



19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

12 Übersetzung der  
europäischen Patentschrift

51 Int. Cl.<sup>6</sup>:  
F 16 C 32/04

87 EP 0 749 538 B 1

10 DE 695 03 613 T 2

- 21 Deutsches Aktenzeichen: 695 03 613.0
- 88 PCT-Aktenzeichen: PCT/FR95/00231
- 88 Europäisches Aktenzeichen: 95 911 353.1
- 87 PCT-Veröffentlichungs-Nr.: WO 95/23297
- 88 PCT-Anmeldetag: 28. 2. 95
- 87 Veröffentlichungstag  
der PCT-Anmeldung: 31. 8. 95
- 87 Erstveröffentlichung durch das EPA: 27. 12. 96
- 87 Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung beim EPA: 22. 7. 98
- 47 Veröffentlichungstag im Patentblatt: 25. 2. 99

DE 695 03 613 T 2

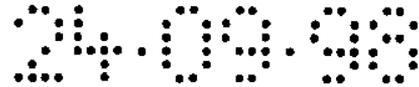
<p>30 Unionspriorität: 9402236                      28. 02. 94    FR</p> <p>73 Patentinhaber: Société de Mécanique Magnétique, Saint-Marcel, FR</p> <p>74 Vertreter: Beetz und Kollegen, 80538 München</p> <p>84 Benannte Vertragsstaaten: DE, GB, IT, NL</p>	<p>72 Erfinder: SCHROEDER, Ulrich, F-76130 Mont-Saint-Aignan, FR; BRUNET, Maurice, F-27950 Sainte-Colombe, FR</p>
---	---

54 AKTIVES MAGNETLAGER MIT POSITIONS-SELBSTERFASSUNG

DE 695 03 613 T 2

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

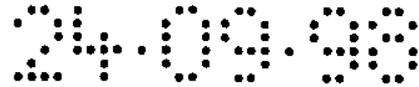


Die vorliegende Erfindung hat ein aktives Magnetlager mit Positions-Selbsterfassung zum Gegenstand, das das erste und zweite, gegenmagnetisierte Elektromagneten aufweist, die zu beiden Seiten eines ferromagnetischen Körpers angeordnet sind, der ohne Kontakt zwischen diesen Elektromagneten aufgehängt ist, wobei der erste und der zweite Elektromagnet, die gemäß einer Achse X'X ausgerichtet sind, je einerseits einen Magnetkreis, der mit dem Körper einen Magnetspalt  $e_1$ ;  $e_2$  bildet, dessen Mittelwert gleich einem vorbestimmten gemeinsamen Wert  $e_0$  ist, und andererseits eine Magnetspule aufweisen, die von einem Leistungsverstärker gespeist wird, dessen Eingangsstrom in Abhängigkeit von der Position des Körpers in Bezug auf die Magnetkreise des ersten und zweiten Elektromagneten geregelt ist.

Bei den am häufigsten verwendeten Systemen mit aktiven Magnetlagern wird die Position des aufgehängten Körpers, der zum Beispiel der Rotor einer Maschine oder eine Scheibe sein kann, durchgehend mit Hilfe von Positionsdetektoren kontrolliert, die den Elektromagneten der aktiven Magnetlager zugeordnet sind, welche die notwendigen Kräfte erzeugen, um den aufgehängten Körper in einer gegebenen Arbeitsstellung zu halten.

Die Tatsache, daß verschiedene Positionsdetektoren für die Elektromagneten zum Halten des aufgehängten Körpers verwendet werden, erhöht die Kosten der Maschinen beträchtlich aufgrund der eigentlichen Detektoren, der zugehörigen Anschlüsse und der elektronischen Schaltungen, um sie zu speisen.

Außerdem können diese Detektoren nur an der Seite des Lagers angeordnet werden und sind daher nicht kollinear als Erfassungspunkt in Bezug auf den Reaktionspunkt. Diese Versetzung der Detektoren in Bezug auf die Betätigungsorgane kann perverse Wirkungen in Bezug auf die Steuerung des Rotors erzeugen, wenn es darum geht, die Verformungen des Ro-

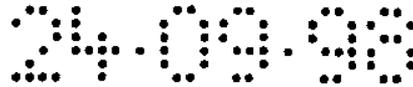


tors zu berücksichtigen, die während der Drehung erzeugt werden. Die Detektoren können sich tatsächlich dann an Verformungsknoten befinden, während die betätigenden Elektromagneten näher an Verformungsbäuchen sind, oder umgekehrt. Die von den Detektoren gelieferte Information ist dann nicht die treue Wiedergabe der Wirklichkeit in Höhe der eigentlichen Lager.

