

(12)

Patentschrift

(21) Anmeldenummer: A 2093/2006
(22) Anmeldetag: 19.12.2006
(45) Veröffentlicht am: 15.06.2024

(51) Int. Cl.: **F16C 32/04** (2006.01)
F16C 32/06 (2006.01)
H02K 7/09 (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:
DE 10005432 A1
DE 2213465 B2
US 2004256935 A1
DE 10034017 A1
JP 2002016125 A

(73) Patentinhaber:
SCHRÖDL MANFRED DIPL.ING. DR.
7223 SIEGGRABEN (AT)

(72) Erfinder:
SCHRÖDL MANFRED DR.
7223 Siegraben (AT)

(74) Vertreter:
Felfernig und Graschitz Rechtsanwälte GmbH
1010 Wien (AT)
Felfernig Oliver Dr.
1010 Wien (AT)

(54) MAGNETLAGEREINRICHTUNG

(57) Magnetlagereinrichtung (1) zur berührungslosen Lagerung eines beweglichen Körpers (2), wie eine Welle, mit einem stillstehenden Lagerteil (2), mit einem Permanentmagnetsystem (11) mit wenigstens einem Permanentmagneten (4, 4A, 4B) zur Erzeugung eines magnetischen Grundflusses (7, 8), und mit einem Steuerwicklungssystem (13) mit wenigstens einer Steuerwicklung (14, 15, 16) zur Erzeugung eines Steuerflusses (20), der im Betrieb ein von Abweichungen des Körpers (3) aus der Solllage abhängiger Steuerstrom (i) zuführbar ist; dabei sind Messmittel (36, 37, 38, 39) vorgesehen zur Messung einer auf eine bei einer Abweichung des Körpers (3) aus der Solllage auftretende Induktivitätsänderung des Steuerwicklungssystems (13) und/oder im Steuerwicklungssystem (13) induzierte Spannung bezogene elektrische Größe, aus der der Steuerstrom hergeleitet wird.

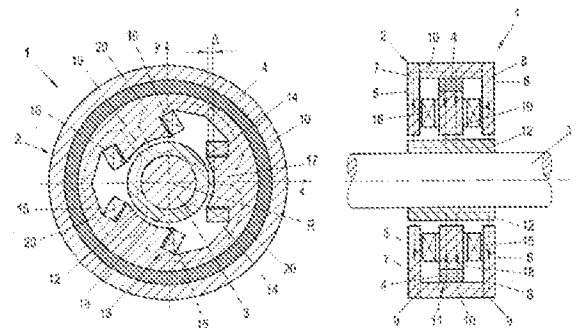


Fig. 1A

Fig. 1B

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Magnetlagereinrichtung zur berührungslosen Lagerung eines beweglichen Körpers, wie eine Welle, mit einem stillstehenden Lagerteil, mit einem Permanentmagnetsystem mit wenigstens einem Permanentmagneten zur Erzeugung eines magnetischen Grundflusses, und mit einem Steuerwicklungssystem mit wenigstens einer Steuerwicklung zur Erzeugung eines Steuerflusses, der im Betrieb ein von Abweichungen des Körpers aus der Soll-lage abhängiger Steuerstrom zuführbar ist.

[0002] Magnetlagereinrichtungen verwenden den Effekt, dass im Luftspalt zwischen einem bewegten Körper und einem unbewegten (Stator-)Lagerteil durch magnetische Flussdichten Kräfte auftreten, die quadratisch mit der Flussdichte ansteigen. Diese magnetischen Flüsse werden durch elektrische Ströme in Spulen oder durch Permanentmagnete hervorgerufen. Ausführungen mit Permanentmagneten haben den Vorteil, dass sie mit wesentlich weniger elektrischer Energie betrieben werden können, da die Permanentmagneterregung eine Grundflussdichteverteilung im Luftspalt erzeugt und ein zusätzliches elektrisches Wicklungssystem über eine Positionsregelung nur die Stabilisierung der zu regelnden Positionskordinaten übernimmt.

[0003] Aus dem Artikel von JUNH-SIK YIM et al „Sensorless position control of active magnetic bearings based on high frequency signal injection with digital signal processing“, 2004 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC 04, vol.3, 22. February 2004; IEEE ANAHEIM, CA, USA 26.February 2004; pages 1351-1354, ISBN: 978-0-7803-8269-5; ISBN: 0-78038269-2 ist eine Magnetlagereinrichtung mit einem Steuerwicklungssystem beschrieben, das zur Lagerung des in ihm befindlichen, beweglichen Körpers für vier Freiheitsgrade einen Steuerfluss erzeugt. Die Steuerströme werden durch Erfassung der Induktivitätsänderungen des Steuerwicklungssystems aufgrund der Auslenkung des in ihm befindlichen Körper erfasst.

[0004] Nachteilig ist hierbei, dass keine Spannungszeiger ausgewertet werden, sondern sinusförmige quasi-analoge Spannungen als Grundlage genommen werden.

[0005] Weiters ist aus der US 5 736 800 A ist eine Magnetlagereinrichtung beschrieben, bei der die Positionsbestimmung und die Regelung auf einen Freiheitsgrad pro Regelung bzw. Positionsbestimmung eingeschränkt ist. Dabei wird die positionsabhängige Induktivität nur in einer Raumrichtung ausgewertet. Die beiden Teilspulen liefern nur abhängige Induktivitätsänderungen, d.h., wenn die Induktivität der einen Teilspule L1 durch die Auslenkung größer wird, wird die Induktivität der entgegengesetzt liegenden Spule L2 in gleichem Maße kleiner. Nachteilig ist hierbei, dass keine Induktionsmessungen in mehr als einer Raumrichtung mit dieser Anordnung möglich ist.

[0006] Aus der US 2001/043450 A1 ist eine Servoregelung mit ferromagnetischem Kernmaterial und elektrischen Wicklungen basierend auf der Überwachung von Wicklungsströmen und -spannungen und der Ableitung des magnetischen Flusses, einer Kraftanzeige, und des magnetischen Spalts, einer Positionsanzeige beschrieben. Nachteilig ist hierbei, dass der Aktuator nur einen Freiheitsgrad aufweist.

[0007] In WO 01/48389 A ist eine solche Magnetlagereinrichtung beschrieben, welche eine Statorstruktur aufweist, bei der jeder zweite Statorzahn einen Permanentmagneten beinhaltet und die restlichen Zähne mit Steuerwicklungen versehen sind. Ein Nachteil dieser Anordnung ist, dass das Vorzeichen der Flussdichte im Luftspalt nach jedem Zahn wechselt, womit im magnetischen Rückschlussteil im beweglichen Körper (einer Welle) ein magnetisches Wechselfeld auftritt, das hohe Eisenverluste zur Folge hat.

[0008] Eine weitere Anordnung mit Permanentmagneterregung ist im Artikel von Kanne, Redemann: „Alles in der Schwebe“, Zeitschrift „Elektronik“, (18), 5. Sept. 2000, Bild 3, 4, angegeben. Hier wird der Fluss in einem axial magnetisierten Ring erzeugt, der auf beiden Seiten zu jeweils einem Spulensystem geleitet wird. Ein Nachteil dieser Anordnung ist, dass die Anordnung durch die zwei Spulensysteme teuer und voluminös wird.

[0009] Weiters sind in den oben beschriebenen Magnetlagereinrichtungen Sensoren zur Positi-

onserfassung vorgesehen, die die Lagerung zusätzlich verteuern und die mechanische Robustheit herabsetzen.

[0010] In der Veröffentlichung von Yoshida et. al.: „Self sensing active magnetic bearing using a new PWM amplifier equipped with a bias voltage source“, EPE Journal Vol. 15, No. 2, pp. 19ff, ist eine Lagerung angegeben, die mechanische Sensoren vermeidet, jedoch ist bei dieser Anordnung nachteilig, dass das Spulensystem als Differenzspulensystem mit Biasstrom ausgeführt ist, wodurch eine aufwändige Herstellung und Beschaltung sowie ein schlechter Wirkungsgrad die Folge sind.

[0011] Aufgabe der Erfindung ist es, die genannten Nachteile zu vermeiden und eine Magnetlagereinrichtung vorzusehen, die ohne mechanische Sensorik auskommt, und die sehr verlustarm bei gleichzeitig kompakten Abmessungen ausgeführt werden kann. Insbesondere wird eine einfache mechanische Anordnung in Kombination mit einer sensorlosen Lageerfassung angestrebt.

[0012] Zur Lösung der gestellten Aufgabe sieht die Erfindung eine Magnetlagereinrichtung mit den Merkmalen des unabhängigen Anspruchs vor. Vorteilhafte Ausführungsformen und Weiterbildungen sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben.

[0013] Die vorliegende Magnetlagereinrichtung mit permanentmagnetischer Vorspannung und sensorloser Positionsregelung eignet sich in vorteilhafter Weise zur berührungslosen Lagerung von beweglichen Körpern, wie insbesondere Wellen, wobei vor allem Instabilitäten in den radialen Koordinaten ausgeregelt werden und so die radiale Position des Körpers bzw. der Welle stabilisiert wird. Die axiale Koordinate ist entweder stabil und nicht geregelt, es ist aber auch denkbar, dass diese axiale Koordinate, sei sie stabil oder instabil, ebenfalls geregelt werden kann.

