

18 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

12 Patentschrift
11 DE 3409047 C2

51 Int. Cl. 4:
F 16 C 32/04

21 Aktenzeichen: P 34 09 047.9-51
22 Anmeldetag: 13. 3. 84
43 Offenlegungstag: 19. 9. 85
45 Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 16. 2. 89

DE 3409047 C2

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

73 Patentinhaber:

Kernforschungsanlage Jülich GmbH, 5170 Jülich, DE

72 Erfinder:

Fremerey, Johan K., Dipl.-Phys. Dr., 5300 Bonn, DE;
Weller, Albrecht, Dip.-Phys., 5170 Jülich, DE

56 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit
in Betracht gezogene Druckschriften:

DE 28 42 165 A1
DE 25 04 766 A1
GB 10 30 508
US 36 98 775

US-Z.: Journal of Spacecraft and rocket, July 1975,
Bd. 12, S. 420-427;

Poubeau, P.C., Satellite Flywheels with Magnetic
Bearings and Passive Radial Centering, In: Journal
of Spacecraft and Rockets, Vol. 17, No. 2, 1980,
S.93-98;

64 Magnetlager zur dreiachsigen Lagerstabilisierung von Körpern

DE 3409047 C2

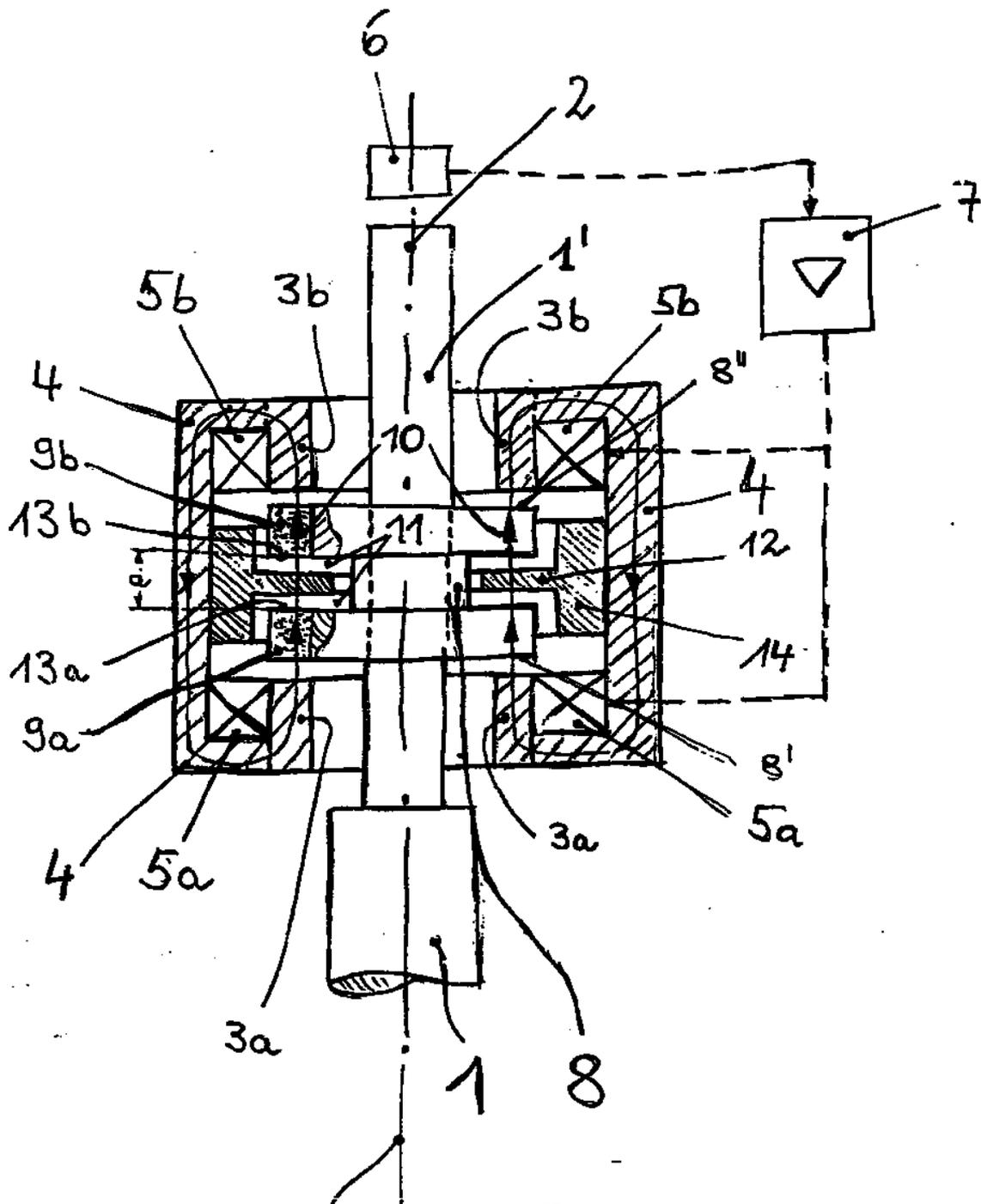


Fig. 1

Patentansprüche

1. Magnetlager zur dreiachsigen berührungslosen Lagerstabilisierung von Körpern, das auf gegenüberliegenden Seiten eines Rotors einen Stator aufweist, der aus ringförmigen Lagerteilen und einem diese verbindenden Hohlzylinder besteht, wobei zumindest die ringförmigen Lagerteile aus einem Material mit hoher magnetischer Leitfähigkeit ausgebildet sind, wobei ein den Rotor in nur einer Richtung durchdringender permanentmagnetischer Fluß durch ringförmige Permanentmagnete im Rotor erzeugt wird, und wobei zur Erzeugung von Rückstellkräften parallel zur Flußrichtung am Stator elektrische Spulen angebracht sind, die von einem die Lage des Rotors berührungslos abtastenden Servosystem und einem Regler angesteuert werden, dadurch gekennzeichnet, daß zwischen den Permanentmagneten (9a, 9b) des Rotors ein senkrecht zur Flußrichtung orientierter Spalt (11) vorgesehen ist, und daß in den