Weiter ist aus der Druckschrift WO-A-93/23683 ein Magnetlager-System mit Selbsterfassung bekannt, das für eine gegebene Richtung in Reihe geschaltete Spulen aufweist, in denen sowohl ein Strom, der die Position des vom Lager aufgehängten beweglichen Körpers stabilisieren soll, als auch ein Erfassungsstrom fließen. Ein solches Magnetlager-System erfordert jedoch eine Stator-Vormagnetisierung, die mit Dauermagneten durchgeführt wird, und Verstärker, die je Ströme liefern können, welche abwechselnd positiv und negativ sein können, je nach der Position des beweglichen Körpers. Die Verwendung von Mitteln zur Vormagnetisierung und von komplexen linearen Vierquadrant-Verstärkern macht die Herstellung komplex und beeinträchtigt die Zuverlässigkeit der Einheit.

Es ist Aufgabe der vorliegenden Erfindung, die verschiedenen erwähnten Nachteile zu beheben und eine zuverlässige Einstellung der Elektromagneten eines aktiven Magnetlagers zu gewährleisten, indem auf kostengünstige Weise eine Positionsinformation des aufgehängten Organs geliefert wird, ohne auf getrennte Positionsdetektoren zurückzugreifen, wie z.B. Detektoren vom induktiven, kapazitiven oder optischen Typ.

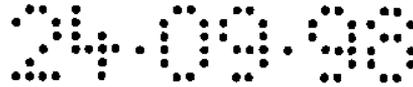
Es ist insbesondere Aufgabe der Erfindung, bei üblichen aktiven Magnetlagern, die gemäß einer gegebenen Richtung nur zwei gegenmagnetisierte Elektromagneten verwenden, welche Anziehungskräfte auf einen beweglichen Körper erzeugen, eine Positionserfassung vom induktiven Typ durchzuführen, ohne daß es notwendig wäre, dem Magnetlager eigene Erfassungsspulen, die sich von den Lager-Elektromagneten selbst unter-



scheiden, oder Mittel zur Vormagnetisierung zuzuordnen.

Die Erfindung hat die Aufgabe, die Herstellung von relativ billigen aktiven Magnetlagern zu ermöglichen, insbesondere für Maschinen, die in großer Anzahl hergestellt werden, wie zum Beispiel Textilspindeln, Bearbeitungsspindeln, Vakuumpumpen, Computer-Disketten.

Diese Aufgaben werden erfindungsgemäß mit Hilfe eines aktiven Magnetlagers mit Positions-Selbsterfassung gelöst, das erste und zweite, gegenmagnetisierte Elektromagneten aufweist, die zu beiden Seiten eines ferromagnetischen Körpers angeordnet sind, der ohne Kontakt zwischen diesen Elektromagneten aufgehängt ist, wobei der erste und der zweite Elektromagnet, die gemäß einer Achse X'X ausgerichtet sind, je einerseits einen Magnetkreis, der mit dem Körper einen Magnetspalt bildet, dessen Mittelwert gleich einem vorbestimmten gemeinsamen Wert ist, und andererseits eine Magnetspule aufweisen, die von einem Leistungsverstärker gespeist wird, dessen Eingangsstrom in Abhängigkeit von der Position des Körpers in Bezug auf die Magnetkreise des ersten und zweiten Elektromagneten geregelt ist, dadurch gekennzeichnet, daß die Leistungsverstärker aus Umschalt-Verstärkern bestehen, daß die Spulen des ersten und des zweiten Elektromagneten direkt induktive Positionsdetektoren bilden; daß Mittel vorgesehen sind, um gleichzeitig am Eingang der die Spulen der ersten und zweiten, gegenmagnetisierten Elektromagneten speisenden Leistungsverstärker in Überlagerung des von den Regelkreisen kommenden Hauptstroms einen sinusförmigen Strom  $I_0 \sin \omega t$  einer konstanten Amplitude  $I_0$ , einer Kreisfrequenz  $\omega$  und identischer Phase einzuspeisen, wobei das Verhältnis zwischen der von einem Verstärker gelieferten Erfassungsspannung einer Kreisfrequenz  $\omega$  und der Spannung, die die vom entsprechenden Elektromagneten ausgeübte Kraft liefert, zwischen 5 und 20% und vorzugsweise nahe 10% liegt, und daß es Schaltungen aufweist, um die Positionsinformation, die die Stärke des Hauptstroms bestimmt, der von den