[0014] Bevorzugt wird der über einen Luftspalt in den beweglichen Körper (Rotor, Welle) übertretende Ruhefluss durch mindestens einen (kreis-)ringförmigen Permanentmagneten erzeugt; weiters wird es bevorzugt, dass entlang des Luftspaltumfangs kein Vorzeichenwechsel auftritt, wodurch die Bildung von Eisenverlusten stark unterdrückt wird. Der magnetische Fluss kann vom Magnetsystem über Zähne zum Luftspalt geführt werden, wobei die Zähne Steuerwicklungen des Steuerwicklungssystems tragen. Diese Steuerwicklungen erzeugen einen Steuerfluss, der zur Stabilisierung insbesondere der radialen Koordinaten verwendet wird. Der magnetische Kreis des Steuerflusses ist bevorzugt so gestaltet, dass er praktisch nicht durch die Permanentmagnete durchtritt, wodurch ein geringer magnetischer Widerstand entlang des Weges des Steuerflusses vorliegt und daher bei einem gegebenen Steuerstrom ein hoher Steuerfluss erzeugt wird, was einer vergleichsweise hohen Wicklungsinduktivität entspricht. Weiters kann der magnetische Pfad des Steuerflusses so gestaltet sein, dass sich die Wicklungsinduktivitäten bei Verschiebung des Körpers aus der Solllage (z.B. Drehachse) merkbar ändern, was durch eine geeignete Geometrie der Zahnordnung erreicht werden kann. Beispielsweise kann hierfür eine Anordnung von drei um jeweils 120° zueinander versetzten Zähnen vorgesehen werden.

[0015] Zur Verhinderung von Wirbelströmen zufolge transienter Steuerstromführung wird das magnetisch leitfähige Material im Bereich des Steuerflusses vorzugsweise geblecht oder gesintert, allgemein Wirbelstrom-unterdrückend bzw. mit geringem elektrischen Leitwert, ausgeführt.

[0016] Der Rückschluss des Grundflusses der Permanentmagneterregung erfolgt über Rückschlusssteile, die nicht vom Steuerfluss durchsetzt sind und daher bevorzugt nicht geblecht ausgeführt werden. Diese Rückschlusssteile werden bevorzugt in der Nähe der Spulenköpfe zur Welle geführt. Der Grundfluss tritt aus dem Permanentmagnetsystem aus, geht über einen ersten Rückschlusssteil zum ersten Rückschlussluftspalt, tritt über diesen Luftspalt in den Körper bzw. die Welle ein, läuft im Wesentlichen axial durch den Körper bzw. die Welle bis zu einem zweiten Rückschlusssteil, durchquert den zweiten Rückschlussluftspalt und schließt sich über den zweiten Rückschlusssteil zurück.

[0017] Der Übergang vom Rückschlusssteil in den Körper bzw. in die Welle kann auch so gestaltet werden, dass eine passive axiale Rückstellkraft erzeugt wird, so dass das Lager in axialer Richtung passiv stabilisiert wird. Dies kann dadurch erreicht werden, dass die im Gebiet des Luftspalts gespeicherte magnetische Energie bei einer axialen Abweichung von der axialen Sollposition in

beiden Richtungen steigt.

[0018] Mit Vorteil wird der freie Raum zwischen den Rückschlüssen und den Zähnen zur Unterbringung von elektronischen Komponenten genutzt. Dadurch können zumindest Teile der elektronischen Steuerung einschließlich des Leistungsteiles in ansonsten ungenützten Raumbereichen innerhalb des Magnetlagers untergebracht werden, und der Platz wird vorteilhaft genutzt. Somit ist ein sehr kompaktes Gesamtsystem möglich. Weiters wird dadurch die EMV-Abstrahlung durch ansonsten außen liegende Leitungen zwischen Steuerwicklung und Leistungselektronik ohne zusätzliche, kostenaufwendige Maßnahmen, wie Abschirmungen, verhindert.

[0019] In einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung wird das Rückschlussmaterial als Gehäuseeteil und/oder als Kühlkörper genutzt. Damit wird eine mehrfache Funktion des Rückschlusses als magnetisches, geometrisches, elektromagnetisch schirmendes und thermisches Bauelement erzielt.

[0020] Weiters ist es günstig, die Rückschlusssteile mit einem weiteren Steuerwicklungssystem zu versehen, welches einen weiteren Steuerfluss erzeugt, der axiale Kräfte hervorruft. Dadurch kann die axiale Positions-Komponente aktiv mit Steuerstrom geregelt werden. Dadurch wird eine sehr kompakte, drei Freiheitsgrade aktiv stabilisierende Magnetlagereinrichtung erhalten.

[0021] Zur Erzielung eines axial wirkenden Steuerflusses, der den radial wirkenden Steuerfluss nicht beeinflusst, können zwei mit gleicher Durchflutung beaufschlagte Steuerwicklungssysteme auf dem linken und rechten Rückschlusssteil angeordnet werden. Gemäß dem Durchflutungssatz dringt dann kein axial wirkender Steuerfluss in den magnetischen Kreis des radial wirkenden Steuerflusses ein. Die Rückschlussluftspalten sind in diesem Fall zweckmäßig geometrisch so zu gestalten, dass eine möglichst große axial wirkende Kraftkomponente bei einer Beaufschlagung mit Steuerfluss erzeugt wird. Dies wird durch einen mit einer hohen Axialkomponente über den Luftspalt übertretenden Fluss erreicht. Durch eine Ausführung einer von der Axialposition abhängigen Induktivität des axialen Steuerwicklungssystems kann wiederum eine indirekte Positionserfassung durch Strommessungen erreicht werden. Dabei ist beispielsweise einer der Luftspalte des Rückschlussystems völlig senkrecht ausgeführt, wodurch ein völlig axialer Übertritt des axialen Steuerflusses und des Grundflusses auftritt. Der andere Luftspalt des Rückschlussystems wird hingegen bevorzugt schräg oder aber horizontal (achsparell) ausgeführt, wodurch bei einer axialen Auslenkung des Körpers die beiden magnetischen Wege über die beiden Luftspalten unterschiedlich verändert werden und sich dadurch die Induktivität mit der Auslenkung ändert. Durch eine Kombination von zwei solchen, spiegelverkehrt angeordneten Rückschlussgeometrien mit mindestens einem axialen Steuerwicklungssystem kann die Axialkraft in Summe kompensiert werden und die Gesamtanordnung in einem instabilen Gleichgewichtspunkt überführt (eingestellt) werden. Hierzu kann eine einfache Anordnung dahingehend vorgesehen werden, dass im Fall der berührungslosen Lagerung einer Welle ein Magnetlager mit axialem Steuerwicklungssystem und ein Magnetlager ohne axiales Steuerwicklungssystem vorgesehen sind.

[0022] In einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung wird sowohl der radiale Steuerfluss als auch der axiale Steuerfluss auf magnetischen Pfaden geführt, die nicht über das Permanentmagnetsystem führen. Dies ist beispielsweise dadurch möglich, dass das Permanentmagnetsystem als radial magnetisierter Ring ausgebildet ist, der im radialen Anschluss an das radiale Steuerflusssystem angeordnet ist. Das radiale Steuerflusssystem ist innerhalb davon mit einer magnetisch gut leitenden Verbindung zwischen den Wicklungen ausgeführt, das axiale Steuerflusssystem ist außerhalb des Magneten durchgehend aus magnetisch gut leitendem Material ausgeführt.

[0023] Die Steuerwicklungen des Steuerwicklungssystems können in einer Sternschaltung oder in einer Dreieckschaltung zusammengeschaltet sein, sie können aber selbstverständlich auch getrennt angesteuert werden.

[0024] Bevorzugt weisen die Messmittel Strommessmittel mit wenigstens einem Strommeselement auf; das Strommeselement kann z.B. in einem Stromversorgungskreis für Leistungsschalter, die dem Steuerwicklungssystem zugeordnet sind, vorgesehen sein, oder es können mehrere Strommeselemente in den einzelnen Phasen zu bzw. von den Leistungsschaltern vorgesehen

werden.

[0025] Die Erfindung wird nachfolgend anhand von in der Zeichnung veranschaulichten bevorzugten Ausführungsbeispielen, auf die sie jedoch nicht beschränkt sein soll, noch weiter erläutert. In der Zeichnung zeigen im Einzelnen:

[0026] Die Fig. 1A und 1B in einem Querschnitt bzw. Axialschnitt eine erste Ausführungsform einer Magnetlagereinrichtung für eine umlaufende Welle;

[0027] Fig. 2A und 2B in einem Querschnitt bzw. Axialschnitt eine zweite Ausführungsform der erfindungsgemäßen Magnetlagereinrichtung;

[0028] Fig. 3 einen Axialschnitt einer dritten Ausführungsform der erfindungsgemäßen Magnetlagereinrichtung;

[0029] Fig. 3A in einer der Fig. 3 ähnlichen Schnittansicht eine Anordnung mit einer Welle die in zwei Magnetlagern berührungslos gelagert ist;

[0030] Fig. 4 in einem Diagramm einen Spannungsraumzeiger, zwecks Veranschaulichung von drei verschiedenen Messrichtungen für die Positionsregelung bei der erfindungsgemäßen Magnetlagereinrichtung;

[0031] Fig. 5 ein Blockschaltbild von Spannungsversorgungs- und Messmitteln mit einem Stromversorgungs-Zwischenkreis, mit einer Zwischenkreis-Strom- und Spannungsmessung, für eine Magnetlagereinrichtung; und

[0032] Fig. 6 einen Querschnitt durch eine erfindungsgemäße Magnetlagereinrichtung, wobei schematisch die Nutzung von freien Räumen zwischen den elektromagnetischen Bauteilen bzw. Rückschlussteilen der Magnetlagereinrichtung für elektronische Komponenten schematisch veranschaulicht ist.