Spalt (11) eine ortsfeste Platte (12) aus nichtmagnetisierbarem Material hoher elektrischer Leitfähigkeit hineinragt, ohne das bewegliche Lagerteil zu berühren, und daß der permanentmagnetische Fluß, der Spalt und Platte durchflutet, parallel zur Achse (2) der Rotorwelle (1) und nur in einer Richtung verläuft.

2. Magnetlager nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Platte (12) außerhalb des Spaltes (11) eine Materialverstärkung (14) aufweist.

3. Magnetlager nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Rotorwelle (1) zur Stabilisierung eines passiven permanentmagnetischen Lagersystems mit der Welle (18) des Lagersystems verbunden ist.

Beschreibung

Die Erfindung bezieht sich auf ein im Oberbegriff des Patentanspruches 1 angegebenes Magnetlager zur dreiachsigen Lagerstabilisierung von Körpern.

Ein Magnetlager dieser Art ist beispielsweise aus US-PS 36 98 775 bekannt. Bei dieser Ausbildung des Magnetlagers fehlt jedoch eine Dämpfungseinrichtung. Das Magnetlager ist deshalb für schnellrotierende Rotorsysteme nicht geeignet.

Ein mit einer Dämpfung versehenes Magnetlager wird in einer Veröffentlichung von Poubeau, P.C., "Satellite-Flywheels with Magnetic Bearings and Passive Radial Centering", Journal of Spacecraft and Rockets Vol. 17, No. 2, 1980, S. 93/98 beschrieben. Zur passiven radialen Dämpfung dieses Magnetlagers wird eine Kupferscheibe in einer Permanentmagnetanordnung im Rotor verwendet. Dabei werden magnetische Flußläufe erzeugt, die in bezug auf die Rotorachse unterschiedliche Richtungen aufweisen, was die Wirbelstromdämpfung schwächt.

Aufgabe der Erfindung ist es, ein im Aufbau möglichst einfaches Magnetlager zur dreiachsigen berührungslosen Lagerstabilisierung von Körpern mit wirkungsvoller Wirbelstromdämpfung zu schaffen, in welchem der Fluß eines einzigen permanentmagnetischen Kreises für die axiale Stabilisierung und gleichzeitig für die radiale Zentrierung und Dämpfung genutzt wird.

