



⑬ BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 196 41 438 A 1**

⑤① Int. Cl.⁶:
F 16 C 32/04

⑳ Aktenzeichen: 196 41 438.5
㉑ Anmeldetag: 8. 10. 96
㉒ Offenlegungstag: 19. 2. 98

DE 196 41 438 A 1

③① Unionspriorität:
698235 14.08.96 US

⑦① Anmelder:
Korea Advanced Institute of Science & Technology,
Daejeon-si, KR

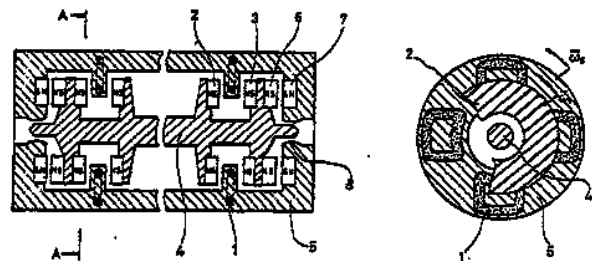
⑦④ Vertreter:
Blumbach, Kramer & Partner, 81245 München

⑦② Erfinder:
Shin, Sung-chul, Daejeon, KR; Filatore, Alexei,
Daejeon, KR

⑤⑤ Entgegenhaltungen:
WO 95 23 298
WO 92 10 871
IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 32, No. 4,
July 1996, S. 2230-2235;

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

- ⑤④ Bei hoher Temperatur supraleitendes Magnetlager
- ⑤⑦ Die vorliegende Erfindung betrifft eine passive Magnetlager-Struktur für das radiale Halten eines Rotors in bezug auf einen Stator, umfassend:
- einen Stator (5);
 - einen Rotor (4);
 - einen Magnetkreis, der auf dem Rotor (4) montiert ist und zwei stark verschiedene axiale Magnetfelder in zwei konzentrischen ringförmigen Spalten erzeugt, die coaxial zur Rotationsachse sind und radial voneinander entfernt sind; und
 - wenigstens drei kurzgeschlossene, supraleitende Windungen (1), die auf dem Stator (5) umfangmäßig um die Rotationsachse montiert sind, so daß unter einer tolerierbaren Verschiebung des Rotors (4) eine Kante jeder Windung (1) in einem ringförmigen Spalt, der ein Magnetfeld umfaßt, angeordnet ist und die radial gegenüberliegende Kante in dem anderen Spalt angeordnet ist.



DE 196 41 438 A 1

Die vorliegende Erfindung betrifft ein bei hoher Umdrehungsgeschwindigkeit und hoher Belastbarkeit verwendbares Lager. Die Erfindung betrifft insbesondere ein passives Magnetlager.

Herkömmliche mechanische Lager liefern eine hohe Belastbarkeit und eine hohe Steifigkeit, weisen jedoch eine begrenzte Haltbarkeit insbesondere unter hoher Umdrehungsgeschwindigkeit auf. Ein großer Reibungsverlust, Geräusche und das Erfordernis der Verwendung von Gleitmitteln führen dazu, daß die Verwendung eines mechanischen Lagers bei hoher Umdrehungsgeschwindigkeit oder in schwierig zu handhabenden Umgebungen wie beispielsweise bei niedriger Temperatur oder unter Vakuum unpraktisch ist.

Andere Arten von Lagern sind Flüssigfilm-Lager oder Gasfilm-Lager. Die meisten dieser Einrichtungen können eingeteilt werden in selbsttätige oder von außen unter Druck gesetzte Lager. Von außen unter Druck gesetzte Lager liefern eine sehr hohe Trag-Belastbarkeit. Beispielsweise wird das 236 Tonnen schwere Hochauflösungs-Spektrometer im Los Alamos Laboratory (USA) von fünf Luft-Lagern getragen. Das Hauptproblem bei solchen Lagern besteht darin, daß sie ein sehr kompliziertes pneumatisches oder hydraulisches System für ihren Betrieb benötigen, das Pumpen, Ventile, Dichtungen und Leitungen einschließt. Ein weiteres Problem ist der kontinuierliche Energieverbrauch, der von außen zugeführt werden muß.

Bei Hochgeschwindigkeits-Anwendungen werden üblicherweise selbsttätige Gasfilm- oder Flüssigfilm-Lager verwendet. Ein von außen zu betreibendes pneumatisches System und eine Energiequelle werden für den Betrieb dieser Vorrichtungen nicht benötigt. Jedoch ist eine Herstellung ein großes Problem. Es ist manchmal erforderlich, ein Gas-Lager aus einem Material zu konstruieren, das Langzeitbeständigkeit und Abmessungen aufweisen muß, die bis auf Mikro-Inches genau sind (beispielsweise aus gehärtetem Werkzeugstahl mit Lager-Oberflächen, deren Finish optisch glatt ist). Außerdem macht der sehr kleine Wert des Spiels bei selbsttätigen Lagern (nahe 25 μin) diese sehr empfindlich gegenüber Verunreinigungen. Weitere Nachteile dieser Vorrichtungen sind ein relativ hoher Energieverlust bei Drehung und eine begrenzte Belastbarkeit.

Ein weiterer Ansatz zur Lösung des Trageproblems ohne Kontakt ist die Verwendung von Magnetlagern. Herkömmliche Magnetlager machen Gebrauch vom Schweben eines aus einem Weichmagnet-Material hergestellten oder einen Permanentmagneten einschließenden Rotors in einem äußeren Magnetfeld. Sie sind einfach, zuverlässig und preiswert, weisen einen geringen Verlust bei Rotation auf und können unter hoher Rotationsgeschwindigkeit sowie bei ungünstigen Umgebungsbedingungen arbeiten. Derartige Systeme sind anfänglich instabil, und alle herkömmlichen Magnetlager erfordern ein Außensystem zur Steuerung des das Lager tragenden Magnetfeldes, das durch Spulen mit Strom erzeugt werden muß. Dies führt zu Nachteilen dieser Systeme wie zu kontinuierlichem Energieverbrauch, der von außen zugeführt werden muß, einem komplizierten Rückkopplungs-Steuersystem und einer begrenzten Belastbarkeit. Das letztgenannte Merkmal ist durch zwei Faktoren begrenzt: Zum einen führt eine Erhöhung der Tragekraft zu einer Erhöhung der Hitzeabgabe in den Windungen. Zum anderen gilt, daß die Induktivitäten der das Feld erzeugenden Spulen und die

Werte des Stroms in diesen Spulen umso höher sein müssen, je höher die Belastbarkeit ist. Folglich müssen höhere Spannungen an die Spulen angelegt werden, um die Ströme in den Spulen und die Tragekräfte mit hoher Geschwindigkeit zu variieren. Soweit tolerierbare Spannungen an den tatsächlichen elektronischen Einheiten des elektrischen Kreislaufs der Rückkopplungsschleife begrenzt sind, führt dies zur Verschlechterung der dynamischen Charakteristika eines Magnetlagers.

Eine weitere Variante eines Magnetlagers macht Gebrauch von der Wechselwirkung eines Supraleiters mit einem äußeren magnetischen Feld. Ein derartiges System ist absolut stabil, und ein äußeres Steuerungssystem wird nicht benötigt. Alle bekannten supraleitenden Materialien können eingeteilt werden in Supraleiter des Typs I oder Supraleiter des Typs II. Supraleiter des Typs I verdrängen ein Magnetfeld vollständig, bis der kritische Magnetfeld-Wert H_c erreicht ist. Sie weisen keine supraleitenden Eigenschaften in höheren Magnetfeldern auf. Supraleiter des Typs II verdrängen ein Magnetfeld vollständig, bis der erste kritische Magnetfeld-Wert H_{c1} erreicht ist. Ihre supraleitenden Eigenschaften bleiben jedoch teilweise bis zum Erreichen des zweiten kritischen Magnetfeld-Wertes H_{c2} erhalten. Zwischen diesen Werten dringt ein Magnetfeld in die supraleitende Probe ein, und der Prozeß der Supraleiter-Neumagnetisierung zeigt eine starke Hysterese. Außerdem ändert sich das magnetische Moment der magnetisierten Supraleiter des Typs II mit der Zeit aufgrund der sogenannten Magnetfluß-Nachwirkung (magnetic flux creep).

Gestaltungen von Magnetlagern, die von Niedertemperatur-Supraleitern des Typs I oder Supraleitern des Typs II Gebrauch machen, die bei einem Magnetfeld unterhalb von H_{c1} arbeiten, sind wohlbekannt (Vernon L. Newhouse, Applied Superconductivity, Band 2, Kapitel 7, Seite 489). Da die Werte von H_c oder H_{c1} klein sind (kleiner als 1500 Oe), zeigen diese Vorrichtungen eine geringe Steifigkeit und Belastbarkeit. Außerdem ist ein kompliziertes und teures System zum Herunterkühlen auf die Temperatur von flüssigem Helium für den Betrieb des Lagers erforderlich. Dabei sind bei niedriger Temperatur supraleitende Magnetlager gekennzeichnet durch perfekte dynamische charakteristische Eigenschaften und einen außergewöhnlich niedrigen Energieverlust bei Rotation.

Obwohl Supraleiter des Typs II wie beispielsweise Nb-Ti seit Jahren bekannt sind und der Wert H_{c2} dieser Materialien signifikant höher als 1500 Oe ist, wurde kein Lager unter Verwendung dieser Materialien hergestellt. Der Grund war die offensichtliche Tatsache, daß die Hysterese der Supraleiter-Neumagnetisierung eine Hysterese der charakteristischen Eigenschaften des Lagers in Bezug auf die Kraftverschiebung hervorruft und die Stellung des Rotors unvorhersehbar wird. Außerdem ruft die Wirkung der Magnetfluß-Nachwirkung in Supraleitern des Typs II einen Zeitverzug der charakteristischen Lager-Eigenschaften hervor.