Regelkreisen an die Leistungsverstärker angelegt werden soll, direkt ausgehend von den Spannungen  $u_1$ ,  $u_2$  an den Klemmen der Magnetspulen zu entnehmen, die mit der Frequenz des sinusförmigen Stroms gemessen werden, die eine Trägerfrequenz der Kreisfrequenz  $w$  bildet.

Erfindungsgemäß wird somit das Magnetlager zusätzlich zu seiner eigentlichen Lagerfunktion auch als Positionsdetektor vom induktiven Typ verwendet, ohne daß es notwendig wäre, eine zusätzliche Spule hinzuzufügen, wobei die Spannung an den Klemmen jeder Elektromagnet-Spule des Lagers unter Bedingungen gemessen wird, für die es praktisch eine Proportionalität mit der Verschiebung des aufgehängten Körpers (Rotor) gibt.

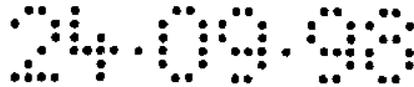
Die Tatsache, daß der sinusförmige Strom mit konstanter Amplitude  $I_0$  und einer Kreisfrequenz  $w$  gleichzeitig in die beiden gegenmagnetisierten Elektromagneten eingespeist wird, mit identischer Phase auf beiden Seiten, vermeidet die Erzeugung der geringsten Störkraft am Rotor, wenn dieser sich in seiner zentralen Nominalposition befindet, insbesondere, wenn die Frequenz des die Trägerwelle bildenden sinusförmigen Stroms ausreichend gering sein muß, um den Verbrauch der von dem das Lager speisenden Leistungsverstärker gelieferten Spannung einzuschränken.

In jedem Fall ist das aktive Magnetlager dadurch gekennzeichnet, daß die Frequenz des eingespeisten sinusförmigen Stroms der Kreisfrequenz  $w$  deutlich höher ist als der gewünschte Durchlaßbereich in der geschlossenen Schleife der Regelkreise.

Die Verwendung von Umschalt-Leistungsverstärkern ermöglicht es, die Verluste zu begrenzen und die Lagerspulen mit einer sehr hohen Blindleistung zu speisen.

Vorteilhafterweise besitzen die Umschalt-Verstärker eine Umschaltfrequenz von mehreren zehn Kilohertz.

Gemäß einem wichtigen Merkmal der vorliegenden Erfindung werden die Spannungen  $u_1$ ,  $u_2$  an den Klemmen der Magnet-



spulen, die mit der Frequenz des sinusförmigen Stroms einer Kreisfrequenz  $\omega$  gemessen werden, in Differential-Messung in einem Komparator verglichen, der eine Spannung  $u$  proportional zur Verschiebung des Körpers in Bezug auf seine Gleichgewichtsstellung liefert.

Die Differential-Messung ermöglicht es, die beiden konstanten Glieder der Form  $U_0 = L_0 I_0 \omega$ , die aus der Induktivität  $L_0$  der Elektromagnet-Spulen in Bezug auf den mittleren Magnetspalt  $e_0$  entstehen, und die konstanten Glieder  $U_s I_0 \omega$ , die aus der Streuinduktivität  $L_s$  der Elektromagnet-Spulen in Bezug auf die magnetischen Streuflüssen entstehen, zu entfernen.

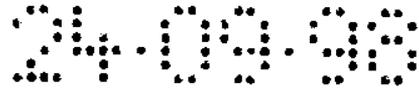
Genauer gesagt, enthalten die Schaltungen zur Entnahme der Positionsinformation ein Bandfilter, das auf die Frequenz des sinusförmigen Stroms einer Kreisfrequenz  $\omega$  zentriert ist und eine Halbbreite aufweist, die an den gewünschte Durchlaßbereich der Regelkreise angepaßt ist.

Die Schaltungen zur Entnahme der Positionsinformation weisen einen synchronen Demodulator auf, der am Ausgang des Bandfilters angeordnet ist und von der Frequenz des sinusförmigen Stroms einer Kreisfrequenz  $\omega$  gesteuert wird.

