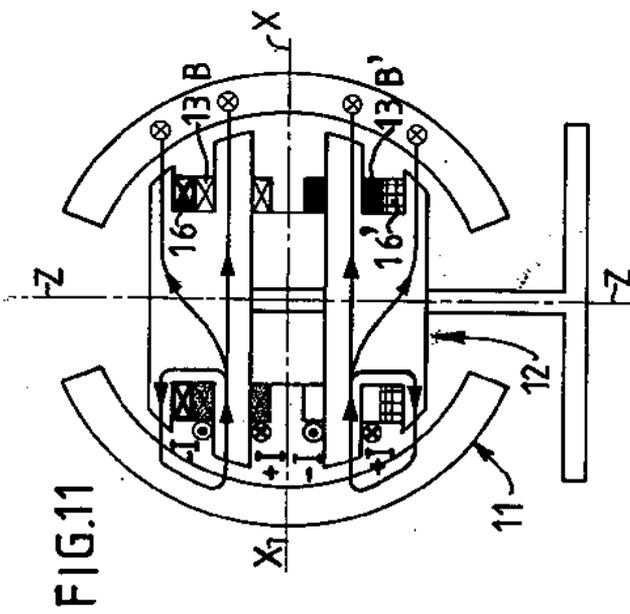
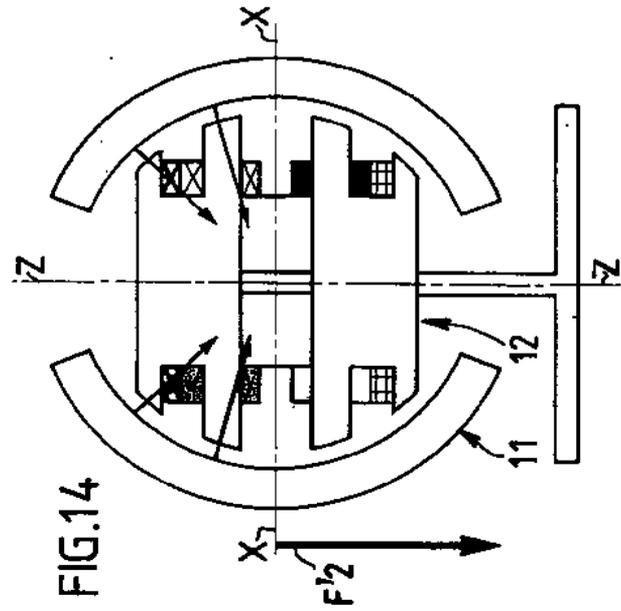
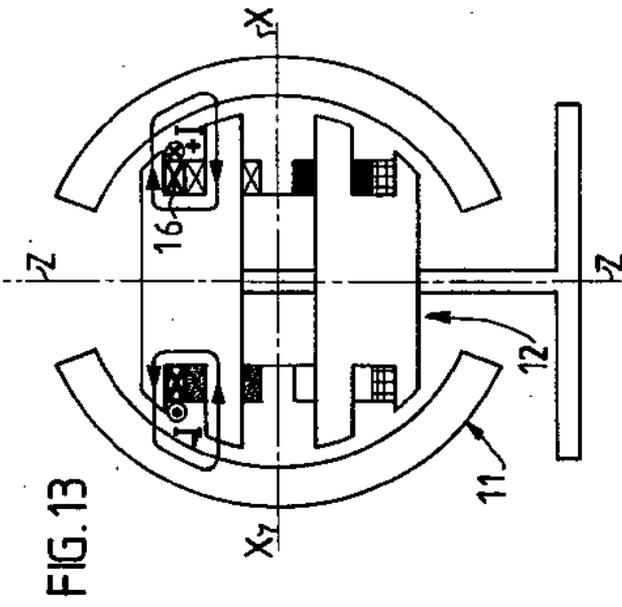
25. Lager nach einem der Ansprüche 18 bis 24, dadurch gekennzeichnet, dass der zweite Anker (25) radial zwischen dem hohlen äußeren Bereich (11) und dem ersten Anker (23) angeordnet ist.