Diese Aufgabe wird bei einem Magnetlager der eingangs angegebenen Art gemäß der Erfindung durch die in Patentanspruch 1 angegebenen Merkmale gelöst. Danach ist zwischen den Permanentmagneten am Rotor

ein senkrecht zur Flußrichtung orientierter Spalt vorgesehen, in den eine Platte aus nichtmagnetisierbarem Material hoher elektrischer Leitfähigkeit hineinragt. Die Platte ist ortsfest angeordnet und berührt die rotierenden Permanentmagnete nicht. Wesentlich ist, daß der permanentmagnetische Fluß, der Spalt und Platte durchflutet, parallel zur Achse der Rotorwelle und nur in einer Richtung verläuft. Im Spalt wird so parallel zur Achse des rotierenden Körpers ein hoher magnetischer Fluß mit geringen Streuflußanteilen erzeugt. Als Plattenmaterial wird bevorzugt Kupfer verwendet.

Die Dämpfung des Rotors wird dadurch erzielt, daß der nichtmagnetisch durchflutete Bereich des Plattenmaterial der elektrisch hochleitfähigen Platte die im Spaltbereich erzeugte Spannungsquelle kurzschließt und so ein Kurzschlußstrom fließt. Die dabei verbrauchte Verlustenergie wird aus der Bewegungsenergie des Rotors gewonnen.

Dabei erwärmt sich die Platte, und die Bewegung des Rotors schwächt sich ab.

Um den elektrischen Widerstand der Platte außerhalb des magnetisch durchfluteten Bereiches des Plattenmaterials zu verringern, ist es in weiterer Ausbildung der Erfindung nach Patentanspruch 2 vorgesehen, das Plattenmaterial außerhalb des Spaltes zu verstärken.

Die Eigenschaften des Magnetlagers kommen in besonders günstiger Weise zur Wirkung bei dessen Einsatz zur Stabilisierung von passiven permanentmagnetischen Lagersystemen, Patentanspruch 3. Solche Lager weisen bei rotationsymmetrischer Ausbildung in Richtung der Lagerachse eine erhebliche Kraftinstabilität auf, die den gelagerten Rotationskörper nach der einen oder anderen Seite aus seiner magnetischen Neutralstellung heraus an den nächstmöglichen axialen mechanischen Anschlag treiben. Diese Instabilität wird durch Anbringen des erfindungsgemäßen Magnetlagers beseitigt. Das radial passive permanentmagnetische Lagersystem kann so auch im Bereich von kritischen Drehzahlen betrieben werden, ohne daß dynamische Instabilitäten, wie beispielsweise Nutationen, störend in Erscheinung treten. Die Dämpfungswirkung des Magnetlagers auf Drehschwingungen der Rotationsachse des gelagerten Körpers um eine Querachse ist um so günstiger, je weiter das Magnetlager vom Schwerpunkt des rotierenden Körpers entfernt angebracht ist. Bevorzugt eignet sich das Magnetlager zur Stabilisierung von Lagersystemen für Schwungräder. Von besonderem Vorteil ist ferner seine Verwendung als Trag- oder Stützlager für Ultrazentrifugen mit vertikaler Rotationsachse sowie für Turbomolekularpumpen.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand von Ausführungsbeispielen näher erläutert, die in der Zeichnung schematisch wiedergegeben sind. Die Zeichnung zeigt im einzelnen

Fig. 1 Magnetlager für rotierende Körper,

Fig. 2 Lagersystem mit passiver permanentmagnetischer Radiallagerung, das durch ein Magnetlager nach Fig. 1 stabilisiert ist.

In Fig. 1 ist ein rotationsasymmetrisches Magnetlager dargestellt. Das Magnetlager dient als Trag- oder Stützlager für eine Welle 1 eines um eine vertikale Achse 2 rotierenden Körpers. Das Magnetlager weist zum Stator gehörende ortsfeste Lagerteile 3a, 3b auf, die Bestandteil eines aus magnetisch gut leitendem Material, vorzugsweise aus Eisen gefertigten Hohlzylinders 4 sind. Die ortsfesten Lagerteile 3a, 3b bilden mit dem Hohlzylinder 4 verbundene Ringe, die im Ausführungsbeispiel an beiden Enden des Hohlzylinders 4 angeordnet