Die Schaltungen zur Entnahme der Positionsinformation weisen ein Filter der zweiten Ordnung auf, um die Frequenz zu filtern, die einer Kreisfrequenz  $2\omega$  entspricht, welche von der Vollweg-Demodulation innerhalb des synchronen Demodulators erzeugt wird.

Vorteilhafterweise sind die Umschaltfrequenzen der Umschalt-Leistungsverstärker und die Frequenz des sinusförmigen Stroms mit Kreisfrequenz  $\omega$  synchronisiert. Dies ermöglicht es, die Geräuschprobleme aufgrund der Frequenzüberlagerungen zu vermeiden.

Die Elektromagneten sind so bemessen, daß die höchste von diesen Elektromagneten geforderte Kraft für eine magnetische Induktion erhalten wird, die außerhalb der Sätti-



gungszone des Materials liegt, das zur Bildung der Magnetkreise der Elektromagneten verwendet wird.

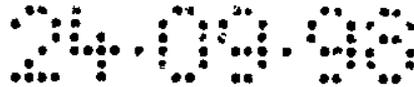
Solange die Strecke in den Magnetkreisen der Lager-Elektromagneten vernachlässigbar und praktisch konstant bleibt, unabhängig von der von den Elektromagneten geforderten Kraft, kann die Messung der Induktivität der Spulen der Lager-Elektromagneten umgekehrt proportional zum Magnetspalt bleiben.

Die Magnetkreise der Elektromagneten bestehen aus einem Material, das in Abhängigkeit von der magnetischen Induktion eine wenig variable Permeabilität hat, insbesondere in der Betriebszone der Elektromagneten, die sich weit von den Sättigungszonen entfernt befindet.

Die Regelkreise, die die Leistungsverstärker speisen, weisen einen Komparator für den Vergleich zwischen dem Positionssignal, das von den Schaltungen zur Entnahme der Positionsinformation kommt, und einem Positions-Sollwert, und mindestens Schaltungen auf, die eine Signalverarbeitungs-Korrektorschaltung und eine Linearisierungsschaltung des Ruhestroms enthalten.

Die Regelkreise können weiter Fluß-Regelschleifen aufweisen, die zwischen die eine Korrektorschaltung und eine Linearisierungsschaltung enthaltenden Schaltungen einerseits und Additionsschaltungen andererseits zwischengeschoben sind, die die Einspeisemittel bilden, welche den sinusförmigen Strom  $I_0 \sin \omega t$  einer Kreisfrequenz  $\omega$  empfangen.

In diesem Fall enthält beispielsweise jede Fluß-Regelschleife ein Sperrkreis-Filter, das auf eine Frequenz einer Kreisfrequenz  $\omega$  zentriert ist und am Eingang das Ausgangs-Spannungssignal des entsprechenden Verstärkers empfängt, eine Fluß-Berechnungsschaltung, an die einerseits das Ausgangssignal des entsprechenden Sperrkreis-Filters und andererseits das Ausgangssignal eines Fluß-Reglers angelegt werden, das auch an einen Eingang der entsprechenden Additionsschaltung angelegt wird, und eine Subtrahierschaltung,



die vom von den eine Korrektorschaltung und eine Linearisierungsschaltung enthaltenden Schaltungen kommenden Signal das Signal subtrahiert, das von der entsprechenden Fluß-Berechnungsschaltung kommt, und ein Ausgangssignal an den Eingang der entsprechenden Fluß-Regelschaltung liefert.

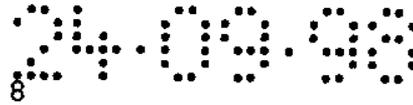
Natürlich schließt die Erfindung aktive Magnetlager ein, die insbesondere zwei Systeme von aktiven Magnetlagern der oben definierten Art enthalten, die gemäß zwei Richtungen  $XX'$ ,  $YY'$  ausgerichtet sind, die zueinander senkrecht liegen.

Weitere Merkmale und Vorteile der Erfindung gehen aus der nachfolgenden Beschreibung besonderer Ausführungsformen der Erfindung hervor, die als nicht-einschränkend zu verstehende Beispiele unter Bezugnahme auf die beiliegende Zeichnung beschrieben sind, in der:

Figur 1 ein Blockschaltbild eines erfindungsgemäßen Systems von aktiven Magnetlagern ist, das ein Positions-Erfassungssystem enthält, welches die Lager-Elektromagneten verwendet, und

Figur 2 eine Kurve darstellt, die den Verlauf des Positionssignals zeigt, das vom Positions-Erfassungssystem in Abhängigkeit von den Veränderungen des Magnetspalts der Elektromagneten geliefert wird.