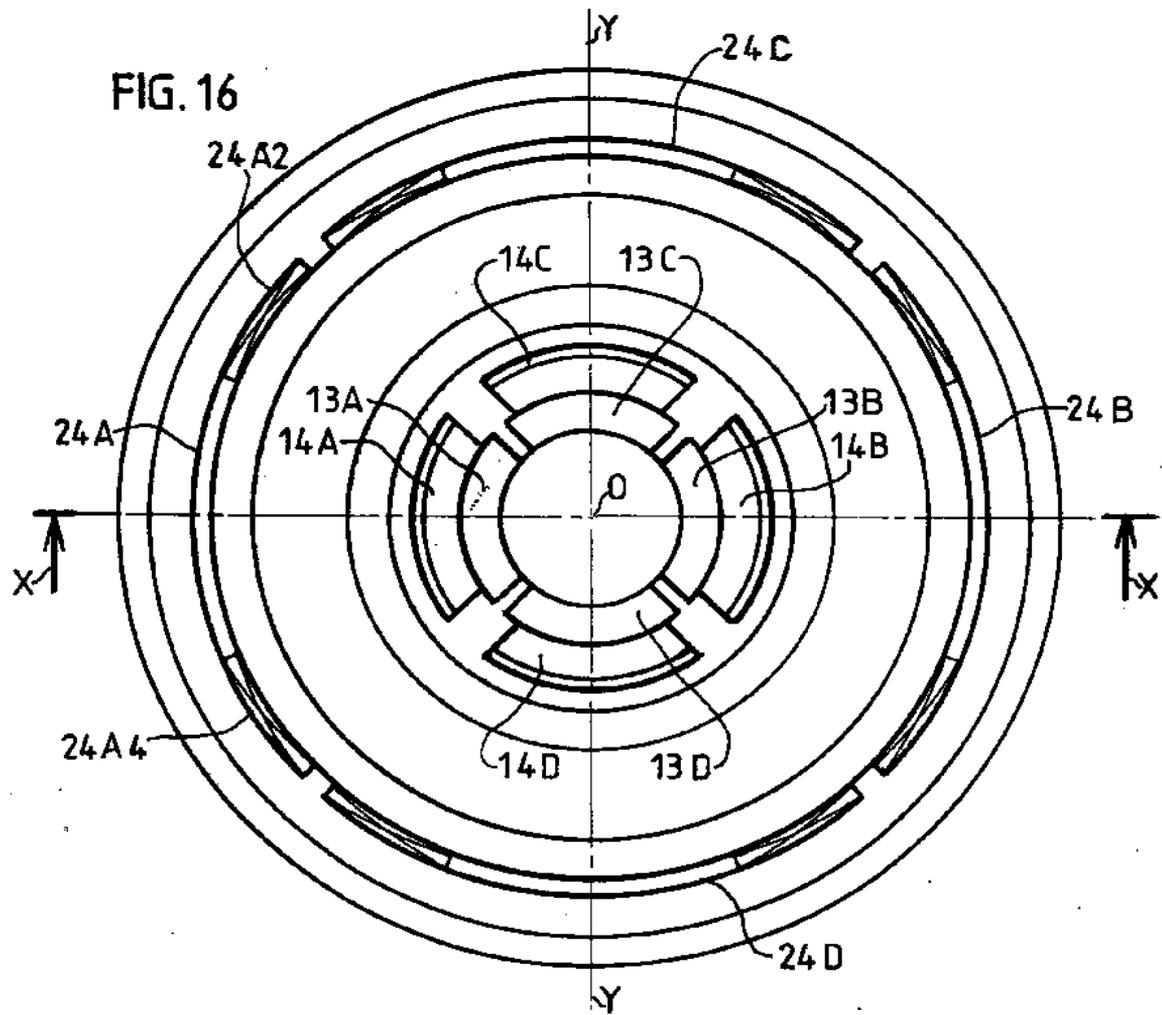
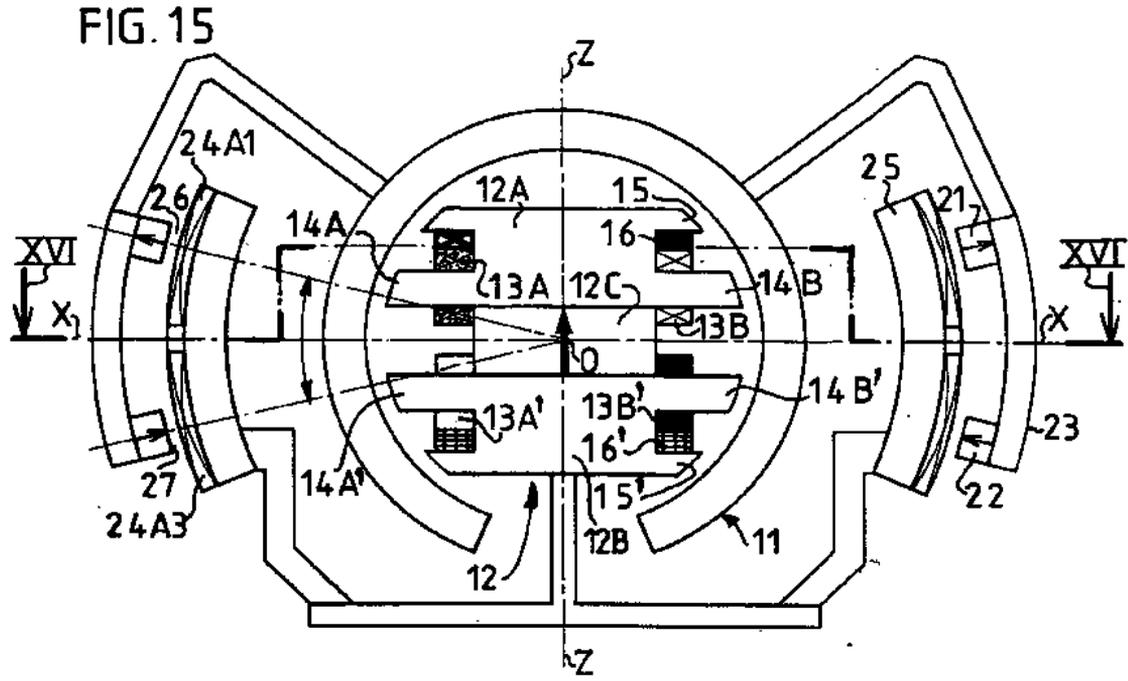
Es folgen 8 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen









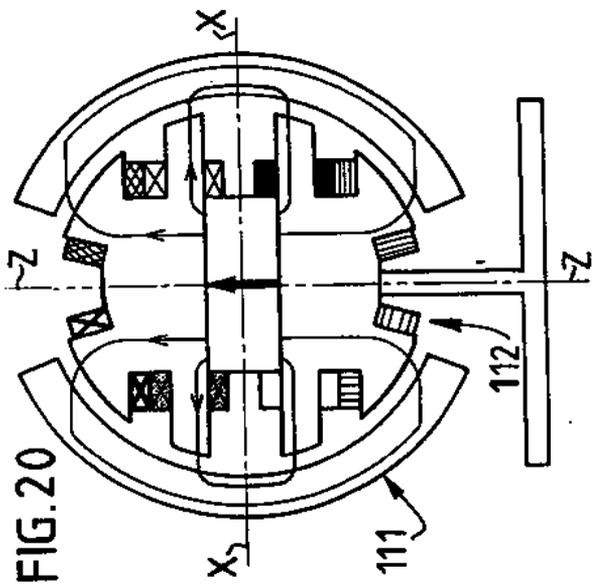


FIG. 20

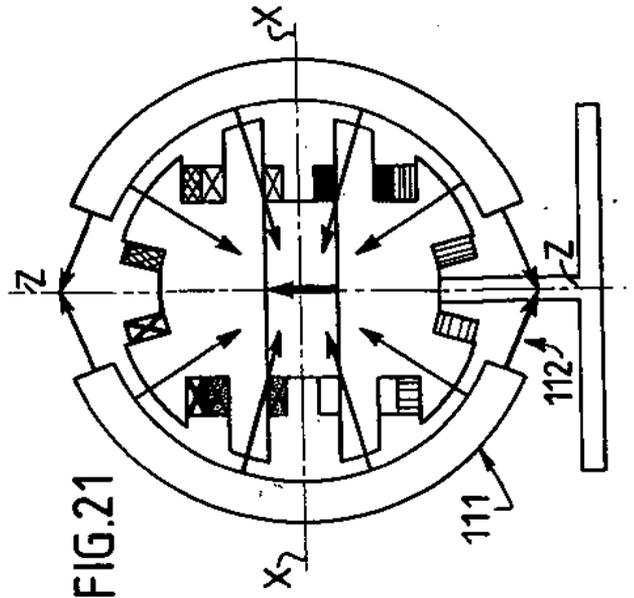


FIG. 21

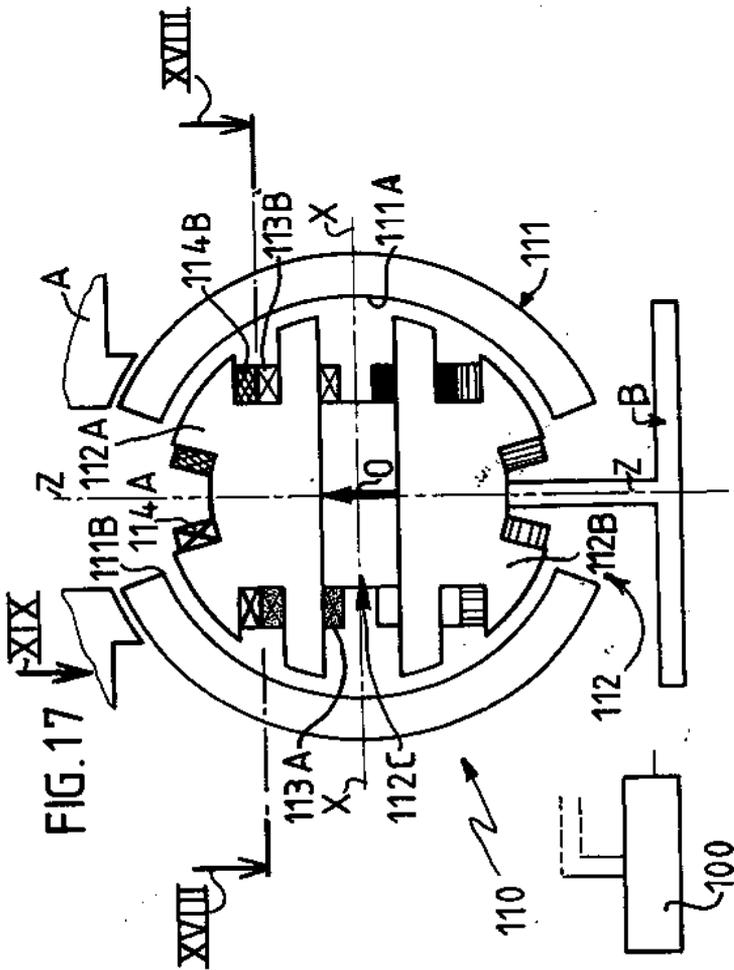


FIG. 17