[0033] In Fig. 1 (Fig. 1A und 1B) ist eine Magnetlagereinrichtung 1 mit einem stillstehenden Lagerteil 2 (nachstehend kurz Stator 2 genannt) und einem beweglichen Körper 3 in Form einer umlaufenden Welle (nachstehend kurz Welle 3 genannt) veranschaulicht. Der Stator 2 weist einen kreisringförmigen Permanentmagneten 4 auf, dem zum Rückschluss des vom Permanentmagneten 4 erzeugten Grundflusses Rückschlussteile 5, 6 zugeordnet sind. In Fig. 1B sind Grundfluss-Feldlinien bei 7 bzw. 8 veranschaulicht. Die Rückschlussteile 5, 6 können durch Kreistringscheiben gebildet sein, die im Bereich von durch strichlierte Linien 9 veranschaulichte Grenzflächen an einen äußeren Kreisring 10 anschließen, der an seiner Innenseite den Permanentmagneten 4 trägt. Das so gebildete Permanentmagnetsystem 11 mit dem Permanentmagnet 4, der radial magnetisiert ist, erzeugt somit einen Grundfluss 7, 8, der ausgehend vom Permanentmagneten 4 beispielsweise zur Welle 3 hin verläuft, auf der im Bereich des Stators 2 ein ferromagnetisch leitender Ring 12 aufgebracht ist, durch den der Grundfluss in Axialrichtung zu den beiden äußeren Rückschlussteilen 5, 6 hin und durch diese sowie durch den äußeren Kreisring 10 zurück zum Permanentmagneten 4 verläuft.

[0034] Die Magnetlagereinrichtung 1 gemäß Fig. 1 weist weiters ein Steuerwicklungssystem 13 mit Steuerwicklungen 14, 15 und 16 an radialen Zähnen 17, 18, 19 auf. Diese radialen Zähne 17, 18, 19 sind jeweils um 120° zueinander versetzt, radial innerhalb des Permanentmagneten 4 angeordnet, und sie tragen jeweils eine der Steuerwicklungen 14, 15 bzw. 16. In Fig. 1A sind weiters mit strichlierten Linien Steuerfluss-Feldlinien 20 angedeutet, wie sie jeweils durch zwei benachbarte Steuerwicklungen 14-15, 15-16, 16-14 hervorgerufen werden, wobei diese Steuerfluss-Feldlinien 20 im inneren Bereich ebenfalls durch den Ring 12 auf der Welle 3 verlaufen. Bei Abweichungen der Welle 3 aus der dargestellten exakten Mittenposition kann eine Rückführung der Welle 3 in diese Mittenposition mit Hilfe des Steuerflusses 20 erreicht werden, wie nachstehend noch näher erläutert werden wird.

[0035] In Fig. 2A und 2B ist eine der Magnetlagereinrichtung 1 gemäß Fig. 1A und 1B weitgehend gleiche Magnetlagereinrichtung 1, vor allem was das Steuerwicklungssystem 13 anlangt, veran-

schaulich, jedoch ist im Unterschied zur Magnetlagereinrichtung 1 gemäß Fig. 1 ein Permanentmagnetsystem 11 mit zwei axial magnetisierten ringförmigen Permanentmagneten 4A und 4B gezeigt. Aus Fig. 2B ist dabei wieder ein ähnlicher Verlauf der Grundfluss-Feldlinien 7 bzw. 8 wie in Fig. 1B gezeigt ersichtlich, wobei dieser Grundfluss 7, 8 wiederum in axialer Richtung innen durch den Ring 12 auf der Welle 3 verläuft.

[0036] Dieser Ring 12 hat im Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 2B im Bereich zwischen den Luftspalten 21, wo der Grundfluss vom Stator 2 zum Ring 12 bzw. zurück hindurchtritt, Ausnehmungen 22, um so die Feldlinien 7 bzw. 8 im Bereich der Luftspalte 21 zu konzentrieren und dadurch eine gute passive axiale Stabilisierung der Position der Welle 3 relativ zum Stator 2 zu erreichen.

[0037] Das Steuerwicklungssystem 13 ist wiederum mit Wicklungen 14, 15, 16 und Zähnen 17, 18, 19 gebildet; in der Fig. 2A sind wiederum Steuerfluss-Feldlinien 20 strichliert eingezeichnet.

[0038] Im Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 3, das als Weiterbildung der Magnetlagereinrichtung 1 gemäß Fig. 1B angesehen werden kann, sind die Rückschlussteile 5, 6 mit einem zusätzlichen Steuerwicklungssystem 23 für eine axiale Stabilisierung der Welle 3 versehen; innerhalb der hierfür vorgesehenen Steuerwicklungen 24A, 24B liegt innerhalb der Rückschlussteile 5, 6 das Steuerwicklungssystem 13 für die radiale Stabilisierung der Welle 3, wie bereits vorstehend anhand der Fig. 1 und 2 erläutert worden ist. In Fig. 3 ist eine Axial-Steuerfluss-Feldlinie 24 symbolisch veranschaulicht, wobei dieser axiale Steuerfluss 24 durch das weitere Steuerwicklungssystem 23 für die axiale Stabilisierung erzeugt wird. Die Steuerwicklungen 24A, 24B für die axiale Stabilisierung sind dabei in Serie geschaltet. Der axiale Steuerfluss 25 erzeugt axiale Kräfte, wobei die axiale Komponente für die Stabilisierung mit einem gesonderten Steuerstrom geregelt werden kann. Dadurch wird für alle drei Freiheitsgrade der Welle 3 eine aktive Stabilisierung erzielt und dies in einer außerordentlich kompakten Bauweise.

[0039] Der axial wirkende Steuerfluss 25, der den radial wirkenden Steuerfluss 20 (in Fig. 1A bzw. 2A) nicht beeinflusst, wird wie erwähnt durch die zwei vorzugsweise in Serie geschalteten Steuerwicklungen 24, je eine auf einem Rückschlussteil 5 bzw. 6, vorgesehen, wobei eine gleiche Durchflutung gegeben ist, so dass in der Folge kein axial wirkender Steuerfluss in den magnetischen Kreis des radial wirkenden Steuerflusses 20 eindringt.

[0040] Die Rückschluss-Luftspalten 21A, 21B unterscheiden sich von jenen gemäß Fig. 1B bzw. 2B, wie aus der Darstellung von Fig. 3 unmittelbar ersichtlich ist. Im Einzelnen ist der gemäß der Darstellung in Fig. 3 linke Rückschlussteil 5 innen abgeschrägt, ähnlich wie der Ring 12 an dieser Stelle, wodurch ein schräg verlaufender Luftspalt 21A des Rückschlusssystems erhalten wird, im Gegensatz zum radialen Luftspalt 21B zwischen der rechten Stirnseite des Rings 12 und der Innenseite des Rückschlussteiles 6. Dadurch werden bei einer axialen Auslenkung der Welle 3 die magnetischen Wege über die beiden Luftspalte 21A, 21B verschieden verändert, wodurch sich auch die Induktivität mit der Auslenkung entsprechend ändert. Auf diese Weise kann bei Messung der Änderung der von der Axialposition abhängigen Induktivität des axialen Steuerwicklungssystems eine indirekte Positionserfassung in axialer Richtung durch Strommessung durchgeführt werden.

[0041] Anstatt eines schräg verlaufenden Luftspalts 21A ist auch ein horizontal, d.h. achsparallel verlaufender Luftspalt 21a vorgesehen, wie dies beispielsweise aus Fig. 3A ersichtlich ist. In dieser Fig. 3A ist eine Welle 3 mit zwei Magnetlagern 1 mit spiegelbildlicher Geometrie gezeigt, wobei das in Fig. 3A rechte Magnetlager im Wesentlichen dem in Fig. 3 gezeigten Magnetlager entspricht, mit der Ausnahme, dass eben anstatt des schrägen Luftspalts 21A ein achsparalleler Luftspalt 21a vorgesehen ist. Derartige achsparallele Luftspalte 21a sind besonders einfach in der Herstellung, besonders wirksam im Betrieb.

[0042] Aus Fig. 3A ist weiters zu ersehen, dass im Fall von zwei Magnetlagern wie sie für die Lagerung einer Welle 3 erforderlich sind, zweckmäßig in eine spiegelsymmetrische Geometrie vorgesehen wird, und dass es genügt, nur einmal, d.h. bei einem Magnetlager 1, in Fig. 3A bei dem rechten Magnetlager 1, Steuerwicklungen 24A, 24B für die axiale Positionsregelung vorzusehen; beim zweiten, in Fig. 3A linken Magnetlager 1 kann eine derartige Steuerwicklung entfal-

len, wenngleich es aber selbstverständlich auch möglich ist, auch dort Steuerwicklungen wie die Steuerwicklungen 24A, 24B vorzusehen.