Figur 1 zeigt einen Rotor 1, der von zwei gegenmagnetisierten Lager-Elektromagneten aufgehängt wird, die gemäß einer Achse  $X'X$  senkrecht zur Achse des Rotors 1 ausgerichtet sind. Jeder Elektromagnet besitzt einen Magnetkreis 12 bzw. 22 aus ferromagnetischem Material, der im Schnitt U-förmig ist, mit zwei Polstücken 121, 122 bzw. 221, 222, die zum Rotor 1 hin ausgerichtet sind, der selbst aus ferromagnetischem Material besteht oder mit einem Mantel aus ferromagnetischem Material bedeckt ist. Die Polstücke 121, 122 definieren je mit dem Rotor 1 einen Magnetspalt  $e_1 = e_0 + x$ , wobei  $e_0$  den mittleren Magnetspalt darstellt, wenn der Rotor sich in seiner Gleichgewichtsstellung befindet, und  $x$  die



Veränderung des Magnetspalts in Bezug auf den Mittelwert  $e_0$  darstellt, die durch eine Verschiebung des Rotors 1 in der radialen Richtung X'X erzeugt wird. Die Polstücke 221 und 222 sind symmetrisch zu den Polstücken 121, 122 in Bezug auf die Achse des Rotors 1, wenn der Rotor 1 sich in seiner Gleichgewichtsstellung befindet, so daß die Polstücke 221, 222 je mit dem Rotor 1 einen Magnetspalt  $e_2 = e_0 - x$  definieren, wobei  $e_0$  den mittleren Magnetspalt darstellt, wenn der Rotor 1 in seiner Gleichgewichtsstellung ist, und  $x$  die Veränderung des Magnetspalts in Bezug auf den Mittelwert  $e_0$  darstellt, die durch eine Verschiebung des Rotors 1 in der radialen Richtung X'X erzeugt wird. So bedeutet ein positiver Wert von  $x$  eine Verschiebung des Rotors 1 zum Magnetkreis 22, während ein negativer Wert von  $x$  eine Verschiebung des Rotors 1 zum Magnetkreis 12 bedeutet.

Jeder Elektromagnet besitzt außerdem eine Magnetspule 11 bzw. 21, die ausgehend von einem Leistungsverstärker 13 bzw. 23 gespeist wird, der vorzugsweise ein Umschalt-Leistungsverstärker im Strom-Modus ist. Jeder Leistungsverstärker 13 bzw. 23 empfängt am Eingang einen Eingangshauptstrom, der es ermöglicht, am Ausgang an die Spulen 11, 21 die Energie zu liefern, die für den Halt des Rotors 1 in seiner vorbestimmten Gleichgewichtsstellung notwendig ist. Der Eingangshauptstrom kommt von Regelkreisen, die selbst Informationen über die reale Position des Rotors erhalten haben und die eine Sollposition berücksichtigen. Jeder Verstärker 13 bzw. 23 liefert einen in einer Richtung fließenden Strom, der von dem vom anderen Verstärker 23 bzw. 13 gelieferten Strom unabhängig ist, wobei die in unabhängiger Weise von den Verstärkern 13, 23 gespeisten Elektromagneten gegenmagnetisiert sind und auf den beweglichen Körper 1 zu beiden Seiten dieses Körpers entlang der Achse X'X Anziehungskräfte erzeugen.

Um eine Positionsinformation zu erhalten, ohne eigene

Positionsdetektoren der Lager-Elektromagneten zu verwenden, ermöglichen es Additionskreise 14, 24, gleichzeitig an den Eingang der Leistungsverstärker 13, 23 in Überlagerung zum von den Regelkreisen kommenden Hauptstrom einen sinusförmigen Strom der Form  $I_0 \sin \omega t$  einer konstanten Amplitude  $I_0$ , einer Kreisfrequenz  $\omega$  und mit identischer Phase einzugeben.

Am Ausgang der Leistungsverstärker 13, 23 werden also in Überlagerung des Stroms, der die Tragekraft der Elektromagneten liefern soll, Ströme  $i_1, i_2$  der Form:  $i_1 = i_2 = I_0 \sin \omega t$  eingespeist.