Die jüngste Entdeckung von Hochtemperatur-Supraleitern, die bei der Temperatur von flüssigem Stickstoff arbeiten können, ermutigte viele Forschungsteams zur Herstellung eines supraleitenden Magnetlagers unter Verwendung neuer Materialien, die nur ein relativ einfaches, preiswertes und zuverlässiges System zum Kühlen auf die Temperatur von flüssigem Stickstoff benötigen. Das Problem ist jedoch, daß alle bis jetzt bekannten, bei hoher Temperatur supraleitenden Materialien typische Supraleiter des Typs II sind und alle oben angesproche-

nen Probleme, die aufgrund der Neumagnetisierungs-Hysterese und der Magnetfluß-Nachwirkung auftreten, auch bei diesen Supraleitern beobachtet werden. Alle hergestellten Prototypen von bei hoher Temperatur supraleitenden Magnetlagern (siehe z. B. "Advances in Cryogenic Engineering 37, Teil A, 1992"; "Appl. Phys. Lett. 60, 15 (1992), 1893"; "IEEE Transaction on Applied Superconductivity 3, 1(1993), 388"; "Cryogenics 32, 7 (1992), 628" und Patentanmeldung Nr. WO 92/10871) sind gekennzeichnet durch eine sehr hohe Belastbarkeit, Haltbarkeit und eine sehr geringe Reibung bei Rotation. Gleichzeitig machen die extrem hohe Hysterese der charakteristischen Kraftverschiebungs-Eigenschaften, die unvorhersagbare Stellung des Rotors im Raum und das Problem der anfänglichen Einstellung des Rotors auf die zentrale Position während des Abkühlens des Systems diese Vorrichtungen für den praktischen Gebrauch unbrauchbar. Außerdem hat eine derartige Gestaltung den signifikanten Nachteil einer Langzeit-Verschiebung der charakteristischen Eigenschaften des Lagers, die auftritt aufgrund der Magnetfluß-Nachwirkung im Supraleiter. Zur Reduzierung der Einflüsse der Magnetfluß-Nachwirkung und der Hysterese der Supraleiter-Neumagnetisierung wäre es wünschenswert, Änderungen eines Magnetfeldes, das in den Supraleiter eindringt, soweit wie möglich zu reduzieren.

Ein weiterer Nachteil dieser Gestaltung ist das niedrige Verhältnis der Belastbarkeit zur Konstruktionsgröße aufgrund der hohen Reluktanz bzw. des hohen magnetischen Widerstandes des Magnetspaltes, was zur Unentbehrlichkeit der Verwendung einer großdimensionierten Quelle für das Magnetfeld führt. Es ist nötig, ebenfalls anzumerken, daß die Eigenschaften von supraleitenden Materialien in diesen Konstruktionen sehr irrational eingesetzt werden. Im Idealfall fließt in jedem Elementarvolumen der supraleitenden Probe der Strom in der Ebene, die senkrecht zur Richtung der äußeren Kraft angeordnet ist, und das Magnetfeld verläuft senkrecht sowohl zur Außenkraft als auch zum Strom. Eine gewisse weitere Komponente des Magnetfeldes ist in allen derzeit bekannten Gestaltungen des Magnetlagers, in dem Supraleiter des Typs II verwendet werden, unvermeidlich. Diese Komponente induziert eine Elementarkraft, die im rechten Winkel zur äußeren Kraft verläuft. Daher ist diese Komponente des Magnetfeldes nicht nützlich und unterdrückt nur den Stromwert und erhöht die Innenbelastungen in einer Probe.

Kurz zusammengefaßt, wäre es wünschenswert und ist Aufgabe der Erfindung, Supraleiter des Typs II dafür zu verwenden, ein passives Magnetlager für Hochbelastungs-Anwendungen zu entwickeln, jedoch den Einfluß der Neumagnetisierungs-Hysterese und der Magnetfluß-Nachwirkung zu reduzieren oder zu eliminieren.

Zur Erreichung dieses Ziels wäre es wünschenswert, für eine optimale Verteilung des Magnetfeldes in Supraleitern zu sorgen und so unnütze Komponenten des magnetischen Feldes auszuschließen und Änderungen eines Magnetfeldes, das in Supraleiter eindringt, unter irgendeiner Bewegung eines Rotors zu reduzieren.

Es wäre insbesondere wünschenswert, Änderungen eines Magnetfeldes, das in Supraleiter eindringt, unter Umdrehung des Rotors zu eliminieren, so daß Rotationsenergie-Verluste minimiert werden.

Es wäre wünschenswert, den magnetischen Widerstand bzw. die Reluktanz eines Magnetspaltes zu reduzieren und kleinformatige Quellen der Magnetkraft zu verwenden, um das tragende Magnetfeld zu erzeugen.

Es wäre außerdem wünschenswert und stellt damit

ebenfalls eine Aufgabe der Erfindung dar, eine Gleichgewichtsstellung des Einzelrotors sicherzustellen, die mit der Lager-Symmetrieachse zusammenfallen muß.

Eine weitere Aufgabe der Erfindung ist, für eine automatische Anfangseinstellung eines Rotors in der Gleichgewichtsposition zu sorgen.

Weiter wäre es wünschenswert und stellt damit ebenfalls eine Aufgabe der Erfindung dar, für Langzeitstabilität der charakteristischen Lager-Eigenschaften zu sorgen.

Weiterhin ist es eine Aufgabe der Erfindung, Gebrauch von bei hoher Temperatur supraleitenden Materialien und von einem relativ preiswerten, einfachen und zuverlässigen System zur Kühlung mit flüssigem Stickstoff Gebrauch zu machen.

Weiter war es wünschenswert und ist damit ebenfalls eine Aufgabe der Erfindung, die Anisotropie der elektromagnetischen Eigenschaften der gegenwärtig bekannten, bei hoher Temperatur supraleitenden Materialien in Betracht zu ziehen. Zum Beispiel sollte in einer $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ -Probe das Magnetfeld entlang der c-Achse angelegt werden, und der Strom sollte in der ab-Ebene fließen.

Ziel der Erfindung war die Gestaltung eines passiven Lagers, das gekennzeichnet ist durch außergewöhnlich hohe Belastbarkeit, außergewöhnlich geringen Reibungsverlust, sehr hohe Haltbarkeit und Zuverlässigkeit. Das Lager weist eine Gleichgewichtsstellung des Einzelrotors auf und zeigt wohldefinierte charakteristische Eigenschaften der Kraftverschiebung und den erforderlichen minimalen Energieverbrauch bei Zufuhr von außen.

Die Entwicklung macht Gebrauch von Supraleitern des Typs II, insbesondere von Hochtemperatur-Supraleitern.

Die Erfindung zieht Vorteil aus der Wechselwirkung einer supraleitenden kurzgeschlossenen Windung mit einem äußeren Magnetfeld.

Die Erfindung betrifft also passive Magnetlager-Strukturen nach Patentanspruch 1 oder 2. Die Erfindung betrifft auch lineare Magnetlager-Strukturen nach Patentanspruch 4, 5 oder 6.

Bevorzugte Ausgestaltungen der einzelnen Magnetlager-Strukturen ergeben sich aus den Unteransprüchen.

In der ganz grundlegenden Form umfaßt eine Ausführungsform eine planare kurzgeschlossene Windung, die aus einem supraleitenden Material hergestellt ist. Diese ist einem äußeren Magnetfeld ausgesetzt, das vertikal zur Ebene der Windung verläuft, und ist in einen supraleitenden Zustand versetzt. Ohne Verlust der Allgemeingültigkeit kann angenommen werden, daß die Windung in Form eines Rechtecks geformt ist. Das Magnetfeld muß so geformt sein, daß zwei einander gegenüberliegende Seiten des Rechtecks einheitlichen Feldern ausgesetzt sind. Die Werte des Feldes müssen für unterschiedliche Seiten stark verschieden sein. Bereiche der Einheitlichkeit müssen in der Richtung vertikal zu diesen Seiten lang genug sein, so daß keine Änderung der Magnetfelder um die Seiten herum unter beliebigen tolerierbaren Verschiebungen der Windung in dieser Richtung auftritt. Wenn eine derartige Verschiebung von der anfänglichen Position stattfindet, tritt in der Windung ein Abschirm-Strom auf. Wenn die Windung aus einem perfekten Leiter hergestellt wäre, hätte der Abschirm-Strom einen solchen Wert, daß sich der Gesamtmagnetfluß, der die Summe des äußeren Flusses und des durch den Abschirm-Strom erzeugten Flusses

ist, nicht ändert. Als Ergebnis dessen wirken Kräfte auf die Rechteckseiten, die Ströme umfassen und einem Magnetfeld ausgesetzt sind. Soweit die Magnetfelder für zwei Seiten, die vertikal zur Verschiebungsrichtung liegen, verschieden sind, ist die Gesamtkraft, die auf die Windung wirkt, von Null verschieden und in Gegenrichtung zur Verschiebungsrichtung gerichtet. Wenn die Bereiche der einheitlichen Magnetfelder entlang der Rechteckseiten, die vertikal zur Verschiebungsrichtung liegen, verlängert werden, kann sich die Windung entlang dieser Seiten ohne irgendwelche Reibung bewegen. Diese Ausführungsform kann als das einfachste lineare Magnetlager angesehen werden, das einen Translations-Freiheitsgrad eines Schiebers beschränkt, der eine supraleitende Windung umfaßt.

Eine kontinuierliche Kreisbewegung der Windung kann erreicht werden, wenn die Bereiche der einheitlichen Magnetfelder konzentrische Ringe mit Außendurchmessern bilden, die viel größer sind als die Größe der Windung. Wenn wenigstens drei supraleitende Windungen umfangsmäßig um die Rotationsachse (die die gemeinsame Achse der Ringbereiche ist, die ein einheitliches Magnetfeld umfassen) auf einem gemeinsamen Schaft montiert sind, wird eine Ausführungsform eines radialen Magnetlagers erhalten.

Die Vorteile des oben beschriebenen Ansatzes treten dann zutage, wenn die kurzgeschlossene Windung aus einem Supraleiter des Typs II hergestellt wird. Es ist leicht zu sehen, daß nur geringe Volumenbereiche des Supraleiters auf den Rechteckseiten, die entlang der störenden Kraftachsen gerichtet sind, während einer Verschiebung der Windung von der anfänglichen Stellung neu magnetisiert werden. Daher ist der Einfluß der Neumagnetisierungs-Hysterese vernachlässigbar klein. Der Strom in der supraleitenden Windung ist vertikal zum äußeren Magnetfeld auf den Seiten der Windung, die vertikal zur Kraftachse liegt, gerichtet. Das Magnetfeld auf den beiden anderen Seiten kann viel kleiner gemacht werden. So wird die Stromführungskapazität des supraleitenden Materials in diesem System optimal genutzt. Außerdem kann die supraleitende Windung aus einem Kern des qualitativ hochwertigen, schmelz-texturierten $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ -Keramikmaterials herausgeschnitten werden, so daß die kristallographische ab-Ebene mit der Ringebene zusammenfällt. In diesem Fall wird das Magnetfeld entlang der Ringachse angelegt (wo der Wert von H_{c2} maximal ist), und der Strom fließt in der ab-Ebene (in der die kritische Stromdichte maximal ist).