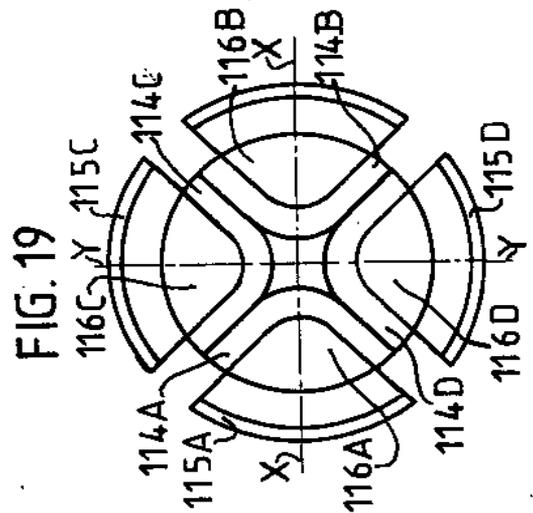


FIG. 19

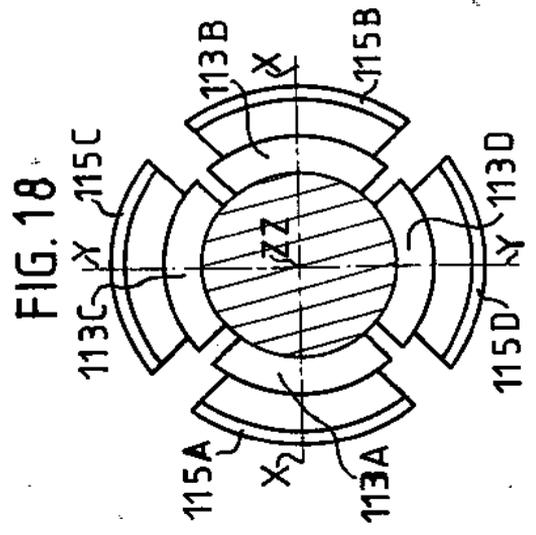
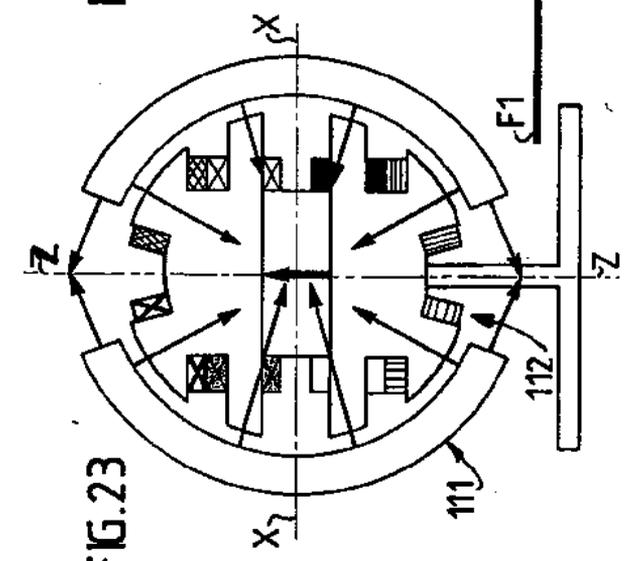
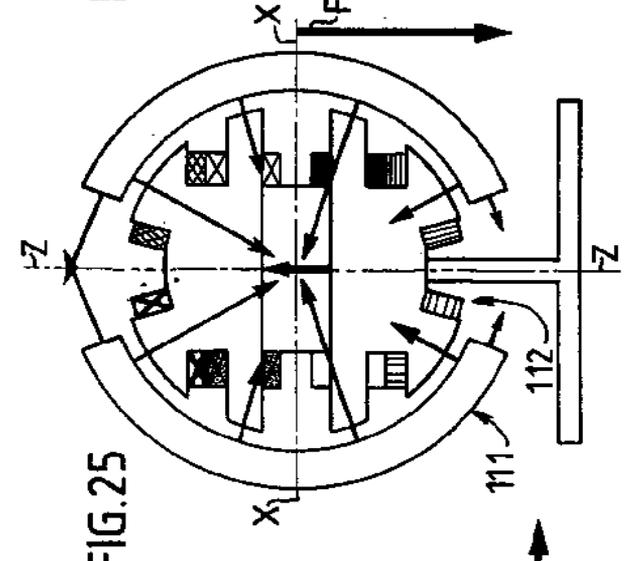