net sind. Zwischen den ringförmigen ortsfesten Lagerteilen 3a, 3b und dem Hohlzylinder 4 befinden sich zur Steuerung des Magnetlagers elektrische Spulen 5a, 5b, deren Stromdurchgang über ein Sensorsystem 5 und einen elektronischen Regler 7 gesteuert wird. Die elektrischen Verbindungsleitungen sind in der Zeichnung strichliniert dargestellt. Das Sensorsystem tastet die Lage der Welle 1 des rotierenden Körpers ab. Ein Wellenteil 1' durchdringt den Hohlzylinder 4 axial. Auf dem Wellenteil 1' sitzt ein Lagerteil 8, das mit der Welle rotiert und den Rotor des Magnetlagers bildet. Das bewegliche Lagerteil 8 ist zwischen den ortsfesten Lagerteilen 3a, 3b angeordnet, wobei gegenüberliegende Seiten 8', 8'' des beweglichen Lagerteils 8 den ortsfesten Lagerteilen 3a, 3b unter Ausbildung eines geringen Zwischenraums eng gegenüberstehen. Zwischen beweglichen und ortsfesten Lagerteilen verläuft der magnetische Fluß parallel zur Achse 2. Der die Achse 2 toroidal umgebende magnetische Fluß ist in Fig. 1 durch einen die im Schnitt dargestellten Lagerteile durchdringenden, jeweils geschlossenen Linienzug markiert.

Das bewegliche Lagerteil 8 weist zwei Permanentmagnete 9a, 9b auf, die mit axialem Abstand a zueinander angeordnet sind und zwischen sich einen senkrecht zum erzeugten magnetischen Fluß mit Flußrichtung 10 orientierten Spalt 11 bilden, der die Lagerbereiche 9a, 9b voneinander trennt. In den Spalt 11 ragt eine ringförmige Platte 12 hinein, die ortsfest angeordnet und im Ausführungsbeispiel am Hohlzylinder 4 befestigt ist. Die Platte 12 ragt in den Spalt 11 so weit hinein, daß sie vom magnetischen Fluß durchsetzt wird. Die Platte 12 besteht aus nichtmagnetisierbarem Material hoher elektrischer Leitfähigkeit, vorzugsweise aus Kupfer.

Die Permanentmagnete 9a, 9b bestehen an deren Polflächen 13a, 13b am Spalt 11 bevorzugt aus einer Seltenerde-Kobalt-Legierung. Dieses hochkoerzitive Material ist parallel zur Achse 2 magnetisiert und so angeordnet, daß die Permanentmagnete hintereinandergeschaltet sind. Zusammen mit den ortsfesten Lagerteilen 3a, 3b, die magnetisch entgegengesetzt polarisiert sind, ergibt sich somit über den magnetisch gut leitenden Hohlzylinder 4 ein permanentmagnetischer Fluß in einer vorgegebenen Richtung. In Fig. 1 ist die sich im Ausführungsbeispiel ergebende Flußrichtung 10 durch Pfeile kenntlich gemacht. Das ortsfeste Lagerteil 3a stellt somit einen magnetischen Nordpol, das Lagerteil 3b einen magnetischen Südpol dar.

Die von den ringförmigen elektrischen Spulen 5a, 5b bei Stromfluß erzeugten magnetischen Felder bewirken bei einer gegensinnigen Stromführung in den Spulen eine Axialkraft, die je nach Stromrichtung in den Spulen in der einen oder anderen Richtung axial auf das bewegliche Lagerteil 8 und damit auf die Welle 1 einwirkt. Das Servosystem 6 erzeugt elektrische Signale, die den Abweichungen der Welle aus ihrer vorgegebenen axialen Sollage proportional sind. Die Signale des Servosystems 6 werden durch den Regler 7 verstärkt und bestimmen Stromrichtung und Stromstärke in den Spulen 5a, 5b. Die hierdurch mittels der Spulen hervorgerufene axiale Kraft auf das bewegliche Lagerteil 8 wirkt der vom Sensorsystem 6 gemessenen axialen Abweichung der Welle 1 aus der Sollage entgegen. Bei Erreichen der Sollage fließt kein Strom mehr.

Zwischen den Polflächen 13a, 13b der Permanentmagnete 9a, 9b wird ein hoher magnetischer Fluß erzeugt. Der durch die Polflächen 13a, 13b austretende magnetische Fluß durchdringt in Flußrichtung 10 die in den Spalt 11 hineinragende Platte 12, so daß bei radialen

Bewegungen der Welle 1 in der Platte 12 eine Spannung induziert wird. Der innerhalb des Spalts 11 sich befindende Bereich der Platte 12 stellt somit eine Spannungsquelle dar, wobei die Höhe der induzierten Spannung der radialen Bewegungsgeschwindigkeit des beweglichen Lagerteils proportional ist.