Ein noch signifikanter Vorteil des beschriebenen Systems ist ein kleiner Wert des magnetischen Widerstandes bzw. der Reluktanz des magnetischen Spaltes. Deswegen können starke Magnetfelder (in der Größenordnung von 1 bis 2 T) mit einer kleinen Quelle der magnetischen Spannung bzw. Magneto-EMK erhalten werden.

Die Verwendung von Supraleitern des Typs II mit sehr hohen Werten der Stromdichte in starken magnetischen Feldern ermöglicht es, eine sehr hohe Belastung zu erhalten. Beispielsweise ist ein typischer Wert der kritischen Stromdichte einer qualitativ hochwertigen, schmelz-texturierten $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ -Keramik in einem magnetischen Feld von 1 bis 2 T höher als 100 A/mm^2 . Wenn die supraleitende Windung aus einem einzigen Kern eines derartigen Materials herausgeschnitten wird, wie dies oben beschrieben wurde, und eine Querschnittsfläche von $3 \times 3 \text{ mm}^2$ aufweist, kann im statischen Zustand ein geschlossener Strom eines Wertes

von 1000 A ohne signifikanten Energieverlust fließen. Wenn die Windung als Quadrat mit einer mittleren Seitenlänge von 1 cm geformt ist und eine Seite einem magnetischen Feld von 1 T ausgesetzt wird, ist die auf diese Windung wirkende Kraft nahezu 10 N. Es ist anzumerken, daß die Masse der Windung nahe 1 g liegt. Das Magnetfeld von 1 T im Spalt, der ein wenig größer ist als die Dicke der Windung (3 mm), kann leicht mittels kleinformatiger starker Permanentmagneten erhalten werden (beispielsweise sind Sm-Co- oder Nd-Fe-B-Permanentmagneten erhältlich). Daher kann in diesem System eine sehr hohe Belastbarkeit bei minimaler Masse und Größe des Lagers erhalten werden.

Eine Ausführungsform des Rotationslagers, das zur radialen und in einem Winkel befindlichen bzw. einer winkelligen Aufhängung eines rotierbaren Schaftes vorgesehen ist, umfaßt zwei der oben beschriebenen radialen Magnetlager, die so angeordnet sind, daß jedes von innen die radiale Bewegung eines der Schaft-Enden beschränkt.

Die axiale Aufhängung des Schaftes kann dadurch erreicht werden, daß man Gebrauch von der Wechselwirkung zwischen zwei Permanentmagneten macht.

Die Funktion des bewegbaren Teils des Lagers und des stationären Teils des Lagers können vertauscht werden, so daß der Teil des Aufbaus, der die Supraleiter umfaßt, stationär ist und der Teil, der die Magnetfeld-Quellen umfaßt, bewegbar ist.

Wie früher gezeigt, ist der Einfluß der Neumagnetisierungs-Hysterese in dem vorgeschlagenen System vernachlässigbar. Gleichzeitig bleibt eine gewisse Unbestimmtheit hinsichtlich der Stellung der bewegbaren Komponente im Raum wegen des Einflusses der Magnetfluß-Nachwirkung. Dieser Einfluß wird in dem Rotationslager mit Rotor, der supraleitende Windungen umfaßt, wegen der sich periodisch ändernden Stellungen der Windungen eliminiert. Außerdem wird bei diesen Ausführungsformen das automatische Einstellen des Rotors in der zentralen Position erreicht. Gleichzeitig führt die Bewegung der Supraleiter in einem nicht-homogenen Magnetfeld, die unter einer radialen Belastung stattfindet, zu einem gewissen Verlust an Rotationsenergie und zu einer Freisetzung von Hitze in den Supraleitern. Es wurde festgestellt, daß sich zur Erreichung einer hohen Rotationsgeschwindigkeit der Rotor im Vakuum bewegen muß, wo eine Kühlung nur beschränkt möglich ist. So können derartige Dichtungen nicht bei hoher Rotationsgeschwindigkeit verwendet werden.

Alle diese Probleme werden in der Variante gelöst, in der der Teil, der die Permanentmagneten umfaßt, als Rotor verwendet wird, jedoch der Teil, der die Supraleiter umfaßt, ebenfalls mit einer niedrigen Geschwindigkeit rotiert.

Im Fall eines linearen Magnetlagers wird der Einfluß der Magnetfluß-Nachwirkung in einer Ausführungsform mit einem Gleiter, der die Quelle des Magnetfeldes umfaßt, und mit einer Führungsbahn eliminiert, die die supraleitenden Windungen umfaßt, die jede für sich nebeneinander in der Gleitrichtung montiert sind. Dieses System ist oft praktisch nicht brauchbar, da ein kompliziertes System zum Kühlen der Supraleiter entlang der gesamten Länge der Führungsbahn erforderlich ist.

Ein weiterer Weg zur Eliminierung des Einflusses der Stromdämpfung ist die Verwendung eines Gleiters, der einige supraleitende Windungen, die nebeneinander entlang der Gleitrichtung angeordnet sind, und eine Führungsbahn umfaßt, die in eine Anzahl von separaten Blöcken unterteilt ist. Das stützende Magnetfeld ändert

sich von Block zu Block in Übereinstimmung mit einem gewissen periodischen Gesetz. So tritt eine gewisse äußere elektromotorische Kraft in jeder supraleitenden Windung zutage, die sich entlang der Führungsbahn bewegt. Die Summe der Längen der Seiten der supraleitenden Windungen, gerichtet in Gleitrichtung, muß viel länger sein als die Periode des stützenden Magnetfeldes, so daß die mittlere Anhebekraft, die auf den Gleiter wirkt, konstant gehalten wird. Wenn Solenoide als Quellen der magnetischen Spannung verwendet werden, müssen dazu, um ein erforderliches Energieminimum einzuhalten, nur die Blöcke erregt werden, die einen Gleiter enthalten.

Andere Merkmale und Vorteile der vorliegenden Erfindung werden aus der folgenden detaillierteren Beschreibung, zusammengekommen mit den beigefügten Figuren, noch offensichtlicher. Diese veranschaulichen beispielhaft die Prinzipien der Erfindung.

Die oben bereits angesprochenen und weitere Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung können vollständiger aus der folgenden detaillierten Beschreibung zusammen mit den beigefügten Figuren verstanden werden. Darin beziehen sich ähnliche Bezugszeichen auf ähnliche Elemente in allen Figuren. Es zeigen:

Fig. 1 eine schematische Zeichnung zur Erklärung des Prinzips der vorliegenden Erfindung;

Fig. 2 eine schematische Zeichnung eines radialen Magnetlagers;

Fig. 3 eine schematische Zeichnung eines axialen und radialen Magnetlagers;

Fig. 4 und Fig. 5 schematische Zeichnungen zur Erklärung der Kompensation der Stromdämpfung;

Fig. 6 bis 10 schematische Zeichnungen zur Erklärung des Prozesses der anfänglichen Rotoreinstellung;

Fig. 11 eine schematische Zeichnung eines linearen Magnetlagers mit supraleitenden Windungen, das auf der Führungsbahn montiert ist; und

Fig. 12 eine schematische Zeichnung eines linearen Magnetlagers mit supraleitenden Windungen, das auf dem Gleiter montiert ist, und mit Kompensation der Stromdämpfung.

Die vorliegende Erfindung betrifft ein neues aufgehängtes Lager, das Vorteil aus der Wechselwirkung einer supraleitenden kurzgeschlossenen Windung mit einem äußeren Magnetfeld zieht.

Das Prinzip der Erfindung ist in Fig. 1 erläutert. Eine planare kurzgeschlossene Windung 1, die aus einem supraleitenden Material hergestellt ist, ist einem äußeren Magnetfeld ausgesetzt, das vertikal zur Ebene der Windung verläuft, und ist in einen supraleitenden Zustand versetzt. Ohne Verlust der Allgemeingültigkeit kann angenommen werden, daß die Windung in Form eines Rechtecks geformt ist. Eine andere Form der Windung ist ebenfalls annehmbar. Das Magnetfeld muß so geformt sein, daß zwei einander gegenüberliegende Seiten des Rechtecks einheitlichen Feldern B_1 und B_2 ausgesetzt sind. Die Werte B_1 und B_2 müssen stark voneinander verschieden sein. In einem speziellen Fall kann einer der Werte Null sein. Bereiche der Einheitlichkeit müssen in der X-Richtung lang genug sein, so daß keine Änderung der Magnetfelder um die Seiten herum unter beliebigen tolerierbaren Verschiebungen der Windung in dieser Richtung auftritt. Wenn eine Verschiebung ΔX von der anfänglichen Position (die durch die gepunktete Linie gezeigt ist) stattfindet, tritt ein Abschirm-Strom I in der Windung auf. Wenn die Windung aus einem perfekten Leiter hergestellt ist, hat der Abschirm-Strom einen solchen Wert, daß sich der Gesamt-Magnetfluß,

der die Summe des äußeren Flusses und des durch den Abschirm-Strom erzeugten Flusses ist, nicht ändert. Als Ergebnis dessen wirken Kräfte auf die Rechteckseiten, die Ströme umfassen und Magnetfeldern ausgesetzt sind. Soweit die Magnetfelder für zwei Seiten, die vertikal zur Verschiebungsrichtung liegen, verschieden sind, ist die Gesamtkraft F von Null verschieden und ist in einer Richtung entgegen der Verschiebungsrichtung gerichtet. Wenn die Bereiche der einheitlichen Magnetfelder in der Y-Richtung verlängert werden, kann sich die Windung entlang dieser Seiten ohne irgendeinen Energieverlust bewegen. Das beschriebene System kann als das einfachste lineare Magnetlager angesehen werden.