[0043] Bei allen Ausführungsformen ist der magnetische Pfad des Steuerflusses 20 bzw. 25 so gestaltet, dass sich die Wicklungsinduktivitäten bei einer Verschiebung des Körpers 3 (der Welle bzw. des Rotors 3) aus der Sollage, beispielsweise in radialer Richtung oder aber auch in axialer Richtung, merkbar ändern, was durch die gezeigte Geometrie der Zahnordnung bzw. der Luftspaltanordnung sichergestellt wird. Im Hinblick auf radiale Abweichungen des Körpers 3 aus der Sollage ist beispielsweise die aus den Fig. 1A und 2A ersichtliche Anordnung mit drei um 120° zueinander versetzten Zähnen 17, 18, 19 von besonderem Vorteil. Ohne Beschränkung der Allgemeinheit wird angenommen, dass die Zahnachse des ersten Zahns 17 in der x-Richtung liegt, die Zahnachse des zweiten Zahns 18 um 120° gegenüber der x-Richtung verdreht ist und die Zahnachse des dritten Zahns 19 um 240° gegenüber der x-Richtung verdreht ist. Weiters wird angenommen, dass die Wicklung 14 des ersten Zahns 17 einen Steuerstrom führt und damit einen Steuerfluss 20 produziert. Dann tritt der Steuerfluss 20 aus dem ersten Zahn 17 senkrecht in den Luftspalt mit der Breite Δ ein, überquert diesen, tritt senkrecht in den Rotor 3 ein, verteilt sich und tritt über den Luftspalt senkrecht aus und in den zweiten und dritten Zahn 18 bzw. 19 ein. Sodann schließt sich der Steuerfluss 20 fast ohne weiteren magnetischen Widerstand zurück zum ersten Zahn 17. Die Induktivität dieser Anordnung ergibt sich als Quotient von Steuerflussverkettung der bestromten Wicklung zum Strom durch die Wicklung. Sie nimmt mit steigendem Luftspalt Δ ab und kann über den bekannten Durchflutungssatz bestimmt werden.

[0044] Verschiebt man nun die Welle 3 in Richtung x (= Symmetrieachse der Wicklung 14 des ersten Zahns 17) um den Betrag dx aus dem Zentrum und verfolgt wiederum den Fluss 20, so ist sein Weg über den Luftspalt im Bereich der Zahnachse des ersten Zahns 17 nun auf den Wert $(\Delta - dx)$ verkleinert, sein Weg im Bereich der anderen Zähne 18, 19 jedoch auf $(\Delta + dx/2)$ angewachsen, da der radiale Fluss 20 praktisch senkrecht den Luftspalt durchquert. Somit ändert sich die Induktivität L am ersten Zahn 17 in Abhängigkeit von der Auslenkung dx auf:

$$L(dx) = \Psi(dx)/i = f(dx)$$

wobei

$f(dx)$ eine in dx monotone Funktion und

$\Psi(dx)$ die bei festem Strom durch die Wicklung 14 von dx abhängige Flussverkettung der Wicklung 14 darstellt.

[0045] Verallgemeinert man weiter die Auslenkung aus der Rotationsachse R in eine beliebige Richtung, repräsentiert durch ein Paar von Auslenkungen dx und dy , so kann als neue Auslenkungsvariable ein Auslenkungsvektor mit den zwei Parametern Auslenkungsradius

$dr = \sqrt{dx^2 + dy^2}$ und Auslenkungswinkel $\gamma = \arctg(dy/dx)$ definiert werden.

[0046] Wird nun auf ein allgemeines stromführendes Wicklungssystem 13 bzw. 14, 15, 16 verallgemeinert, wobei angenommen die Steuerwicklungen 14, 15, 16 vorzugsweise in Stern zusammengeschaltet werden, (vgl. auch Fig. 5), so kann eine komplexe Drehstrominduktivität $\underline{\ell}$ aus dem Verhältnis des Flussverkettungsraumzeigers zum Stromraumzeiger angegeben werden. Dieser Parameter ist nach Differenzieren seiner Definition messtechnisch zugänglich. Dabei kann die Flussverkettungsableitung bei hinreichend kleinem Ohm'schen Widerstand gleich dem angelegten Klemmenspannungsraumzeiger \underline{u}_s gesetzt werden:

$$l := \underline{u}_s / (d i_s / d \tau)$$

[0047] Zur Ermittlung des Auslenkungsvektors für die Auslenkung aus der zentralen Position der Welle 3 auf Basis schwankender magnetischer Leitfähigkeit entlang des Lagerluftspalts wird nun ein Umrichter 30 (Fig. 3) mit einer Abfolge von Spannungsraumzeigern \underline{u}_s beaufschlagt und jeweils die Stromreaktion $d i_s / d \tau$ gemessen.

[0048] Für die praktische Realisierung auf einem Prozessorsystem 31 (s. Fig. 5) in Echtzeit ist es oft günstiger, mit dem Kehrwert \underline{y} der komplexen Induktivität zu arbeiten, da dabei Divisionen

vermieden werden können und so Rechenzeit gespart wird:

$$\underline{y} = \underline{l}^{-1}$$

[0049] Führt man skalare (lokale) inverse Induktivitätsparameter γ_0 und $\Delta\gamma$ ein, so lässt sich die komplexe Funktion \underline{y} modellieren zu

$$\underline{y} = y_0 + \Delta y \cdot e^{j[\gamma - \arg(\underline{u}_s)]}$$

[0050] Dies ist der Verlauf der komplexen Ortskurve in Abhängigkeit von den beiden Winkelparametern Spannungsraumzeigerwinkel $\arg(\underline{u}_s) = \gamma_U$ und Argument des Auslenkungsvektors γ .

[0051] Die Funktion beschreibt einen Kreis mit dem Radius Δy und dem Offset y_0 . Der Radius Δy hängt über eine monotone Funktion mit der Exzentrizität dr zusammen und entartet zu Null, wenn das Magnetlager, d.h. die Welle 3, genau zentriert ist.

[0052] Der Stromänderungsraumzeiger \underline{i}_s kann gedanklich von zwei Teilzeigern gebildet werden. Der erste Teilzeiger ist durch die mittlere inverse Induktivität bestimmt und zeigt immer in die Richtung des angelegten Testspannungsraumzeigers. Der zweite Teilzeiger ist durch die momentane Lagerexzentrizität festgelegt. Die Auslenkungsvektor-Richtungsinformation $e^{j\gamma}$ des zweiten Teilzeigers legt die Richtung fest, und die Auslenkungsvektor-Betragsinformation Δy legt die Intensität der Auslenkung des Lagers aus der Mittelposition fest.

[0053] Für eine feste Stellung der Welle 3 (dies entspricht im Echtzeitbetrieb einer Messfolge innerhalb hinreichend kurzer Zeit) sind mittels des Umrichters 30 drei verschiedene Messrichtungen, d.h. Spannungsraumzeigerrichtungen, möglich. In Fig. 4 sind die mit einem drei-phasigen Wechselrichter realisierbaren Spannungsraumzeiger dargestellt und gemäß folgender Tabelle 1 bezeichnet:

[0054] Tabelle 1:

u+	$\frac{2}{3} \cdot u_{ZK} \cdot e^{j0^\circ}$
v+	$\frac{2}{3} \cdot u_{ZK} \cdot e^{j120^\circ}$
w+	$\frac{2}{3} \cdot u_{ZK} \cdot e^{j240^\circ}$

u-	$\frac{2}{3} \cdot u_{ZK} \cdot e^{j180^\circ}$
v-	$\frac{2}{3} \cdot u_{ZK} \cdot e^{j300^\circ}$
w-	$\frac{2}{3} \cdot u_{ZK} \cdot e^{j60^\circ}$

[0055] Dabei gilt für Kurzschluss (KS): $\underline{u}_s=0$

[0056] Anzumerken ist, dass Spannungsraumzeiger in die antiparallele Richtung keine neue Information liefern, da die Gleichungen linear abhängig sind. Damit werden maximal drei unabhängige komplexe Gleichungen erhalten. Ein Aufspalten in Real- und Imaginärteile erzeugt maximal sechs reelle Gleichungen für den (für die Exzentrizitätsermittlung unbedeutenden) Parameter y_0 und für die gesuchten Zustandsgrößen Δy und γ , also für die Auslenkungsvektor-Richtung und -Intensität. Als Bekannte in diesem Gleichungssystem gelten der Spannungsraumzeiger und der Stromanstiegsraumzeiger. Da dieses Gleichungssystem überbestimmt ist, sind mehrere Messstrategien und Auswertungsstrategien möglich. Als ein Beispiel sei angenommen, dass innerhalb kurzer Zeit drei Messungen in den drei möglichen Spannungsraumzeigerrichtungen ausgeführt werden. In der Auswertung werden beispielsweise nur die Realteile der Messgleichungen zur

Auswertung herangezogen. Die Argumente der Spannungsraumzeiger während der Messungen Nr. 1, 2, 3 seien $\gamma_{U,1} = 0$ (Strangachse A), $\gamma_{U,2} = 2\pi/3$ (Strangachse B), $\gamma_{U,3} = 4\pi/3$ (Strangachse C) entsprechend den Umrichterzuständen „1,0,0“, „0,1,0“ und „0,0,1“. Die Magnetlagereinrichtung reagiert demgemäß mit Stromänderungen Δi während der Messzeit $\Delta\tau$ ($k = 1, 2, 3$) wie folgt:

$$\underline{\Delta i}_{S,k} = \underline{y} \cdot \Delta\tau \cdot |\underline{u}_s| \cdot \exp(j\gamma_{u,k})$$