Der aus dem Spalt 11 herausragende Teil der Platte 12 wird vom magnetischen Fluß nicht durchflutet. In diesem magnetfeldfreien Raum wird keine elektrische Spannung induziert. Durch diesen äußeren Bereich der Platte 12 wird die im Bereich der Platte innerhalb des Spalts erzeugte Spannungsquelle kurzgeschlossen. Die mit dem dabei fließenden Kurzschlußstrom verbundene Verlustenergie wird aus der Bewegungsenergie des rotierenden Körpers gewonnen und schwächt diese ab, wobei sich die Platte 12 erwärmt. Um im äußeren Bereich der Platte 12 im magnetfeldfreien Raum einen möglichst geringen elektrischen Widerstand zu schaffen, weist die Platte 12 in ihrem Bereich außerhalb des Spalts 11 eine Materialverstärkung 14 auf, die im Ausführungsbeispiel als symmetrisch zur Spaltebene geformter ringförmiger Kragen ausgebildet ist, der breiter als der Spalt 11 bemessen ist. Durch diese Materialverstärkung 14 lassen sich in der Platte 12 hohe Kurzschlußströme erzielen, die im Vergleich mit nicht verstärkten Platten bei gleich hoch induzierter Spannung zu wesentlich höherer Dämpfleistung führen.

Das bewegliche Lagerteil 8 kann auch mehrere mit Abstand zueinander angeordnete, permanentmagnetische Bereiche mit je einer in die entstandenen Spalte zwischen den Bereichen hineinragenden Platte aufweisen. Die Spalten verlaufen jeweils senkrecht zum magnetischen Fluß, sind somit in Richtung von Achse 2 hintereinander und parallel zueinander angeordnet. Eine solche Ausbildung des Magnetlagers erhöht die Dämpfleistung.

Mit den ringförmigen Permanentmagneten 9a, 9b wird ein sehr hohes gewichtsspezifisches magnetisches Moment für das bewegliche Lagerteil erzielt. Die Gewichtsbelastung des mit der Welle 1 rotierenden Körpers bzw. des Rotorsystems ist somit gering. Die Anordnung der ringförmigen Permanentmagnete in Hintereinanderschaltung führt zu einem optimalen Wirkungsgrad für die Spulen 5a, 5b, die die axialen Abweichungen der Welle korrigieren. Das magnetische Moment des hochkoerzitiven permanentmagnetischen Materials ist derart, daß es weder durch die magnetischen Felder der Spulen 5a, 5b, noch durch ein von außen in das Lagerelement eindringendes Magnetfeld beeinträchtigt wird. Gleichzeitig gewährleistet die geringe magnetische Leitfähigkeit, die hochkoerzitive magnetische Materialien auszeichnet, in Richtung von Achse 2 des rotierenden Körpers eine relativ geringe magnetische Grundinstabilität des beweglichen Lagerteils 8 in axialer Richtung gegenüber den ortsfesten Lagerteilen 3a, 3b.

Der Hohlzylinder 4 aus magnetisch gut leitendem Material bildet eine magnetische Abschirmung des Lagerelements, die einerseits vor äußeren magnetischen Störfeldern schützt, andererseits aber auch magnetische Störeinflüsse auf benachbarte Einrichtungen in der Umgebung des Magnetlagers infolge der starken Magnetfelder des Magnetlagers selbst verhindert.

Eine spezielle Anwendung des Magnetlagers nach Fig. 1 ist in Fig. 2 dargestellt. Fig. 2 zeigt ein passives, permanentmagnetisches Lagersystem für ein Schwungrad 15 mit zwei passiven, permanentmagnetischen Radiallagern 16a, 16b, die in bekannter Weise Permanentmagnete 17a, 17b mit radial abstoßender (Radiallager