Die Magnetspalte  $e_1$  und  $e_2$  zwischen dem Rotor 1 und den Polen 121, 122 bzw. 221, 222 sind von der weiter oben angegebenen Form, d.h.:

$$e_1 = e_0 + x$$

$$e_2 = e_0 - x$$

Die Induktivitäten der Elektromagneten 11, 12 bzw. 21, 22 haben je die Form:

$$L_1 = L_S + L_0 / (1 + x/e_0)$$

$$L_2 = L_S + L_0 / (1 - x/e_0)$$

wobei  $L_S$  die Streuinduktivität der Elektromagneten 11, 12 bzw. 21, 22 in Bezug auf Magnetstreuungen und

$L_0$  die Induktivität der Elektromagneten 11, 12 bzw. 21, 22 in Bezug auf den mittleren Magnetspalt  $e_0$  darstellt.

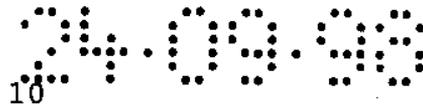
Die Spannungen  $u_1$  und  $u_2$  an den Eingangsklemmen der Spulen 11 und 21 aufgrund der eingespeisten Ströme  $i_1$  und  $i_2$  haben die Form:

$$u_1 = -\omega I_0 L_1 \cos \omega t$$

$$u_2 = -\omega I_0 L_2 \cos \omega t$$

Wenn man in einem Komparator 41 die Differenz zwischen den Spannungen  $u_1$  und  $u_2$  bildet, erhält man Ausdrücke der Form:

$$u = u_1 - u_2 = -\omega I_0 \cos \omega t (L_1 - L_2)$$



$$\begin{aligned} &= (w I_0 \cos wt) \cdot 2 L_0 \cdot (x/e_0) / (1 - (x/e_0)^2) \\ &= A \cdot f(x/e_0) \end{aligned}$$

wobei  $A = (w I_0 \cos wt) \cdot 2 L_0 = \text{konstant}$   
und  $f(x/e_0) = (x/e_0) / (1 - (x/e_0)^2)$  ist.

5 Man sieht, daß der Vergleich in der Differentialmessung der Spannungen  $u_1$  und  $u_2$  es ermöglicht, die konstanten Glieder aufgrund der Induktivität  $L_0$  in Bezug auf den mittleren Magnetspalt  $e_0$  und auf die Streuinduktivität  $L_s$  in Bezug auf die Magnetstreuungen zu eliminieren, so daß die sich ergebende Spannung proportional zur Verschiebung  $x$  des Rotors 10 ist.

Die Spannung  $u$  wird in einem Bandfilter 42 gefiltert, das auf eine Frequenz zentriert ist, die der Kreisfrequenz  $w$  entspricht, und eine Halbbreite aufweist, die an den gewünschte Durchlaßbereich der Regelkreise des Magnetlager-15 Systems angepaßt ist.

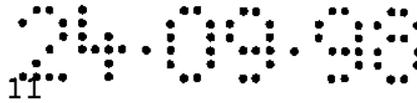
Die Spannung  $u$  wird dann in einem synchronen Demodulator 43 demoduliert, der von einer Frequenz gesteuert wird, die der Kreisfrequenz  $w$  entspricht.

20 Der Ausgang des synchronen Demodulators 43 liefert nach dem Durchgang durch ein Filter zweiter Ordnung 44, das die Filterung der Frequenz gewährleistet, die von der Vollweg-Demodulation erzeugt wird, ein Signal, das für die reale Position des Rotors gemäß der Achse  $X'X$  in Höhe der Lager-Elektromagneten repräsentativ ist.

25 Dieses Signal hat die Form:  
 $u(x) = k(x/e_0) / (1 - (x/e_0)^2)$

Figur 2 zeigt die Linearität des erhaltenen Positionssignals  $u(x)$  in Abhängigkeit vom Verhältnis  $x/e_0$  zwischen der Verschiebung  $x$  des Rotors und dem mittleren Magnetspalt  $e_0$ . 30

Man stellt fest, daß diese Linearität sehr gut ist für den üblichen Arbeitsbereich des Lagers.