Die Vorteile des oben beschriebenen Ansatzes treten dann auf, wenn die kurzgeschlossene Windung aus einem Supraleiter des Typs II hergestellt ist. Es ist leicht zu sehen, daß nur geringe Volumenbereiche des Supraleiters an den Rechteckseiten, die entlang der störenden Kraftachsen gerichtet sind, während einer Verschiebung der Windung von der anfänglichen Stellung neu magnetisiert werden. Daher ist der Einfluß der Neumagnetisierungs-Hysterese vernachlässigbar klein. Der Strom in der supraleitenden Windung ist im rechten Winkel zum äußeren Magnetfeld auf den Seiten der Windung, die vertikal zur Kraftachse liegen, gerichtet. Das Magnetfeld auf den beiden anderen Seiten kann viel kleiner gemacht werden. So wird die Stromführungskapazität des supraleitenden Materials in diesem System optimal genutzt. Außerdem kann die supraleitende Windung aus einem Kern des qualitativ hochwertigen, schmelz-texturierten $YBa_2Cu_3O_{7-x}$ -Keramikmaterials herausgeschnitten werden, so daß die kristallographische ab-Ebene mit der Ringebene zusammenfällt. In diesem Fall wird das Magnetfeld entlang der Ringachse angelegt (wo der Wert von H_{c2} maximal ist), und der Strom fließt in der ab-Ebene (in der die kritische Stromdichte maximal ist).

Ein noch mehr signifikanter Vorteil des beschriebenen Systems ist ein kleiner Wert des magnetischen Widerstandes bzw. der Reluktanz des Magnetspaltes. Dieser erlaubt es, starke Magnetfelder (in der Größenordnung von 1 bis 2 T) mittels einer kleindimensionierten Quelle für die magnetische Spannung zu erhalten.

Eine kontinuierliche Kreisbewegung der Windung kann erreicht werden, wenn die Bereiche der einheitlichen Magnetfelder konzentrische Ringe mit Außendurchmessern bilden, die viel größer sind als die Größe der Windung. Wenn wenigstens drei supraleitende Windungen umfangsmäßig um die Rotationsachse (die die gemeinsame Achse der Ringbereiche ist, die einheitliche Magnetfelder umfassen) auf einem gemeinsamen Schaft montiert sind, wird die Ausführungsform eines radialen Magnetlagers erhalten. Die Variante eines derartigen Lagers ist in Fig. 2 gezeigt. Das Lager umfaßt vier supraleitende Windungen 1, die auf einem nicht-magnetischen Rotor 4 umfangsmäßig um die Rotationsachse montiert sind. Ein Magnetfeld in einem kreisförmigen Spalt wird erzeugt durch zwei axial polarisierte ringförmige Permanentmagneten 2 und 3, die auf dem weichmagnetischen Stator 5 angebracht sind, und das Magnetfeld im Bereich der gegenüberliegenden Seiten der supraleitenden Windungen 1 ist nahe bei Null.

Eine Ausführungsform des Rotationslagers, das zur radialen und winkligen Aufhängung eines rotierbaren Schaftes vorgesehen wird, umfaßt zwei der oben beschriebenen radialen Magnetlager, die so angeordnet sind, daß jedes von ihnen die radiale Bewegung eines der Schaft-Enden beschränkt. Eine axiale Aufhängung

des Schaftes kann geschaffen werden durch Anwendung der Wechselwirkung zwischen zwei Permanentmagneten.

Die Funktionen des bewegbaren Teils des Lagers und des stationären Teils des Lagers können ausgetauscht werden, so daß ein Teil des Aufbaus, der die Supraleiter umfaßt, stationär ist und der Teil, der die Quellen für die Magnetfelder umfaßt, bewegbar ist.

Eine derartige Ausführungsform eines radialen und axialen Magnetlagers mit Supraleitern, die auf dem Stator montiert sind, und einem Permanentmagneten, der auf dem Rotor montiert ist, ist in Fig. 3 gezeigt. In dieser Ausführungsform sind zwei Paare ringförmiger Permanentmagneten 2 und 3 mit axialer Magnetisierung an den Enden des weichmagnetischen Schaftes 4 montiert, so daß einheitliche Magnetfelder in den kreisförmigen Spalten zwischen den Polen jedes Paares der Magnete erzeugt werden. Wenigstens drei kurzgeschlossene Windungen 1 in Form eines Quadrats sind auf dem nicht-magnetischen Stator 5 zwischen den Polen jedes Paares der Magneten und umfangsmäßig um den Schaft 4 angebracht, so daß fast die Hälfte jeder Windung in dem Magnetfeld angeordnet ist. Wenn der Schaft in der zentralen Stellung angeordnet wäre, würde nach einer radialen oder unter einem bestimmten Winkel verlaufenden Verschiebung des Schaftes Ströme in den supraleitenden Windungen 1 auftreten, so daß eine zurückstellende Kraft oder ein Moment auf den Schaft wirken würde. Um den Schaft 4 in axialer Richtung zu stützen, wird die Wechselwirkung zwischen den Permanentmagneten 6 und 7 verwendet. Die Gestaltung der Stützflächen 8 wird später erläutert.

Wie bereits früher gezeigt, ist der Einfluß der Neumagnetisierungs-Hysterese in dem vorgeschlagenen System vernachlässigbar. Gleichzeitig bleibt in Bezug auf die räumliche Position der bewegbaren Komponente eine gewisse Unbestimmtheit wegen des Einflusses der Magnetfluß-Nachwirkung.

Dieser Einfluß wird bei dem Rotationslager mit Rotor, der die supraleitenden Windungen umfaßt, wegen der sich periodisch austauschenden Positionen der Windungen eliminiert. Daneben wird bei diesen Ausführungsformen das automatische Einstellen des Rotors in der zentralen Position erreicht. Unglücklicherweise sind diese Vorteile nur eine Seite der Medaille. Gleichzeitig erzeugt die zeitliche Bewegung der Supraleiter in einem nichthomogenen Magnetfeld, die unter einer radialen Belastung stattfindet, einen gewissen Rotationsenergie-Verlust sowie eine Freisetzung von Hitze in den Supraleitern. Es ist anzumerken, daß sich bei dem Ziel, eine hohe Rotationsgeschwindigkeit zu erhalten, ein Rotor im Vakuum bewegen muß, wo die Möglichkeiten zur Kühlung beschränkt sind. Daher können solche Lager nicht bei hoher Rotationsgeschwindigkeit verwendet werden. Außerdem kann unter bestimmten Betriebsbedingungen ein Rotor, der Supraleiter-Windungen umfaßt, um eine Achse rotieren, die von der Rotor-Symmetrieachse verschieden ist.

Alle oben genannten Nachteile werden in der Variante ausgeschlossen, in der das Teil, das die Permanentmagneten umfaßt, als Rotor verwendet wird, jedoch das Teil, das die Supraleiter umfaßt, ebenfalls mit niedriger Geschwindigkeit rotiert. In diesem Fall können die Supraleiter irgendeine Veränderung des stützenden Magnetfeldes während der Rotation des Rotors um seine Symmetrieachse nicht wahrnehmen, und zwar unabhängig von der radialen Stellung des Rotors. Es besteht kein Erfordernis, den Rotor zu kühlen, und folglich gibt es

keine Beschränkung der Rotor-Rotationsgeschwindigkeit. Gleichzeitig führt die Rotation des Stators zu einem periodischen Wechsel von Positionen der Windungen und daher zu einer Eliminierung der Unbestimmtheit der Rotorstellung. Übliche Kugellager können zur Stütze des Stators verwendet werden, der sich mit niedriger Geschwindigkeit bewegt. Die in Fig. 3 gezeigten Stützflächen 8 sind vorgesehen zur Beschränkung der anfänglichen Verschiebung des Schaftes und schaffen die Möglichkeit eines relativen Gleitens des Schaftes 4 in Bezug auf den Stator 5 während des anfänglichen Einstellungsschrittes, wenn die Variante mit dem "rotierenden Stator" zur Anwendung kommt.

Der Prozeß der Kompensation der Stromdämpfung ist noch mehr im Detail in den Fig. 4 und 5 erläutert. In Fig. 4 ist der Rotor 4 in der Weise gezeigt, wie er von der zentralen Stellung in vertikaler Richtung verschoben ist. Wenn der Stator 5 mit vier supraleitenden Windungen a bis d zwangsweise um seine eigene Achse in Drehung versetzt wird, treten elektromotorische Kräfte in den supraleitenden Zylindern auf und verhindern eine Stromdämpfung wie in einem üblichen Wechselstromtransformator. Die Zeitabhängigkeiten der "äußeren" elektromotorischen Kräfte in den supraleitenden Windungen sind in Fig. 5 angegeben (definiert als $d\Phi^{\text{ext}}/dt$, worin $d\Phi^{\text{ext}}$ der Magnetfluß ist, der durch die i-te Windung fließt). Die Realwerte der elektromotorischen Kräfte, die als $(d\Phi^{\text{ext}} - d\Phi^{\text{scr}})/dt$ definiert sind (worin $d\Phi^{\text{scr}}$ der Magnetfluß ist, der durch den Abschirm-Strom in der i-ten Windung erzeugt wird) ist sehr klein und nicht sinusförmig (aufgrund der nichtlinearen Abhängigkeit der Stromdichte gegen das elektrische und magnetische Feld in Supraleitern des Typs II), jedoch periodisch mit einer Zeitdauer T.

Das Stromverhalten ist ebenfalls periodisch mit derselben Zeitdauer. Als Ergebnis der Wechselwirkung dieser Ströme mit einem äußeren Magnetfeld tritt eine konstante Kraft auf, die auf den Rotor in der Richtung entgegengesetzt zur Verschiebung wirkt. Die einzigen Vorteile der Verwendung von Supraleitern des Typs II anstelle herkömmlicher Leiter sind sehr hohe Ströme (10^2 bis 10^4 A/mm²), ein sehr geringer Energieverlust und eine sehr niedrige Rate der Stromdämpfung. Die letztgenannte Tatsache erlaubt die Abwendung einer sehr langsamen Rotationsgeschwindigkeit des Stators und macht dieses System praktisch brauchbar.