[0057] Dabei kann die Zwischenkreisspannung aufgrund der kurzen Messzeit als konstant während der gesamten Messung vorausgesetzt werden. Eine Multiplikation der obigen Gleichung mit $\exp(-j\gamma_{u,k})$ kann als Transformation der Raumzeigergrößen von Spannung und Stromänderung in das jeweilige spannungsfeste Koordinatensystem interpretiert werden, in welchem der Spannungsraumzeiger in die reelle Achse zeigt. Der Stromänderungsraumzeiger $\underline{\Delta i}_{s,k}$ ist in diesem Koordinatensystem proportional zu \underline{y} :

$$\underline{\Delta i}_{S,k} \cdot \exp(-j\gamma_{u,k}) = \underline{y} \cdot \Delta\tau \cdot |\underline{u}_s|$$

[0058] Der Realteil dieser Gleichung ist die Projektion des Stromraumzeigeranstiegs auf die aktuelle Messrichtung und somit der Strangstromanstieg selbst. Für die drei Messungen ergeben sich folgende Realteilgleichungen in den entsprechenden spannungsraumzeigerfesten Koordinatensystemen (Messungen Nr. 1, 2, 3 sowie Phasen A, B, C):

$$\Delta i_{SA,1} = \Delta\tau \cdot |\underline{u}_s| \cdot [y_0 + \Delta y \cdot \cos(\gamma)]$$

$$\Delta i_{SB,2} = \Delta\tau \cdot |\underline{u}_s| \cdot [y_0 + \Delta y \cdot \cos(\gamma - 2\pi/3)]$$

$$\Delta i_{SC,3} = \Delta\tau \cdot |\underline{u}_s| \cdot [y_0 + \Delta y \cdot \cos(\gamma + 2\pi/3)]$$

[0059] Mit diesen drei Gleichungen kann der Parameter y_0 eliminiert (oder auch ausgerechnet) und können die gesuchten Zustandsgrößen Δy und γ berechnet werden. Beispielsweise fällt bei einer geeigneten komplexen Transformation der obigen drei Gleichungen der Form

$$\underline{c} := \Delta i_{SA,1} + \Delta i_{SB,2} \exp(j2\pi/3) + \Delta i_{SC,3} \exp(j4\pi/3)$$

der Parameter y_0 als Nullgröße heraus, und es ergibt sich c zu einem offsetfreien Kreis in der komplexen Ebene mit dem gesuchten Radius Δy und dem gesuchten Argument γ .

[0060] Auf diese Weise können die gesuchten Auslenkungs-Parameter des Magnetlagers rein aus der Messung von Zwischenkreis-Stromgrößen i bestimmt werden, wie auch Fig. 5 zeigt. In ähnlicher Weise kann ferner im Fall der axialen Stabilisierung (s. Fig. 3, Steuerfluss 25) vorgegangen werden.

[0061] Im Einzelnen veranschaulicht Fig. 5 eine Magnetlagereinrichtung 1 mit zugehörigen Umrichter 30 für die beispielsweise in Sternschaltung (gegebenenfalls aber auch in Dreieckschaltung oder einzeln angesteuert) geschalteten, in Fig. 5 nicht näher ersichtlichen Steuerwicklungen 14, 15, 16 des Steuerwicklungssystems 13 (s. Fig. 1 und 2). Dieser Magnetlagereinrichtung 1 und dem zugehörigen Umrichter 30 ist ein Zwischenkreis 32 zugeordnet, über den die Spannungs- bzw. Stromversorgung der Steuerwicklungen von einem Spannungsversorgungsteil 33 her erfolgt. Dem Spannungsversorgungsteil 33 wird beispielsweise eine Dreiphasen-Wechselspannung zugeführt, die in einem nicht näher veranschaulichtem Umrichterteil gleichgerichtet wird, um so einen Zwischenkreis-Gleichstrom i bzw. eine Zwischenkreis-Gleichspannung U zu erzeugen. Zur - vorzugsweise potential-gebundenen - Messung des Stroms i ist ein Widerstand 34 vorgesehen, wobei nur ganz schematisch innerhalb des Prozessorsystems 31 veranschaulichte Messmittel 35 mit diesem Strommesswiderstand 34 zusammenwirken, und den Strom wie vorstehend bereits ausführlich beschrieben zu messen. Zusätzlich zu dieser Strommessung mit den Mitteln 34, 35 kann auch die an einem Kondensator 36 anliegende Spannung U beispielsweise über einen Spannungsteiler 37 mit Widerständen 38, 39 abgegriffen und mit den Messmitteln 35 gemessen werden. Auch hier liegt somit vorzugsweise eine potentialgebundene Spannungsmessung vor. Eine derartige Spannungsmessung ist nicht unbedingt erforderlich, kann jedoch zur

Erhöhung der Genauigkeit zweckmäßig sein.

[0062] Anstatt des in Fig. 5 gezeigten einen Strommesswiderstands 34 im Zwischenkreis 32 ist es auch denkbar, entsprechende Strommesswiderstände 34A, 34B, 34C bzw. 34a, 34b, 34c vor bzw. nach dem Umrichter 30 in den einzelnen Phasen anzuordnen, wie in Fig. 5 mit strichlierten Linien angedeutet ist. (Selbstverständlich sind dann entsprechende Messleitungen, die in Fig. 5 nicht dargestellt sind, zum Prozessorsystem 31 bzw. den darin realisierten Messmitteln 35 vorzusehen.)

[0063] Dem Prozessorsystem 31 ist im vorliegenden Beispiel weiters, mit Potentialtrennung 40, ein Leitreechner 41 zugeordnet um übergeordnete Steuer- oder Diagnosefunktionen auszuführen. Die vorstehend erläuterten Berechnungen werden aber im Prozessorsystem 31 durchgeführt. Das Prozessorsystem 31 hat einen Steuerausgang 42 zu einer Steuer- bzw. Treibereinheit 43, um die beispielsweise durch Halbleiterventile 44 gebildeten Schalter des Umrichters 30 entsprechend anzusteuern, um so je nach Auslenkung der Welle 3 aus der Sollposition den Steuerwicklungen (z.B. 14, 15, 16) nach Durchführung der Messung wie beschrieben den entsprechenden Steuerstrom zuzuführen.

[0064] Um den Einfluss des Ohm'schen Widerstandes und allfälliger induzierter Spannungen, etwa durch Oszillationen der Welle 3, auf den Stromanstieg zu eliminieren, kann die Stromanstiegsmessung durch die Kombination von mindestens zwei Stromanstiegsmessungen I, II kombiniert werden, wodurch die Genauigkeit der Exzentrizitätsermittlung bei einem merkbaren Ohm'schen Widerstand oder bei einer schwankenden Flussverkettung, etwa durch Oszillationen der Welle 3, erhöht wird.

$$\underline{u}_s(\tau)_I = \underline{i}_s(\tau) \cdot r_s + \underline{l} \cdot d \underline{i}_{sI} / d \tau + \underline{u}_i$$

$$\underline{u}_s(\tau)_{II} = \underline{i}_s(\tau) \cdot r_s + \underline{l} \cdot d \underline{i}_{sII} / d \tau + \underline{u}_i$$

[0065] Dabei wird angenommen, dass die Ströme während der beiden Messungen I und II im Mittel praktisch gleich sind und somit die Ohm'schen Spannungsabfälle bei Subtraktion der beiden Gleichungen eliminiert werden. Die Stromanstiege hingegen sind während der beiden Messungen I, II sehr verschieden. Ebenso werden allfällige induzierte Spannungen \underline{u}_i , die sich ebenfalls während der kurzen Zeit der Messung praktisch nicht ändern, bei einer Subtraktion der beiden Messgleichungen eliminiert:

$$\underline{u}_s(\tau)_I - \underline{u}_s(\tau)_{II} = \underline{l} \cdot (d \underline{i}_{sI} / d \tau - d \underline{i}_{sII} / d \tau)$$

[0066] Somit können durch die Kombination von zwei Messungen, etwa durch Wahl von $\underline{u}_{sII} = -\underline{u}_{sI}$, die genauigkeitsvermindernden Effekte des ohm'schen Widerstandes und der induzierten Spannung eliminiert werden. Allgemeiner ausgedrückt, können Linear-Kombinationen von Messungen I, II, ...N durchgeführt werden, wobei die EMK-Terme durch die Linear-Kombination verschwinden:

$$\underline{k}_I \underline{u}_i + \underline{k}_{II} \underline{u}_i + \dots + \underline{k}_N \underline{u}_i = 0 ;$$

[0067] ebenso verschwinden die $\underline{i}_s r_s$ -Terme.

[0068] Vorzugsweise wird die Stromanstiegsmessung in Zeiten durchgeführt, in denen keine Schalthandlung des speisenden Umrichters 30 durchgeführt wird. Dadurch werden elektromagnetische Störungen der Messung verhindert.

[0069] Die Strommessung wird bevorzugt, wie aus Fig. 5 ersichtlich, auf Basis von Strommeselementen 34 durchgeführt, die im Bereich des Zwischenkreises 32 zwischen dem Zwischenkreis-Kondensator 36 und den Leistungsschaltern 44 angeordnet sind. Damit ist eine potentialmäßige Anbindung der Datenverarbeitungseinheit 31 (Prozessor, ASIC etc.) an die Strommessung möglich, und dies führt zu einer kostengünstigen und kompakten Realisierung der Strommessung.