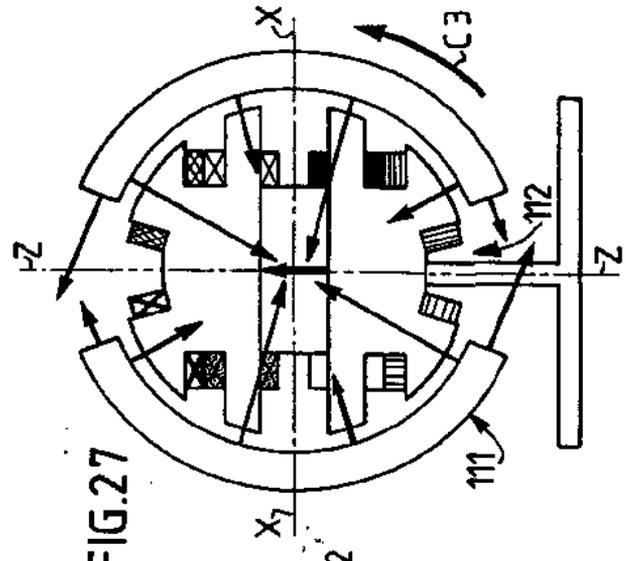
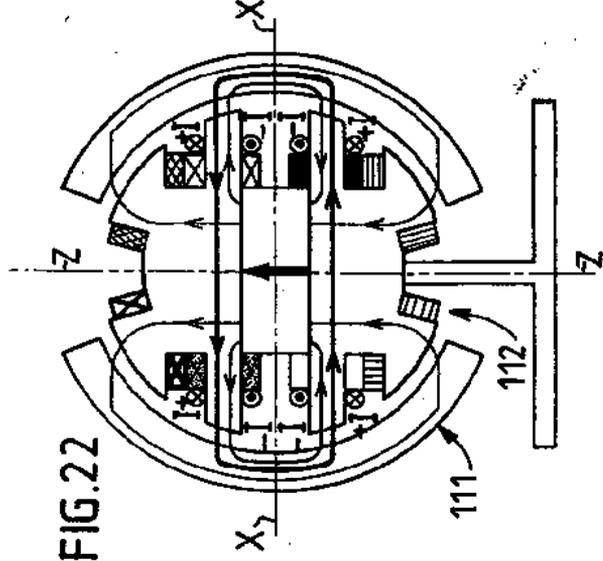
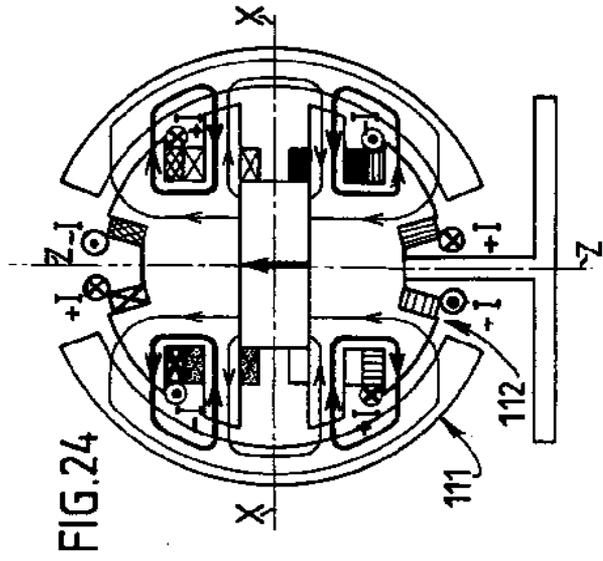
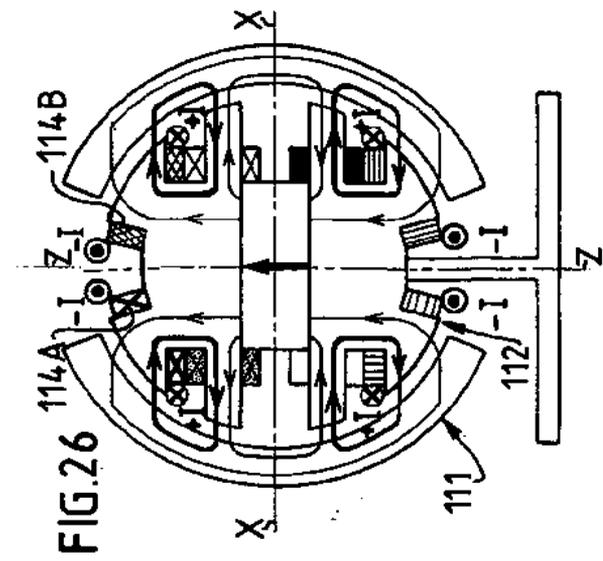