Ein weiterer Vorteil des Systems, das einen rotierenden Stator umfaßt, ist eine erhöhte Stromdichte in den supraleitenden Windungen, verglichen mit der statischen Betriebsweise, da gezeigt wurde, daß die kritische Stromdichte in den Supraleitern des Typs II mit Erhöhung der elektrischen Feldstärke ansteigt (vgl. Physica C 174 (1991), 14 bis 22).

Dies erlaubt den Erhalt einer höheren Belastbarkeit und Steifheit eines Lagers. Eine gewisse Erhöhung der Freisetzung von Hitze in den supraleitenden Windungen ist kein Problem, da eine Kühlung eines Supraleiters leicht erfolgen kann.

Ein weiterer Vorteil der Variante, die einen rotierenden Stator umfaßt, ist die automatische Einstellung des Rotors in der zentralen Stellung. Der Prozeß der Einstellung des Rotors ist in den Fig. 6, 7, 8 und 9 erläutert. Die Rotorposition in dem Fall, in dem die Supraleiter-Windungen in den supraleitenden Zustand eintreten, ist in Fig. 6 gezeigt. Es tritt eine gewisse Anfangsverschiebung der Rotorachse von der Statorachse Δr in diesem Moment auf. In dieser Position ist der Magnetfluß durch die Windung "a" minimal, ist der Magnetfluß durch die

Windung "c" maximal und sind die Flüsse durch die Windungen "b" und "d" dazwischenliegend. In dieser Position fließen keine Ströme in den Windungen. Wenn der Stator mit einer gewissen Geschwindigkeit ω zu rotieren beginnt, treten Abschirm-Ströme auf. Die Stromrichtungen, die Richtung des äußeren magnetischen Feldes und die auf den Rotor wirkenden Kräfte, die gleich und zu den auf die Windungen "a", "b", "c" und "d" wirkenden Kräfte entgegengesetzt gerichtet sind, sind in Fig. 7 nach einer Viertel-Umdrehung, in Fig. 8 nach einer halben Umdrehung und in Fig. 9 nach einer Dreiviertel-Umdrehung gezeigt. Die Konvention, die in dieser Beschreibung befolgt wird, ist derart, daß ein Vektor, der in die Papierebene hineingerichtet ist, mit "+" bezeichnet wird, während ein Vektor, der aus der Papierebene herauskommt, mit "•" bezeichnet wird. Es ist leicht zu sehen, daß die Gesamtkraft, die auf den Rotor wirkt, aus der zeitunabhängigen Komponente, die dazu führt, daß sich der Rotor in die zentrale Stellung bewegt, und einer oszillierenden Komponente besteht. Nach einiger Zeit unter dem Einfluß der konstanten Komponente ist der Rotor in die zentrale Stellung eingestellt, wenn keine äußere radiale Belastung auftritt. Ab diesem Zeitpunkt gibt es keine konstante Kraft mehr, sondern eine oszillierende. Aufgrund der vollständigen Axialsymmetrie des Systems hängt die Amplitude dieser Kraft nicht vom Rotationswinkel des Stators ab, und es ändert sich nur die Kraftrichtung. So umschreibt das Ende des Kraftvektors einen Kreis mit dem Zentrum auf der Symmetrieachse. Aufgrund der Dämpfung des supraleitenden Stroms nimmt die Größe der oszillierenden Kraft mit der Zeit ab (Fig. 10).

Im Fall eines linearen Magnetlagers wird der Einfluß der Magnetfluß-Nachwirkung in einer Ausführungsform eliminiert, die in Fig. 11 mit einem Gleiter 9 gezeigt ist, der Permanentmagneten 2 und 3 und eine Führungsbahn umfaßt, die supraleitende Windungen 1 umfaßt, die nebeneinander entlang der Gleitrichtung angeordnet sind. Dieses System ist oft praktisch unbrauchbar, da ein kompliziertes System zum Kühlen der Supraleiter entlang der gesamten Länge der Führungsbahn erforderlich ist.

Ein weiterer Weg zur Eliminierung des Einflusses der Stromdämpfung ist in Fig. 12 gezeigt. In dieser Variante umfaßt der Gleiter 9 einige supraleitende Windungen 1, die nebeneinander entlang der Gleitrichtung angeordnet sind. Die Führungsbahn 10 ist in eine Anzahl von Blöcken 11 aufgeteilt. Das tragende Magnetfeld ändert sich von Block zu Block in Übereinstimmung mit einem periodischen Gesetz. So tritt eine gewisse elektromotorische Kraft in jeder supraleitenden Windung auf, die sich entlang der Führungsbahn bewegt. Die Summe der Längen der Seiten der supraleitenden Windungen, die entlang der Gleitrichtung gerichtet sind, muß viel länger sein als die Periode des tragenden Magnetfeldes, so daß die mittlere Anhebekraft, die auf den Gleiter wirkt, konstant gehalten wird. Wenn Solenoide als Quellen der magnetischen Spannungen verwendet werden, müssen bei dem Ziel, ein erforderliches Energieminimum einzulassen, nur die Blöcke angeregt werden, die einen Gleiter enthalten. Diese Ausführungsform kann in Aufhängesystemen von Hochgeschwindigkeitszügen verwendet werden.

Es ist klar, daß eine Beschränkung weiterer Freiheitsgrade eines Gleiters erreicht werden kann durch Verwendung einiger der oben beschriebenen Einheiten, die einen Translations-Freiheitsgrad beschränken. Diese einfache Entwicklung wird als von der Erfindung um-

faßt angesehen, und Gruppen derartiger Vorrichtungen werden daher hier nicht gesondert beschrieben.

Viele Herausforderungen, denen man sich derzeit in verschiedenen Bereichen von Wissenschaft und Technologie stellen muß, können durch Verwendung des vorgeschlagenen supraleitenden Magnetlagers gelöst werden. Eine der vielversprechenden Anwendungen ist diejenige in Tieftemperatur-Turbopumpen in Raketen-Triebwerken. In einer Sauerstoff-Turbopumpe arbeitet ein Lager bei einer Temperatur nahe 90 K, und in einer Wasserstoff-Turbopumpe liegt die Temperatur nahe 33 K. Das Lager muß unter extrem hoher Belastung arbeiten, die in der Größenordnung von 4500 bis 22 500 N liegt, und bei einer hohen Rotationsgeschwindigkeit von 30 bis 40 Ups. Der Betrieb der derzeit verwendeten mechanischen Lager unter hohen Belastungen in einer Tieftemperatur-Umgebung führt zu übermäßig starkem Verschleiß, und es ist heute Praxis, Turbopumpen nach jedem dritten Shuttle-Flug auszuwechseln.

Im Gegensatz dazu ist eine tiefe Temperatur eine geeignete Umgebung für die supraleitenden Materialien. Hohe Verhältnisse der Belastbarkeit und Steifheit gegen die Lagergröße bzw. das Lagergewicht lassen das neue Lager vielversprechend für Anwendungen in der Raumfahrt erscheinen, wo die Nutzlast beschränkt ist.

Ein noch mehr signifikanter Vorteil besteht darin, daß keine von außen zugeführte Energie für den Betrieb des Lagers erforderlich ist. Dieses Faktum ist auch von großer Wichtigkeit für Anwendungen in der Raumfahrt, wo die Möglichkeit der Versorgung mit Energie beschränkt ist. Man geht davon aus, daß die vorgeschlagene Lagerstruktur erfolgreich in vielen Systemen an Bord von Raumflugkörpern angewendet werden wird, wo es passiv gekühlt werden kann, indem man es auf der schattigen Seite eines Raumfahrzeugs anordnet. Unter solchen Anwendungen sollte das Raumflugkörper-Orientierungssystem (beispielsweise ein Rundfunksatelliten-Orientierungssystem), ein Satellitenschwungrad-Energiespeichersystem und eine unter künstlicher Schwerkraft gehaltene Raumstation erwähnt werden.

Beim Raumflugkörper-Orientierungssystem wird die Winkellagerung eines Raumflugkörpers gesteuert durch Austausch des Impulsmoments zwischen dem Flugkörper und einem Schwungrad. In diesem System kann eine Änderung und präzise Steuerung der Raumflugkörper-Orientierung ohne Verbrauch von von außen zugeführter Energie erreicht werden. Um ein hohes Impulsmoment bei minimaler Größe und minimalem Gewicht der Vorrichtung zu erreichen, muß die Rotationsgeschwindigkeit des Schwungrades so hoch wie möglich sein. Die Verwendung des supraleitenden Magnetlagers, das eine extrem geringe Rotationsreibung besitzt, sorgt für eine einzigartige Möglichkeit zur Entwicklung dieser Anwendung.

Das Satellitenschwungrad-Energiespeichersystem ist eine Alternative zu den derzeit verwendeten elektrochemischen Batterien in Satelliten, die auf einer niedrigen Umlaufbahn kreisen. Beispielsweise wird in einem auf einer niedrigen Umlaufbahn kreisenden Satelliten mit einem 90 Minuten-Zyklus die elektrische Energie von photovoltaischen Zellen während 60 Minuten geliefert, während der Satellit der Bestrahlung des Sonnenlichtes ausgesetzt ist. Während dieser Zeitdauer speichern die Batterien Energie. Während der folgenden 30 Minuten bewegt sich der Satellit im Erdschatten, und elektrische Energie wird von den Batterien geliefert. Es ist bekannt, daß unglücklicherweise elektrochemische Batterien eine begrenzte Lebensdauer haben. Daneben

ist es schwierig, die Ladung der Batterien zu messen. Das Schwungrad-Energiespeichersystem mit supraleitenden Magnetlagern kann zur Speicherung von elektrischer Energie in Form von Rotationsenergie eines Schwungrades beitragen. Es wird erwartet, daß das Schwungrad-Energiespeichersystem eine viel längere Lebensdauer hat, eine höhere Effizienz zeigt und ein höheres Verhältnis der gespeicherten Energie gegen das Gewicht der Vorrichtung zeigt als elektrochemische Batterien.