[0070] Wie somit ersichtlich ist, kommt die vorliegende Magnetlagereinrichtung 1 ohne mechani-

sche Sensorik aus, und die Positionsregelung erfolgt einfach auf Basis von Induktivitätsauswertungen, wobei der Aufwand und insbesondere auch Energieverluste äußerst gering sind und überdies eine kompakte Ausbildung zur Magnetlagereinrichtung 1 ermöglicht wird.

[0071] In diesem Zusammenhang ist es auch günstig, die Rückschlussteile 5, 6, aus gut magnetisch leitendem Material auszuführen. Dies bedeutet, dass diese Rückschlussteile 5, 6 auch elektrisch bzw. thermisch gut leiten können und gleichzeitig elektromagnetische Strahlung gut abschirmen, und dies wird im Weiteren dazu ausgenützt, diese Rückschlussteile 5, 6 als Gehäuseteile der Magnetlagereinrichtung 1, als Kühlkörper, als elektromagnetische Abschirmelemente und/oder als Montageplatten für innerhalb der Magnetlagereinrichtung 1 und dazu bringende elektronische Komponenten (s. Fig. 5) auszunützen. Die Rückschlussteile 5, 6, bilden dabei beispielsweise einen Faraday'schen Käfig sowie eine Wärmesenke für in freien Räumen 60 zwischen den elektromagnetischen Bauteilen der Magnetlagereinrichtung 1 angebrachte elektronische Komponenten 50-55, wie in Fig. 6 schematisch veranschaulicht ist. Bei diesen elektronischen Komponenten 50-55 im Bereich zwischen den Rückschlussteilen 5, 6 und den Steuerwicklungen 14, 15, 16 kann es sich beispielsweise um Steuerungskomponenten und Leistungsteilkomponenten, insbesondere um Komponenten des Zwischenkreises 32 und der Leistungsschalter 44 der Anordnung gemäß Fig. 5, handeln. Durch diese günstige Nutzung von ansonsten nicht benützten Räumen innerhalb des Stators 2 wird zusätzlich die Erzielung eines kompakten Gesamtsystems begünstigt. Insbesondere werden im freien Raum 60 Komponenten, wie die in Fig. 5 gezeigten Komponenten 31, 34, 36, 38, 39, 43, 44, untergebracht. Dadurch ist es möglich, die gesamte Steuer- und Leistungselektronik innerhalb des Lagers auszuführen und nur eine Stromversorgung dem Lager zuzuführen.

Patentansprüche

1. Magnetlagereinrichtung (1) zur berührungslosen Lagerung eines beweglichen Körpers (3), vorzugsweise einer Welle, mit einem stillstehenden Lagerteil (2), mit einem Permanentmagnetsystem (11) mit wenigstens einem Permanentmagneten (4, 4A, 4B) zur Erzeugung eines magnetischen Grundflusses (7, 8), und mit einem Steuerwicklungssystem (13) mit wenigstens einer Steuerwicklung (14, 15, 16) zur Erzeugung eines Steuerflusses (20), der im Betrieb ein von Auslenkungen des Körpers (3) aus der Solllage abhängiger Steuerstrom (i) zuführbar ist, wobei Messmittel (34, 35, 38, 39) zur Messung einer auf eine bei einer Auslenkung des Körpers (3) aus der Solllage auftretende Induktivitätsänderung des Steuerwicklungssystems (13) bezogenen elektrischen Größe, aus der der Steuerstrom hergeleitet wird, vorgesehen sind, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Steuerwicklungssystem (13) wenigstens zwei Steuerwicklungen (14, 15, 16) zur Regelung von zwei radialen Freiheitsgraden der Bewegung des Körpers (3) aufweist und dass die Messmittel (34, 35, 38, 39) mit einem von einem Prozessorsystem (31) gesteuerten Umrichter (30), insbesondere einem Zwischenkreis - Umrichter, verbunden sind und der Umrichter (30) mit einer aus dem Prozessorsystem (31) generierten Abfolge von Spannungsraumzeigern (\underline{u}_s) beaufschlagt wird und daraus der jeweilige Stromanstieg gemessen wird und dass aus den Stromanstiegen aufgrund der bei Auslenkung des Körpers auftretenden Induktivitätsänderung ein Auslenkungsvektor errechnet wird, wobei die Richtung des Auslenkungsvektors ident mit der Richtung der Auslenkung des Körpers (3) und die Betragsinformation des Auslenkungsvektors ein Maß für die Intensität der Auslenkung des Körpers (3) ist.
2. Magnetlagereinrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Steuerwicklungssystem (13) drei Steuerwicklungen (14, 15, 16) aufweist.
3. Magnetlagereinrichtung nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass im Fall der Lagerung eines Körpers (3) mit axialer Erstreckung in axialer Richtung ein Steuerwicklungssystem (25) dafür vorgesehen ist.
4. Magnetlagereinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass an den Übertrittsstellen des magnetischen Flusses vom stillstehenden Lagerteil (2) zum beweglichen Körper (3) entlang des Umfangs des Körpers (3) eine Luftspalt-Flusssdichte mit zumindest stationär gleichbleibendem Vorzeichen vorliegt.
5. Magnetlagereinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Steuerwicklungssystem (13) in einer Sternschaltung zusammengeschaltete Steuerwicklungen (14, 15, 16) aufweist.
6. Magnetlagereinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Steuerwicklungssystem (13) drei in einer Dreieckschaltung zusammen geschaltete Steuerwicklungen (14, 15, 16) aufweist.
7. Magnetlagereinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Permanentmagnetsystem (11) kreisringförmig aufgebaut und radial magnetisiert ist und außerhalb des den Steuerfluss (20) führenden magnetischen Kreises angeordnet ist.
8. Magnetlagereinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Permanentmagnetsystem (11) mindestens aus einem kreisringförmigen, axial magnetisierten Permanentmagneten (4, 4A, 4B) besteht und radial außerhalb des Steuerwicklungssystems angeordnet ist.
9. Magnetlagereinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass zum Rückschluss des vom Permanentmagnetsystem (11) hervorgerufenen Grundflusses (7, 8) Rückschlussteile (5, 6) vorgesehen sind, die im Wesentlichen nicht vom Steuerfluss (20) durchsetzt sind.
10. Magnetlagereinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Geometrie der an die Luftspalte angrenzenden Materialien so gestaltet ist, dass bei Auslenkung des beweglichen Körpers (3) aus der axialen Ruheposition in beiden axialen Richtungen ohne Steuerstrom eine Rückstellkraft erzeugt wird.

11. Magnetlagereinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass mindestens ein, vorzugsweise zwei Rückschlussteile (5, 6) mindestens ein weiteres zur aktiven axialen Stabilisierung des Körpers vorgesehene Steuerwicklungssystem (23) tragen.
12. Magnetlagereinrichtung nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass zwei mit betragsmäßig gleicher Durchflutung beaufschlagte Steuerwicklungssysteme (24A, 24B) auf einem linken bzw. rechten Rückschlussteil (5, 6) zur axialen Stabilisierung angeordnet sind.
13. Magnetlagereinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 12, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein axiales Steuerwicklungssystem (23) mit einer von der Axialposition des Körpers (3) abhängigen Induktivität vorgesehen ist, wobei eine axiale Auslenkung des Körpers (3) auf Basis von Strommessungen im axialen Steuerwicklungssystem bestimmt wird.
14. Magnetlagereinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass elektronische Komponenten (50-55), wie Steuerungs- und/oder Leistungsteilkomponenten, im Bereich zwischen Rückschlussteilen und Steuerwicklungen untergebracht sind.
15. Magnetlagereinrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 14, **dadurch gekennzeichnet**, dass zumindest ein Rückschlussteil (5, 6) zugleich als Montageplatte, Kühlkörper, EMV-Schirmelement und/oder Gehäuseteil für elektronische Komponenten vorgesehen ist.