FIG. 18



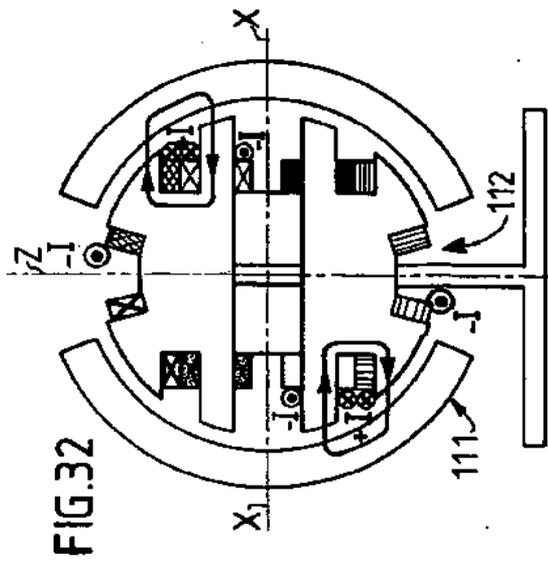


FIG. 28

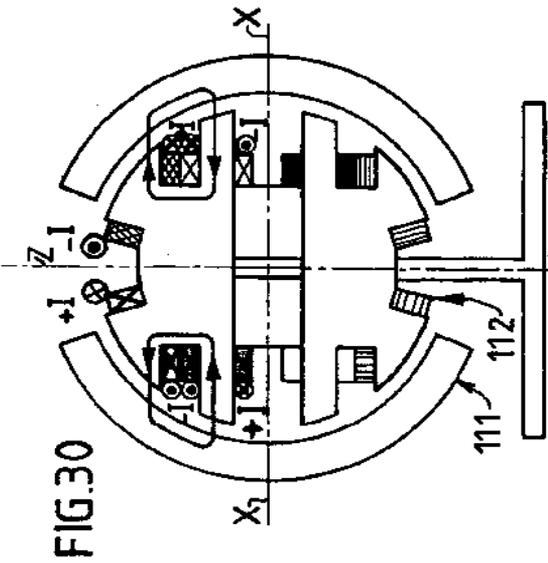


FIG. 29

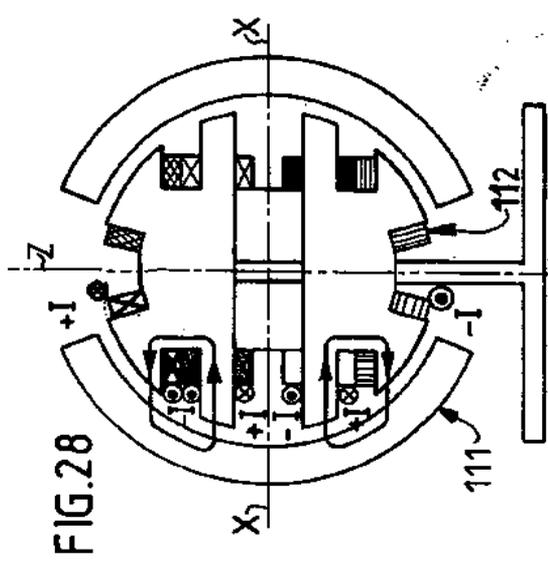


FIG. 30



FIG. 31

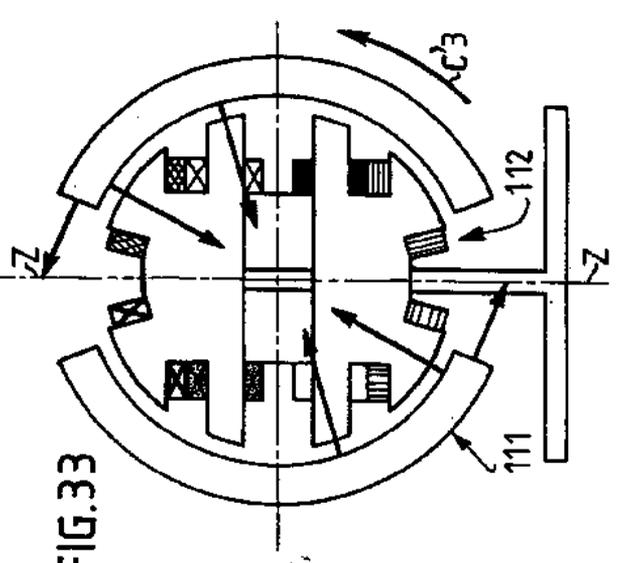


FIG. 32

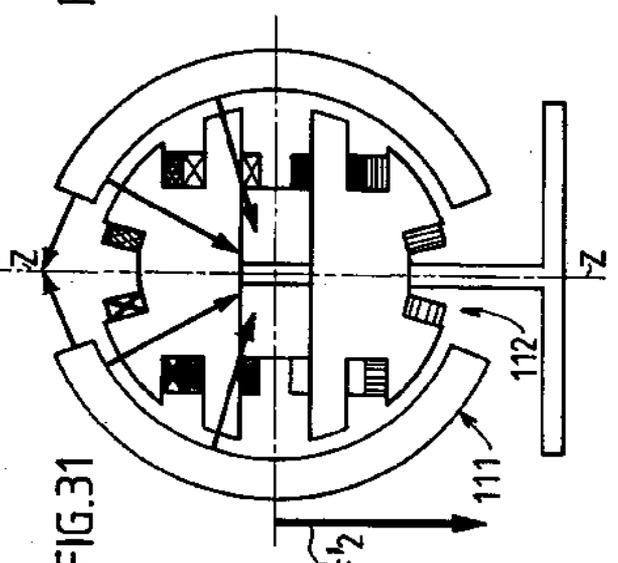


FIG. 33