Das künstliche Schwerkraftsystem liefert künstliche Schwerkraft in einem Teil der Raumstation, um physiologische Schäden bei den Crew-Mitgliedern während ihres Aufenthaltes unter Bedingungen fehlender Schwerkraft zu verhindern. Künstliche Schwerkraft kann durch Rotation dieses Teils der Station erreicht werden. Gleichzeitig ist es oft erforderlich, daß ein anderer Teil der Station eine feste Orientierung beibehält. Das supraleitende Magnetlager kann zur mechanischen Verbindung der beiden Teile und zur Bereitstellung der Möglichkeit der Rotation eines Teils in Relation zu dem anderen verwendet werden.

Als ein Beispiel der Anwendung eines supraleitenden Magnetlagers auf der Erde kann ein Magnetlager für den Einsatz bei der Belieferung mit verflüssigtem Naturgas (Liquefied Natural Gas Service) genannt werden. Die untergetauchte Motorpumpe ist eines der wichtigsten Teile der Anlage in Flüssiggas-Werken. Derzeit werden speziell entwickelte mechanische Lager zum Tragen des Rotors der Pumpe verwendet. Extreme Betriebsbedingungen wie niedrige Temperatur (-162°C) und hohe Rotationsgeschwindigkeit (16.400 Upm) begrenzen die Lebensdauer des Lagers. Es ist wichtig anzumerken, daß Flüssignaturgas ein gefährlich explosives Medium ist. Deswegen ist die Verwendung eines herkömmlichen Magnetlagers unerwünscht, da jede Beschädigung von Hochinduktivitäts-Windungen, die große Ströme umfassen, zu einer Explosion führt. So scheint das supraleitende Magnetlager die einzige Lösung des Problems der Aufhängung des Rotors in der Pumpe für LNG (Flüssignaturgas; Liquefied Natural Gas) zu sein.

Obwohl die vorliegende Erfindung im Zusammenhang mit einer Anzahl spezieller Ausführungsformen offenbart wurde, ist davon auszugehen, daß viele verschiedene weitere geometrische Konfigurationen verwendet werden können, ohne vom Geist der vorliegenden Erfindung abzuweichen. Weitere Konfigurationen können erhalten werden durch Umändern der Form, Größe, Dicke usw. der verschiedenen Strukturbauteile. Außerdem können viele Kombinationen der verschiedenen Merkmale der vorliegenden Erfindung gemacht werden, ohne daß dies im Licht der in der vorliegenden Beschreibung gegebene Lehre eine zusätzliche Erfindung erforderlich macht.

Es ist ersichtlich, daß die vorliegende Erfindung und die in der vorliegenden Beschreibung offenbarten Ausführungsformen bestens dafür geeignet sind, die Aufgaben zu lösen, und die Ziele der Erfindung zu erreichen. Bestimmte Änderungen können in der Vorrichtung und der Verfahrensweise gemacht werden, ohne vom Geist und Umfang der vorliegenden Erfindung abzuweichen. Es ist klar, daß Änderungen möglich sind und daß es weiter beabsichtigt ist, daß jedes Element der Erfindung, das in einem der folgenden Patentansprüche genannt ist, auch alle äquivalenten Elemente zur Erzielung im wesentlichen desselben Ergebnisses in im wesentlichen derselben oder einer äquivalenten Weise umfaßt.

Fachleute in diesem technischen Bereich können viele Variationen und Anpassungen an die aktuellen Verhältnisse auffinden, und solche Variationen und Anpassungen, die in den Bereich und Geist der vorliegenden Erfindung fallen, sollen von der vorliegenden Erfindung umfaßt sein.

Patentansprüche

1. Passive Magnetlager-Struktur für das radiale Halten eines Rotors in Bezug auf einen Stator, umfassend:

- einen Stator (5);
- einen Rotor (4);
- einen Magnetkreis, der auf dem Rotor (4) montiert ist und zwei stark verschiedene axiale Magnetfelder in zwei konzentrischen ringförmigen Spalten erzeugt, die coaxial zur Rotationsachse sind und radial voneinander entfernt sind; und
- wenigstens drei kurzgeschlossene, supraleitende Windungen (1), die auf dem Stator (5) umfangsmäßig um die Rotationsachse montiert sind, so daß unter einer tolerierbaren Verschiebung des Rotors (4) eine Kante jeder Windung (1) in einem ringförmigen Spalt, der ein Magnetfeld umfaßt, angeordnet ist und die radial gegenüberliegende Kante in dem anderen Spalt angeordnet ist.

2. Passive Magnetlager-Struktur für das radiale Halten eines Rotors in Bezug auf einen Stator, umfassend:

- einen Stator (5);
- einen Rotor (4);
- einen Magnetkreis, der auf dem Stator (5) montiert ist und zwei stark verschiedene axiale Magnetfelder in zwei konzentrischen ringförmigen Spalten erzeugt, die coaxial zur Rotationsachse sind und radial voneinander entfernt sind; und
- wenigstens drei kurzgeschlossene, supraleitende Windungen (1), die auf dem Rotor (4) umfangsmäßig um die Rotationsachse montiert sind, so daß unter einer tolerierbaren Verschiebung des Rotors (4) eine Kante jeder Windung (1) in einem ringförmigen Spalt, der ein Magnetfeld umfaßt, angeordnet ist und die radial gegenüberliegende Kante in dem anderen Spalt angeordnet ist.

3. Passive Magnetlager-Struktur nach Anspruch 1, worin sich der Stator (5) mit niedriger Geschwindigkeit um seine Achse dreht.

4. Lineare Magnetlager-Struktur zur Beschränkung eines Translations-Freiheitsgrades eines Gleiters, umfassend:

- einen Gleiter (9);
- eine Führungsbahn (10);
- einen Magnetkreis, der auf der Führungsbahn (10) montiert ist und zwei stark verschiedene Magnetfelder erzeugt, die vertikal zur Bewegungsrichtung verlaufen, in zwei Schichten in Gleitrichtung gelängt sind und voneinander in der Richtung vertikal sowohl zur Gleitrichtung als auch zur Magnetfeldrichtung angeordnet sind; und
- wenigstens eine kurzgeschlossene, supraleitende Windung (1), die auf dem Gleiter (9) montiert ist, so daß unter einer tolerierbaren

Verschiebung des Gleiters (9) eine Kante der Windung (1) in einer Schicht angeordnet ist, die ein Magnetfeld umfaßt, und die radial gegenüberliegende Kante in der anderen Schicht angeordnet ist.

5. Lineare Magnetlager-Struktur für die Beschränkung eines Translations-Freiheitsgrades und eines Winkel-Freiheitsgrades eines Gleiters, umfassend:

- einen Gleiter (9);
- eine Führungsbahn (10);
- einen Magnetkreis, der auf dem Gleiter (9) montiert ist und zwei stark verschiedene Magnetfelder erzeugt, die vertikal zur Gleitrichtung verlaufen, in zwei Schichten in Gleitrichtung gelängt sind und voneinander in der Richtung vertikal sowohl zur Gleitrichtung als auch zur Magnetfeldrichtung angeordnet sind; und
- kurzgeschlossene, supraleitende Windungen (2), die auf der Führungsbahn (10) nebeneinander in Gleitrichtung montiert sind, so daß unter einer tolerierbaren Verschiebung des Gleiters (9) eine Kante jeder Windung (1), die durch den Gleiter (9) abgedeckt wird, in einer Schicht angeordnet ist, die ein Magnetfeld umfaßt, und die radial gegenüberliegende Kante in der anderen Schicht angeordnet ist.

6. Lineare Magnetlager-Struktur zur Beschränkung eines Translations-Freiheitsgrades und eines Winkel-Freiheitsgrades eines Gleiters, umfassend:

- einen Gleiter (9);
- eine Führungsbahn (10), die aus einigen getrennten Blöcken (11) besteht, die nebeneinander in Gleitrichtung angeordnet sind;
- Magnetschaltungen, die auf den Blöcken (11) montiert sind, wobei jede von ihnen zwei stark verschiedene Magnetfelder erzeugt, die vertikal zur Bewegungsrichtung verlaufen und sich in Übereinstimmung mit einem periodischen Gesetz von Block (11) zu Block (11) ändern und die in zwei Schichten in Gleitrichtung gelängt sind und voneinander in der Richtung vertikal sowohl zur Gleitrichtung als auch zur Magnetfeldrichtung angeordnet sind; und
- kurzgeschlossene, supraleitende Windungen (1), die auf dem Gleiter (9) nebeneinander entlang der Gleitrichtung montiert sind, so daß unter einer tolerierbaren Verschiebung des Gleiters (9) eine Kante jeder Windung (1) in einer Schicht angeordnet ist, die ein Magnetfeld umfaßt, und die radial gegenüberliegende Kante in der anderen Schicht angeordnet ist.

7. Lineare Magnetlager-Struktur nach Anspruch 6, worin der Magnetkreis jedes Blocks einen Elektromagneten als Quelle der magnetischen Spannung umfaßt und nur Elektromagnete von Blöcken, die einen Gleiter umfassen, angeregt sind.

8. Magnetlager-Struktur nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 7, worin die supraleitende Windung (1) aus einem anisotropen supraleitenden Material des Typs II hergestellt ist, das eine Achse von maximal H_{c2} aufweist, die vertikal zur Windungsebene gerichtet sein muß, und eine Ebene von maximal j_c aufweist, der mit der Windungsebene zusammenfallen muß.