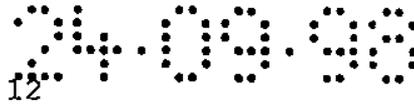
Man kann so ein Positionssignal des Rotors ausgehend von der Messung der Induktivität von zwei gegenmagnetisierten Lager-Elektromagneten ableiten, ohne einen eigenen Detektor für die Lager-Elektromagneten vorzusehen und ohne die geringste Störkraft auf den Rotor einwirken zu lassen, wenn dieser sich in seiner zentralen Nominalposition befindet, solange der eingespeiste Strom der Form  $I_0 \sin \omega t$  gleichzeitig in die beiden gegenmagnetisierten Elektromagneten eingespeist wird, mit einer identischen Phase auf beiden Seiten, was insbesondere einen Vergleich in Differentialmessung erlaubt.

Die in die Verstärker eingespeisten variablen Ruhestrome stellen im Vergleich mit den Regelströmen, die die von den Elektromagneten ausgeübte Kraft liefern, einen geringen Wert dar, und die entsprechenden Rotorverluste können extrem niedrig bleiben.

Die Frequenz des eingespeisten sinusförmigen Stroms, die der Kreisfrequenz  $\omega$  entspricht, ist deutlich höher als das Durchlaßband in geschlossener Schleife des Systems, muß aber vorzugsweise gering genug bleiben, um den Verbrauch der Spannung zu begrenzen, die von den dieses Lager speisenden Leistungsverstärkern geliefert wird.

Wie bereits weiter oben erläutert, bestehen die Verstärker 13, 23 vorteilhafterweise aus Umschalt-Verstärkern an sich bekannter Art, um die Verluste zu begrenzen. Diese Umschalt-Verstärker können eine Umschaltfrequenz aufweisen, die etwa z.B. 50 kHz betragen oder sogar noch höher als dieser Wert sein kann, und die gleich oder höher als 100 kHz sein kann. Es ist jedoch vorzuziehen, die Umschaltfrequenzen der Verstärker 13, 23 und die Frequenz der Trägerwelle einer Kreisfrequenz  $\omega$  zu synchronisieren, um die Geräuschprobleme zu vermeiden, die durch die Frequenzüberlagerungen erzeugt werden.

Zum Beispiel kann die Umschaltfrequenz etwa zwanzig mal so groß wie die der Kreisfrequenz  $\omega$  entsprechende Erfas-



sungsfrequenz sein, und die Erfassungsfrequenz selbst kann zwanzig mal so groß wie die Regelfrequenz sein.

Allgemein gesagt, ist das Lager so bemessen, daß die maximal vom Lager geforderte Kraft erhalten wird für eine Induktion, die sich außerhalb der Sättigungszone des für das Lager verwendeten Materials befindet, und die Magnetkreise 12, 22 des Lagers werden aus einem Material mit wenig variabler Permeabilität in Abhängigkeit von der Magnetinduktion hergestellt, insbesondere im Betriebsbereich des Elektromagneten, d.h. in seiner Sättigungszone.

Es ist anzumerken, daß das System eines aktiven Magnetlagers mit Selbsterfassung keine Vormagnetisierung durch Dauermagneten erfordert, was die Herstellung vereinfacht und die Robustheit und die Zuverlässigkeit verstärkt.

Das vom Filter 44 kommende Positionssignal kann dann in üblicher Art in Regelkreisen verwendet werden, so als ob dieses Signal von einem unabhängigen Detektor erhalten worden wäre, aber mit der Garantie, daß die Information genau der Lokalisierung der Lager-Elektromagneten entspricht.

Das Positionssignal kann so in einem Komparator 31 mit einem Positions-Sollwert verglichen werden, und das vom Komparator 31 kommende Signal wird an Schaltungen 32 angelegt, die eine Korrektorschaltung zur Signalverarbeitung, zum Beispiel von der Art PID (proportional-integral-abgeleitet) und eine Linearisierungsschaltung des Ruhestroms enthalten können. Das von den Schaltungen 32 kommende Signal kann dann mit unterschiedlichen Vorzeichen an einen der Eingänge jeder der Additionsschaltungen 14, 24 angelegt werden, die am Eingang der Verstärker 13, 23 angeordnet sind.

Vorteilhafterweise können die Regelkreise außerdem Fluß-Regelschleifen aufweisen, die zwischen einerseits die Schaltungen 32 und andererseits die Additionsschaltungen 14, 24 eingefügt sind.