16a) oder axial anziehender Wirkung (Radiallager 16b) aufweisen. Im Ausführungsbeispiel sind die Permanentmagnete 17a ortsfest angeordnet, die Permanentmagnete 17b bilden mit Welle 18 und Schwungrad 15 als Rotorsystem sich bewegende Lagerteile. Eine solche magnetische Lagerung für das Rotorsystem weist in ihrer Neutralstellung, d. h. dann, wenn die beweglichen Permanentmagnete 17b in Achsrichtung der Welle 18 eine bezüglich der ortsfesten Permanentmagnete 17a symmetrische Position einnehmen, eine erhebliche axiale Kraft-Instabilität auf, die das Rotorsystem nach der einen oder anderen Seite aus der Neutralstellung heraustribt. Diese Instabilität wird durch ein Magnetlager 19 beseitigt, das einen in Fig. 1 dargestellten Aufbau zeigt. Das Magnetlager 19 wird von einem Positions-Sensorsystem 20 mit Verstärker 21 in gleicher Weise gesteuert, wie das vorherbeschriebene, in Fig. 1 wiedergegebene Magnetlager. Mit dem Magnetlager 19 läßt sich das Rotorsystem mit Welle 18 und Schwungrad 15 nun auch im Bereich von kritischen Drehzahlen betreiben, ohne daß dynamische Instabilitäten, wie beispielsweise die Nutation störend in Erscheinung treten. Die Dämpfungswirkung des Magnetlagers 19 auf Drehschwingungen der Welle 18 um eine Querachse ist um so günstiger, je weiter das Magnetlagerelement 19 vom Schwerpunkt des Rotorsystems entfernt angebracht ist. Selbstverständlich können zur Verstärkung der Dämpfungswirkung mehrere Magnetlager 19 eingesetzt werden.

Das erfindungsgemäße Magnetlager zeichnet sich somit durch folgende Merkmale aus:

Das Magnetlager enthält einen einzigen, torroidal geschlossenen permanentmagnetischen Kreis. Der Flußverlauf ist in Fig. 1 durch die mit Flußrichtung 10 markierten geschlossenen Linien angedeutet.

Die axiale berührungslose Stabilisierung des beweglichen Lagerteils 8 zwischen dem ortsfesten Lagerteilen 3a und 3b wird mittels der Spulen 5a, 5b erzielt, die vom Sensorsystem 6 und elektronischem Regler 7 mit Strömen in jeweils gegensinnigem Umlaufsinn beaufschlagt werden, wie dies in DE-PS 24 44 099 beschrieben ist. Richtung und Betrag dieser Ströme werden durch das Ausgangssignal des Sensorsystems bestimmt, das die axiale Lage der Welle 1 und damit die Lage des beweglichen Lagerteils 8 berührungslos abtastet. Der Regler 7 erzeugt Ströme, die mittels der Spulen 5a, 5b in Verbindung mit den Permanentmagneten 9a, 9b in parallel zur Flußrichtung 10 wirkende Rückstellkräfte umgewandelt werden, sobald sich das bewegliche Lagerteil 8 von derjenigen axialen Position entfernt, bei welcher der Ausgangsstrom des Reglers verschwindet. Der Regler erzeugt gleichzeitig Dämpfungskräfte, die unabhängig von der jeweiligen axialen Position allen axialen Bewegungen, insbesondere axialen Schwingungen des beweglichen Lagerteils 8 entgegenwirken.

Die radiale Zentrierung des beweglichen Lagerteils 8 gegenüber den ortsfesten Lagerteilen 3a, 3b ergibt sich durch enge Gegenüberstellung formgleicher Polflächen der Permanentmagnete 9a, 9b mit den magnetisierbaren ringförmigen ortsfesten Lagerteilen 3a, 3b, die vorzugsweise aus Eisen bestehen.

Die radiale Dämpfung schließlich wird durch die zwischen den Permanentmagneten 9a, 9b des beweglichen Lagerteils 8 ortsfest angebrachte Platte 12 aus nichtmagnetisierbarem Material hoher elektrischer Leitfähigkeit, vorzugsweise Kupfer, bewirkt. Bei radialen Bewegungen des Lagerteils 8 werden in den vom magnetischen Fluß durchdrungenen Bereichen der Platte 12 elektrische Spannungen induziert.