- Leerseite -

FIG 1

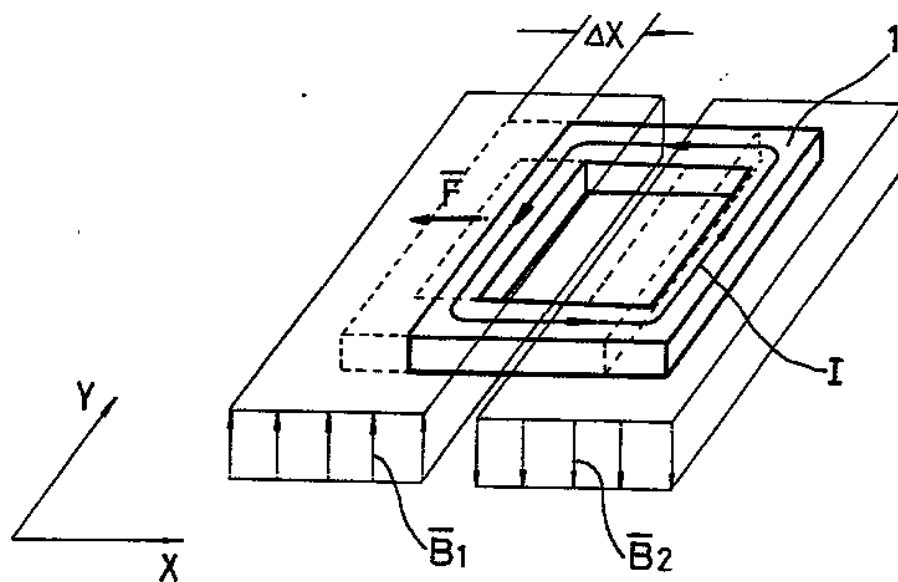


FIG 2

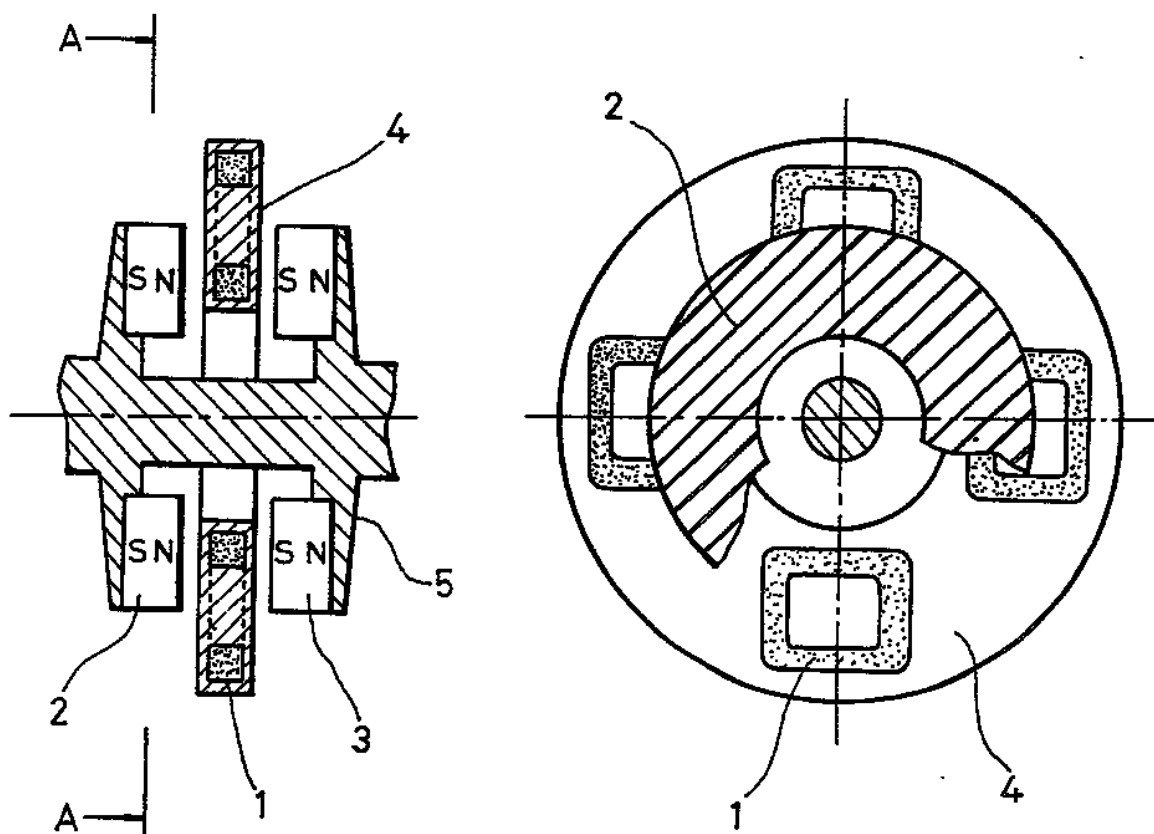


FIG 3

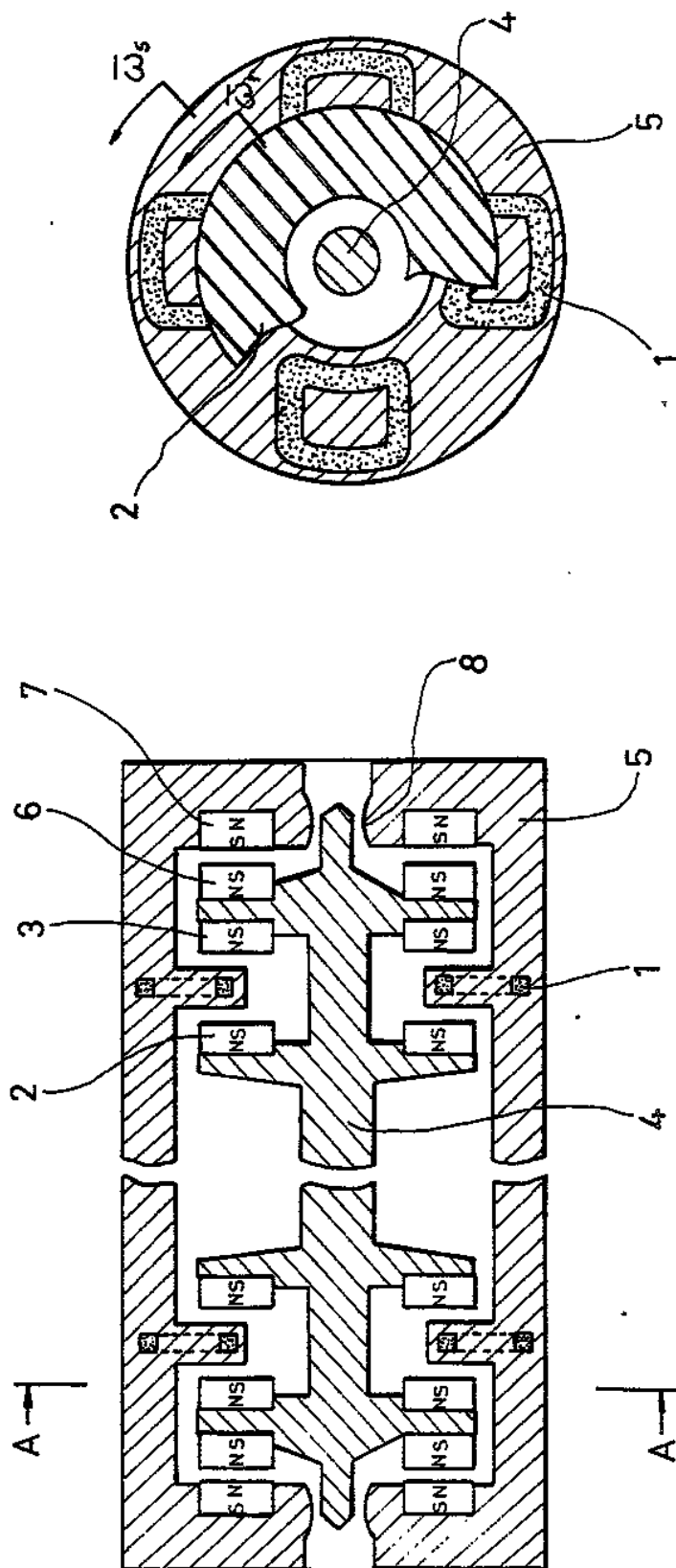


FIG 4

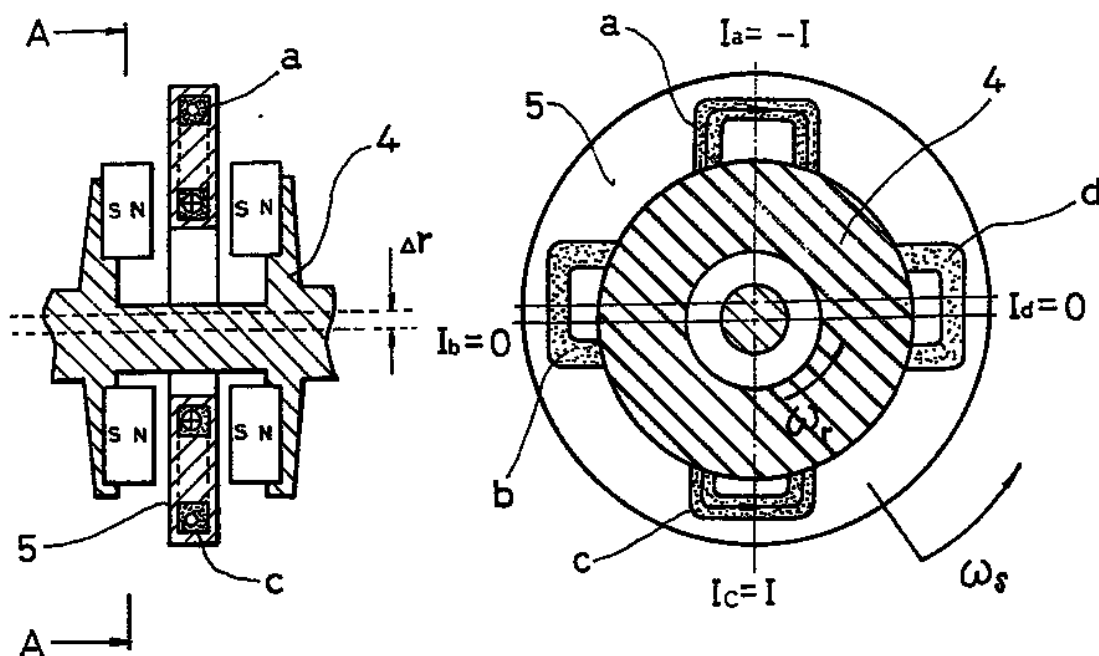


FIG 5

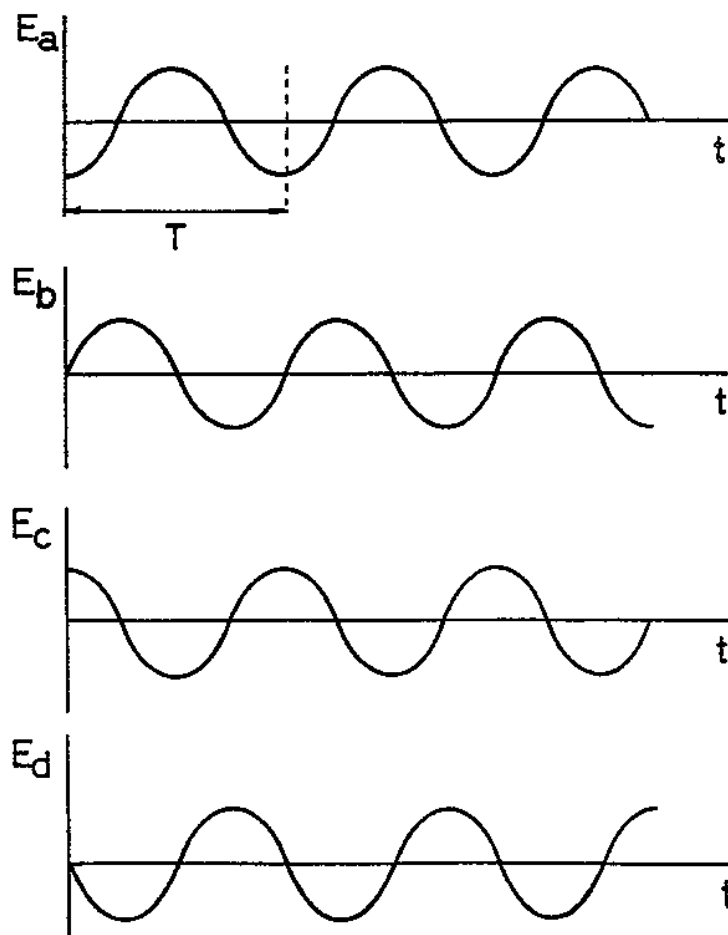


FIG 6

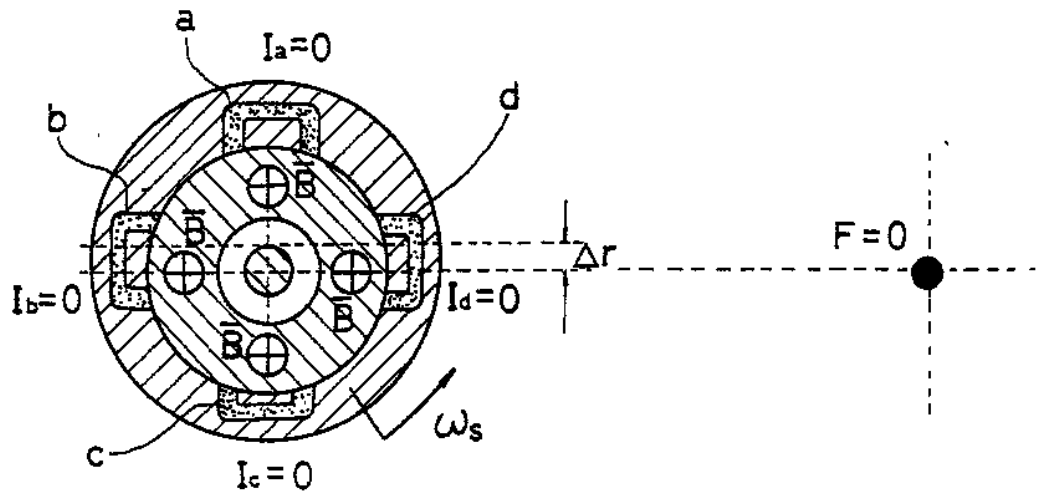


FIG 7