Hierzu 5 Blatt Zeichnungen

1 / 5

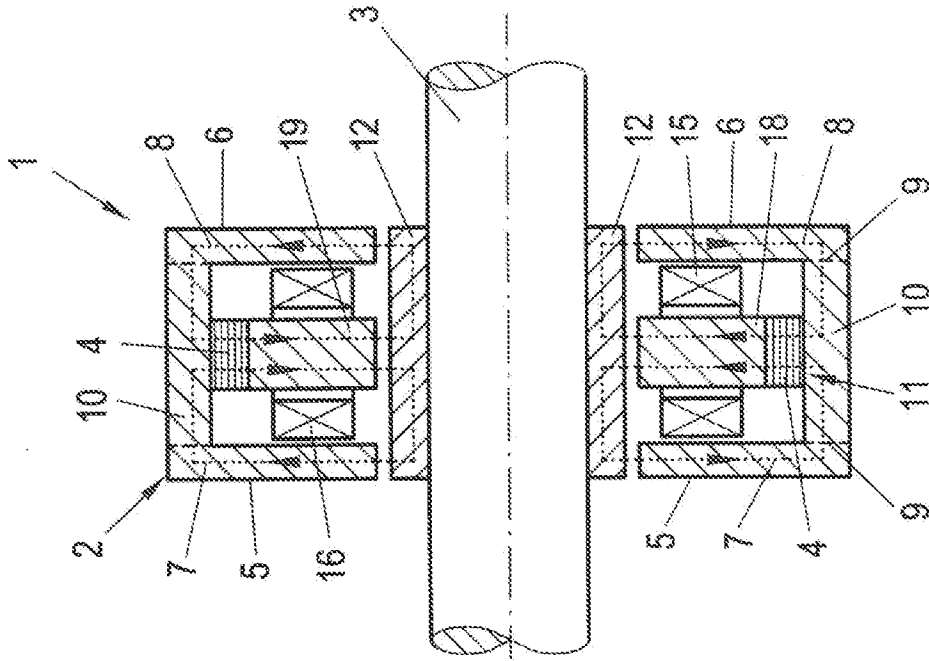


Fig. 1B

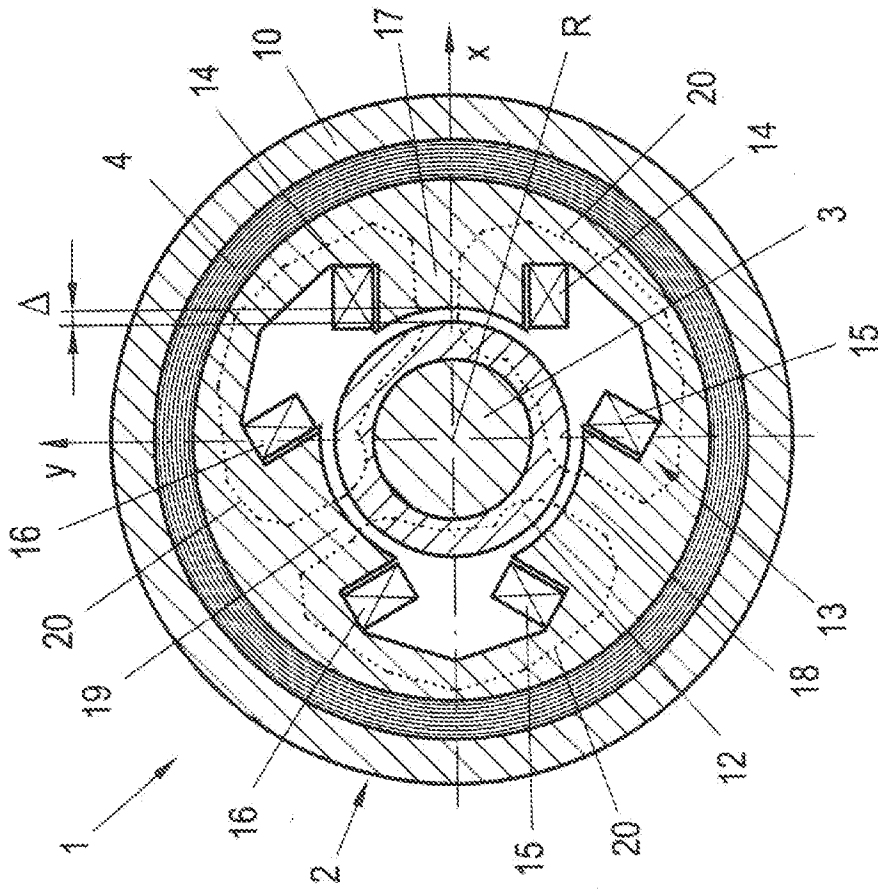


Fig. 1A

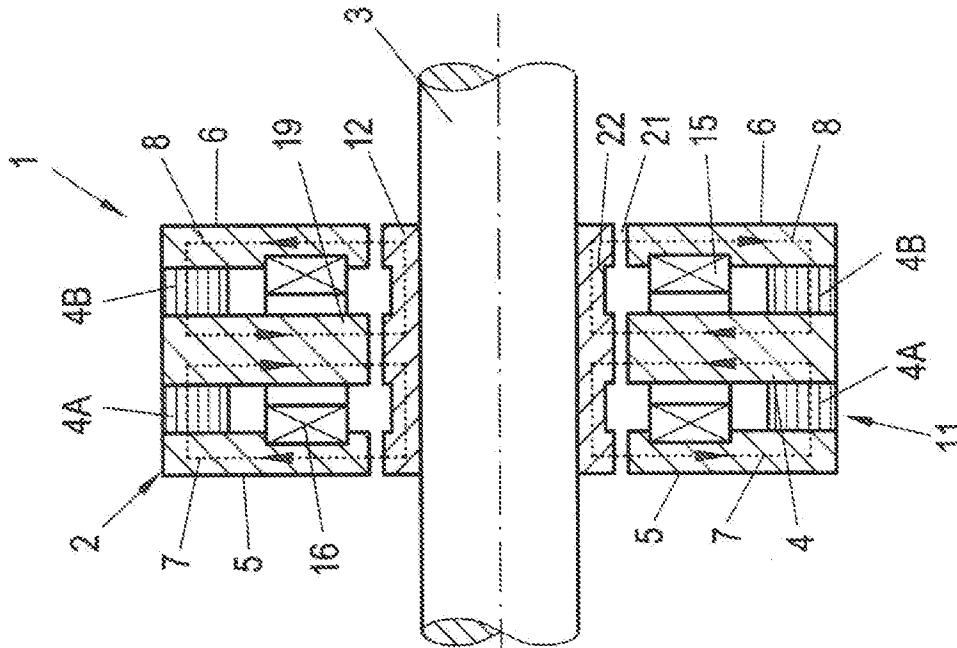


Fig. 2B

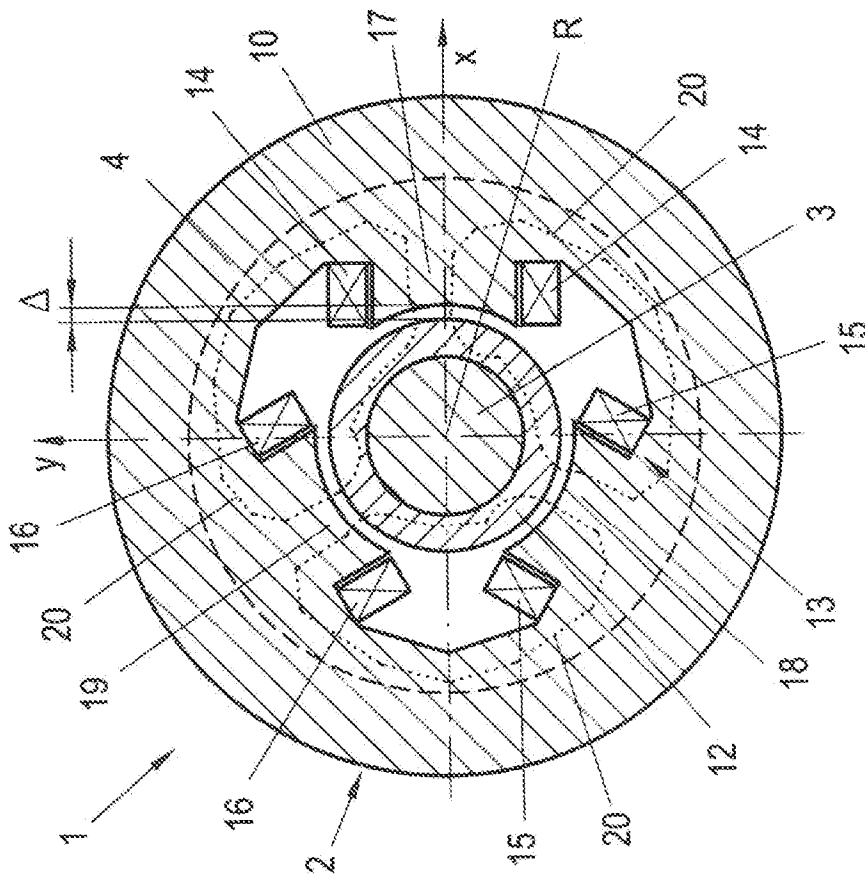


Fig. 2A

3 / 5