Das erfindungsgemäße Magnetlager stellt somit berührungslose Rückstell- bzw. Zentrier- und Dämpfungskräfte in drei voneinander unabhängigen Achsrichtungen (eine axiale, zwei radiale) bereit. Es besteht aus nur sieben wesentlichen Bauteilen, nämlich aus zwei Eisenringen, die die ortsfesten Lagerteile 3a, 3b bilden, aus zwei ringförmigen Permanentmagneten 9a, 9b für das bewegliche Lagerteil 8 aus zwei elektrischen Spulen 5a, 5b und einer ringförmigen Platte 12 aus Kupfer. Alle Teile sind in einfacher Weise herzustellen und ohne Aufwand zu montieren.

Hierzu 2 Blatt Zeichnungen

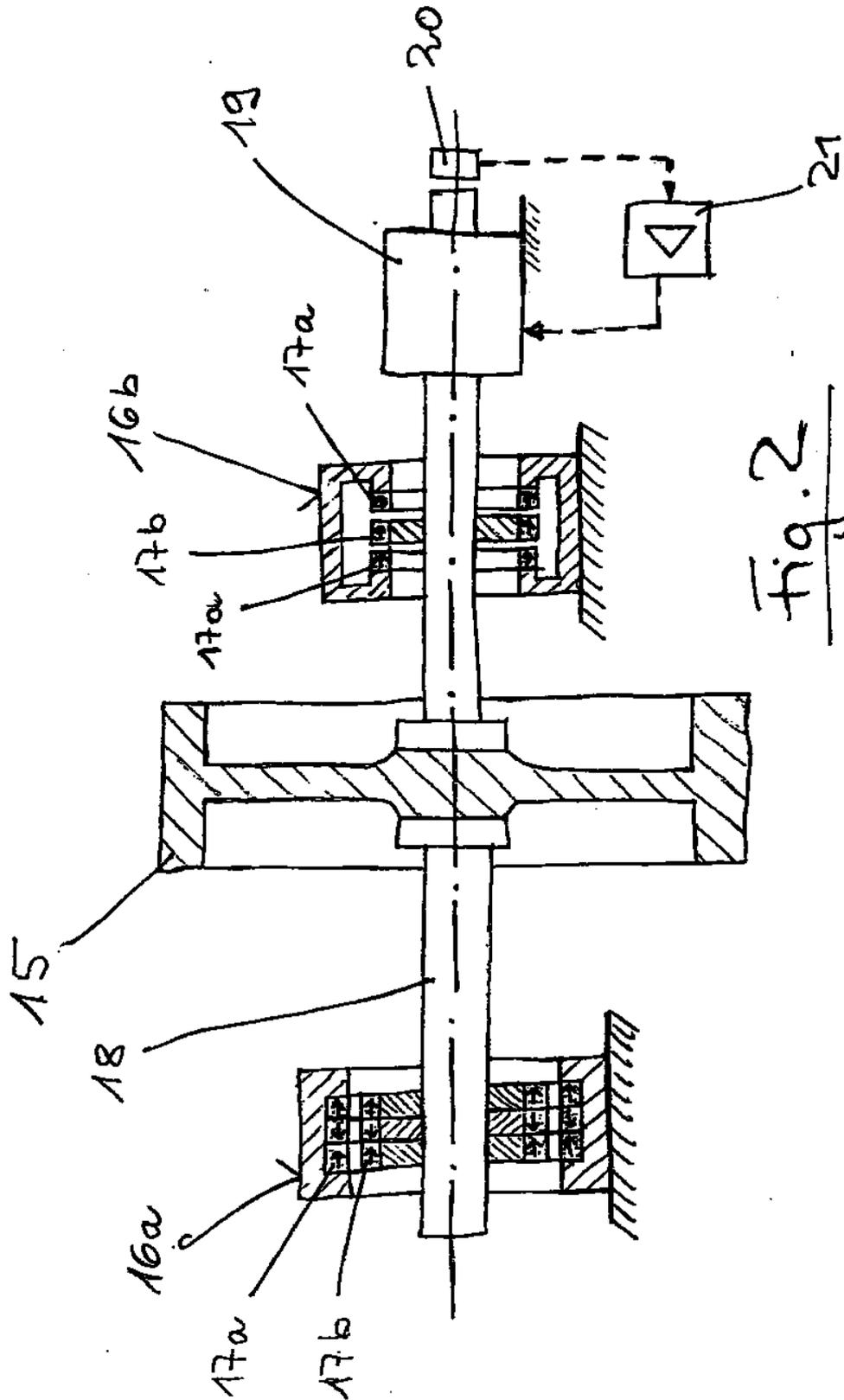


Fig. 2