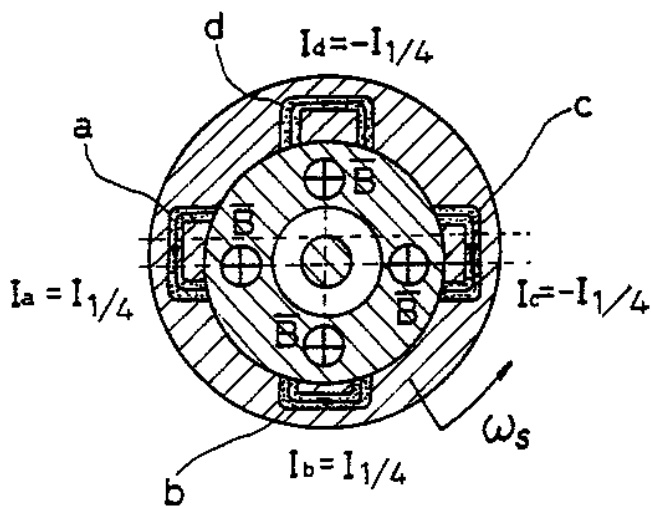


FIG 8

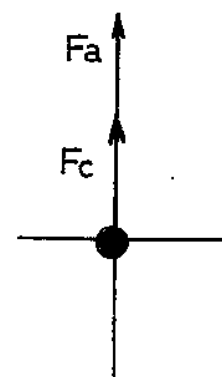
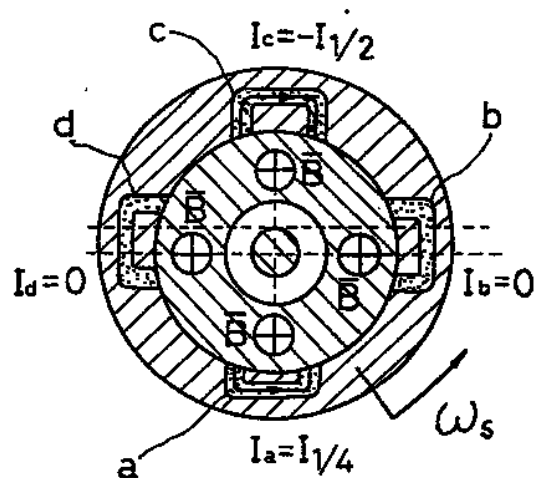


FIG 9

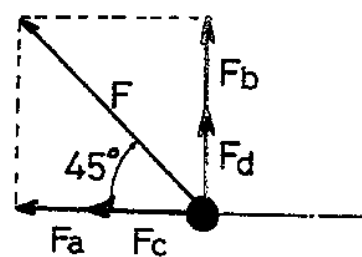
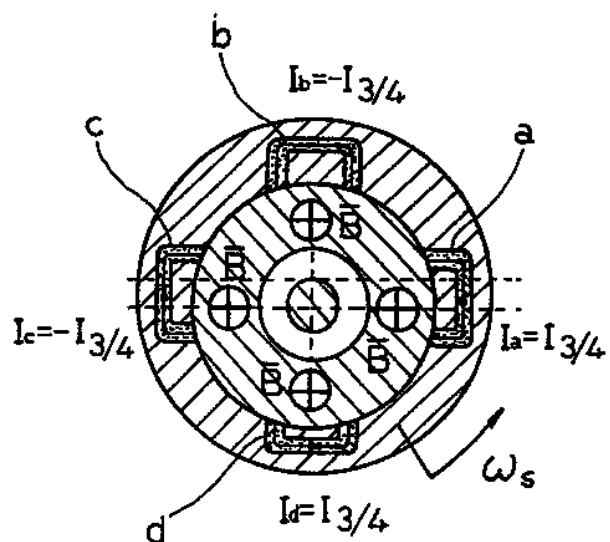


FIG 10

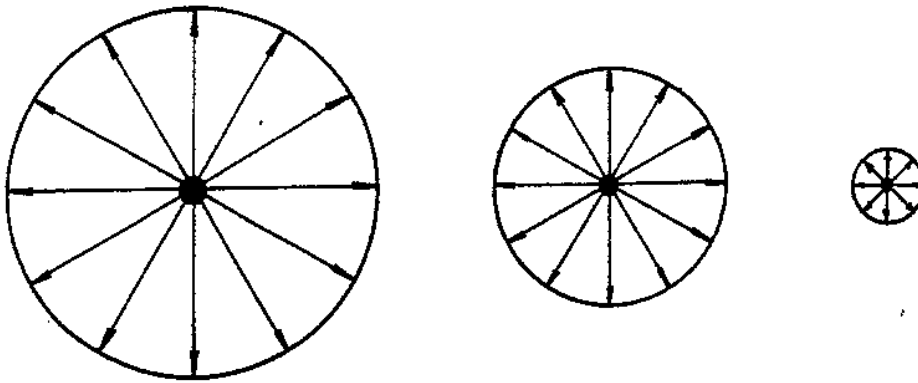


FIG 11

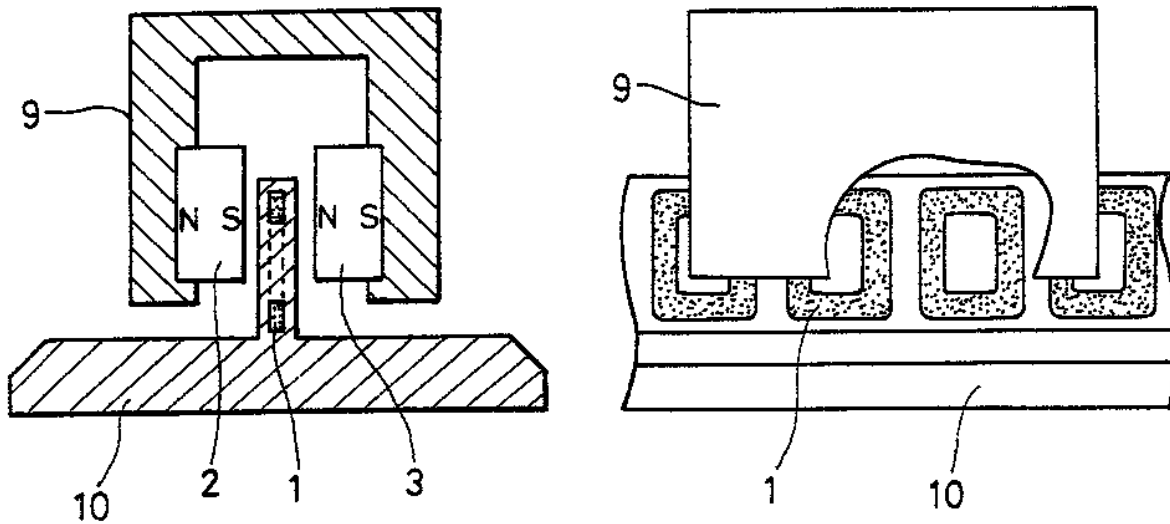


FIG 12