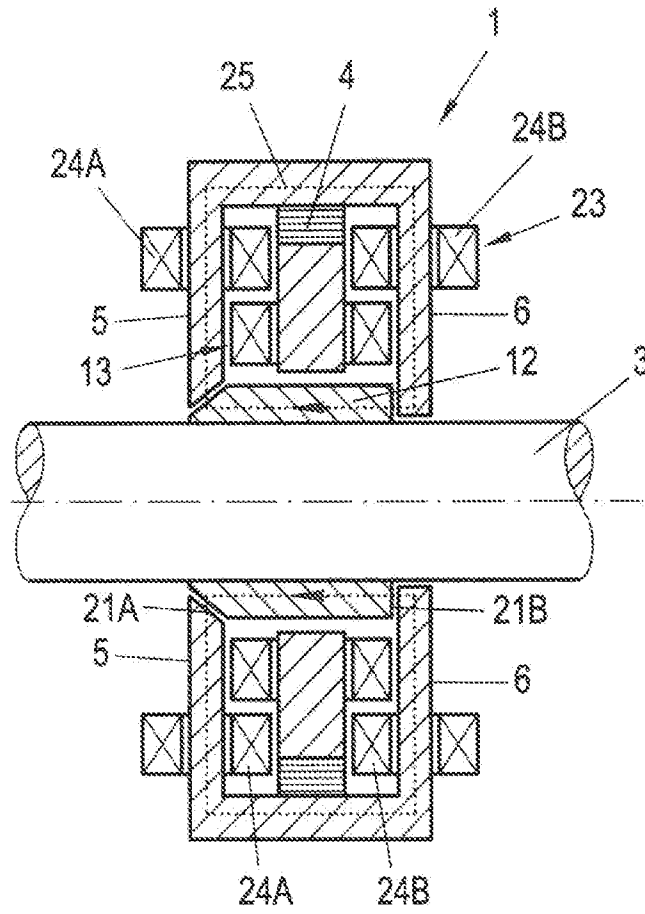


Fig. 3

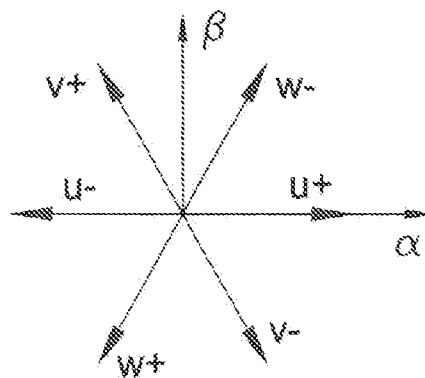


Fig. 4

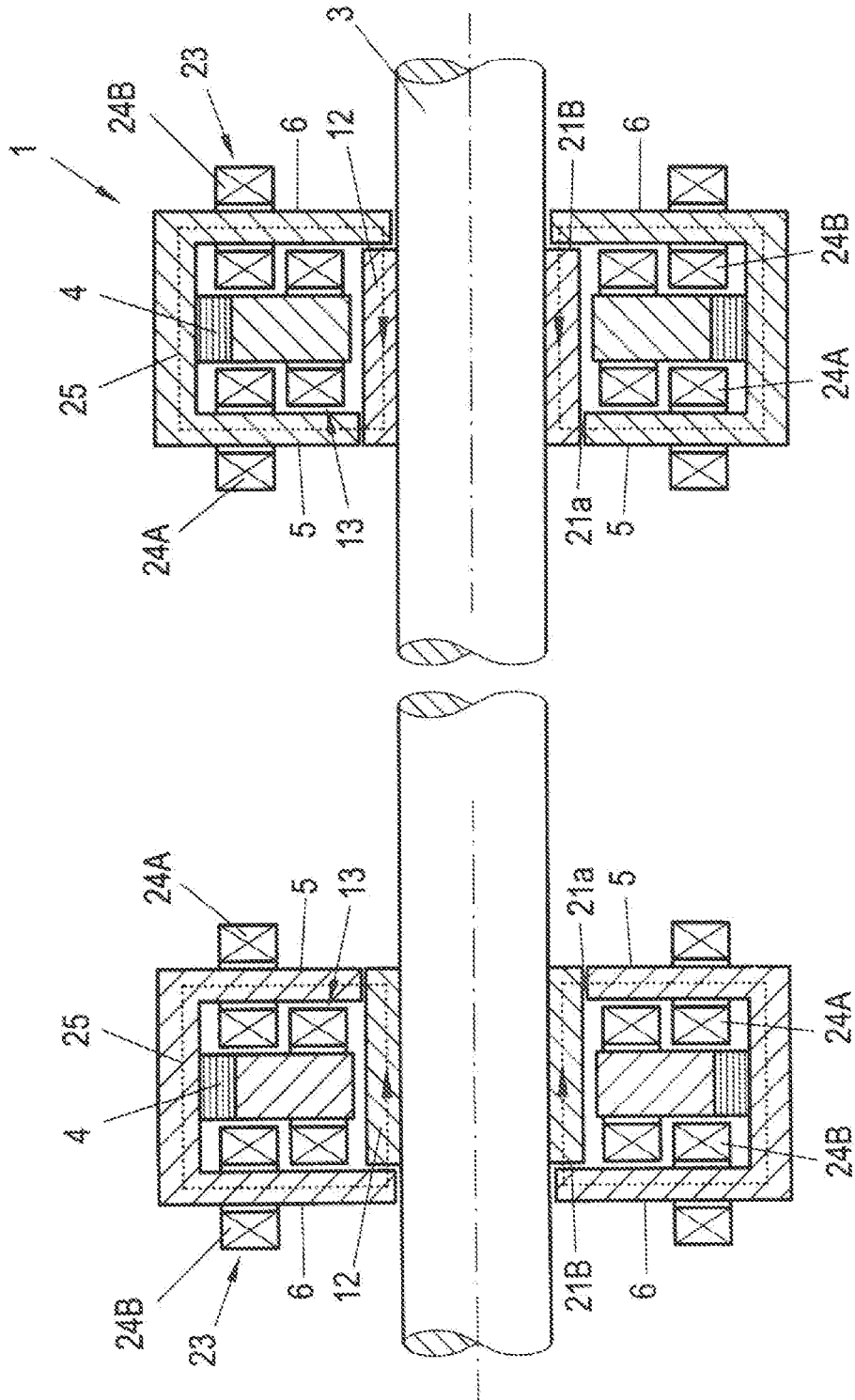


Fig. 3A

5 / 5

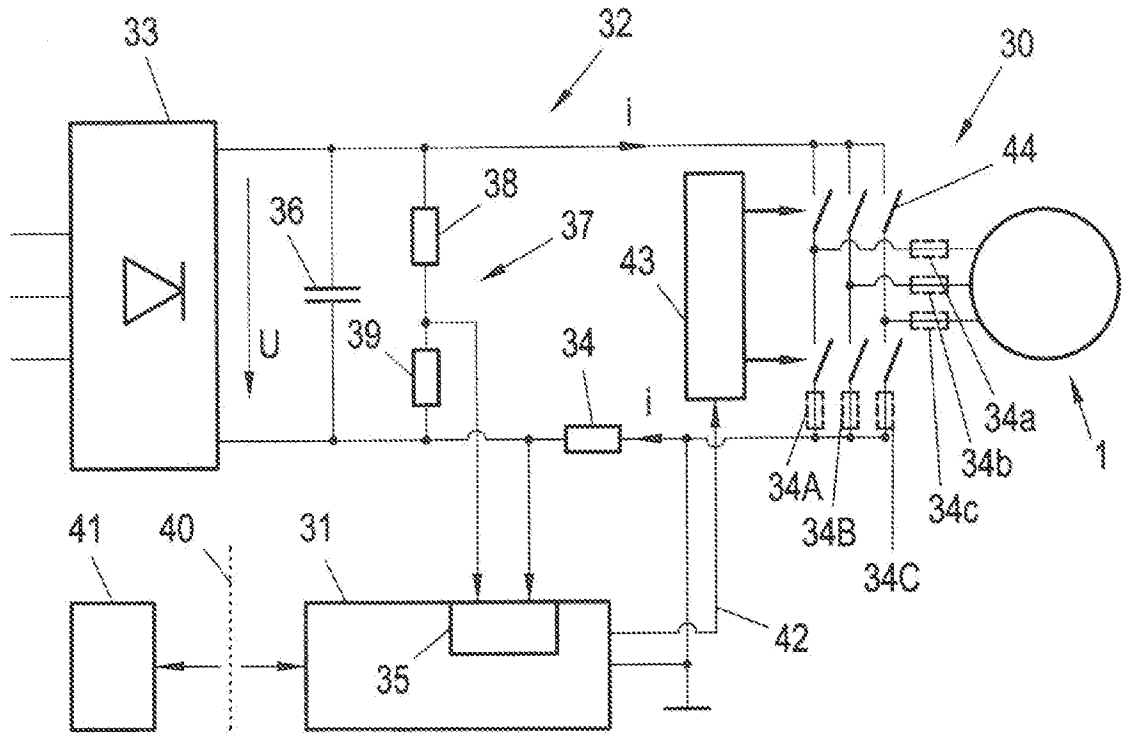


Fig. 5

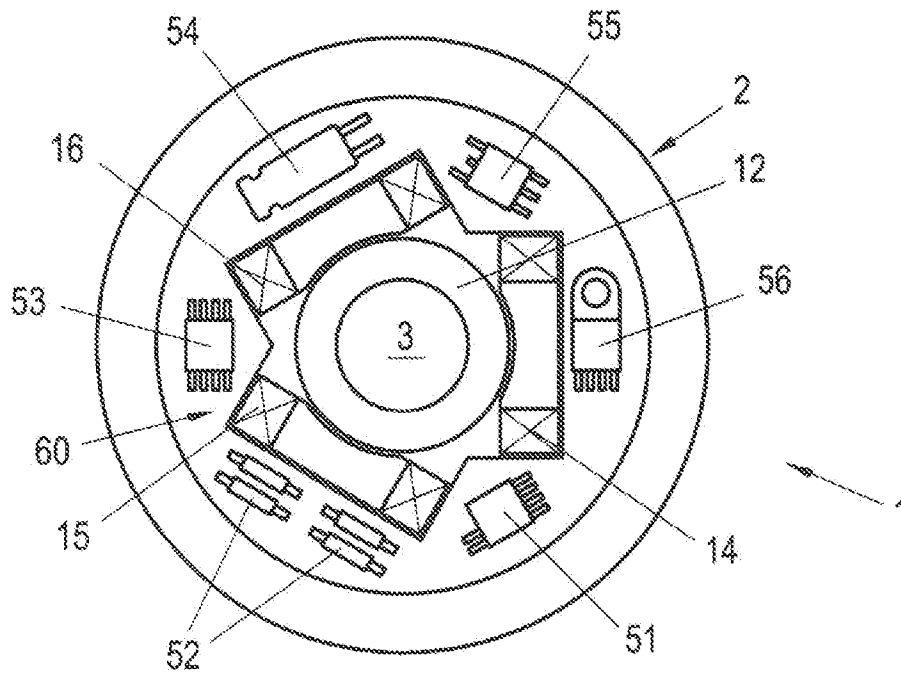


Fig. 6