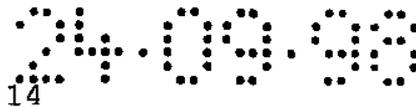
Jede Fluß-Regelschleife kann ein Sperrkreis-Filter 15, 25, das auf eine Kreisfrequenz  $w$  zentriert ist und am Ein-

gang das Ausgangs-Spannungssignal des entsprechenden Ver-  
 stärkers 13, 23 empfängt, eine Fluß-Berechnungsschaltung 16,  
 26, an die einerseits das Ausgangssignal des entsprechenden  
 Sperrkreis-Filters 15, 25 und andererseits das Ausgangs-  
 5 signal eines Fluß-Reglers 18, 28 angelegt werden, das auch  
 an einen Eingang der entsprechenden Additionsschaltung 14,  
 24 angelegt wird, und eine Subtrahierschaltung 17, 27 ent-  
 halten, die von dem von den Schaltungen 32 kommenden Signal  
 das Signal subtrahiert, das von der entsprechenden Fluß-  
 10 Berechnungsschaltung 16, 26 kommt, und ein Ausgangssignal an  
 den Eingang der entsprechenden Fluß-Regelschaltung 18, 28  
 liefert.

Die Verwendung einer Flußschleife, unter Ausnutzung der  
 Ausgangsspannungen der Verstärker, d.h. des auch für die  
 15 Erfassung genutzten Signals, gewährleistet ein besseres dy-  
 namisches Verhalten, selbst mit einem verringerten Durchlaß-  
 band des Systems zur Erfassung der Position.

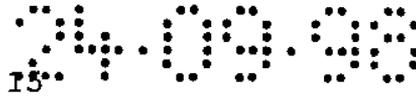
Natürlich ist es möglich, zum Beispiel in ein radiales  
 aktives Magnetlager zwei erfindungsgemäße aktive Magnetla-  
 20 ger-Systeme einzubauen, die je ein Paar von gegenmagneti-  
 sierten Elektromagneten aufweisen, wobei die beiden Paare  
 von Elektromagneten gemäß zwei Richtungen  $XX'$ ,  $YY'$  ausge-  
 richtet sind, die zueinander lotrecht liegen.

Das erfindungsgemäße aktive Magnetlager kann auch al-  
 25 leine verwendet werden, zum Beispiel als axiales Lager, das  
 mit den beiden Seiten einer Scheibe zusammenwirkt. In diesem  
 Fall erfahren die Elektromagneten eine Drehung um  $90^\circ$  in  
 Bezug auf den Fall der Figur 1, wobei die Polstücke 121,  
 122, 221, 222 parallel zur Achse der Scheibe zu liegen kom-  
 30 men.



## PATENTANSPRÜCHE

1. Aktives Magnetlager mit Positions-Selbsterfassung, das  
5 erste und zweite, gegenmagnetisierte Elektromagneten auf-  
weist, die zu beiden Seiten eines ferromagnetischen Körpers  
(1) angeordnet sind, der ohne Kontakt zwischen diesen Elek-  
tromagneten aufgehängt ist, wobei der erste und der zweite  
10 Elektromagnet, die gemäß einer Achse X'X ausgerichtet sind,  
je einerseits einen Magnetkreis (12; 22), der mit dem Körper  
einen Magnetspalt ( $e_1$ ,  $e_2$ ) bildet, dessen Mittelwert gleich  
einem vorbestimmten gemeinsamen Wert  $e_0$  ist, und anderer-  
seits eine Magnetspule (11; 21) aufweisen, die von einem  
15 Leistungsverstärker (13; 23) gespeist wird, dessen Eingangs-  
strom in Abhängigkeit von der Position des Körpers (1) in  
Bezug auf die Magnetkreise (12; 22) des ersten und zweiten  
Elektromagneten geregelt ist,  
dadurch gekennzeichnet, daß die Leistungsverstärker (13, 23)  
20 aus Umschalt-Verstärkern bestehen, daß die Spulen (11; 21)  
des ersten und des zweiten Elektromagneten direkt induktive  
Positionsdetektoren bilden; daß Mittel (14; 24) vorgesehen  
sind, um gleichzeitig am Eingang der die Spulen (11; 21) der  
ersten und zweiten, gegenmagnetisierten Elektromagneten  
speisenden Leistungsverstärker (13; 23) in Überlagerung des  
25 von den Regelkreisen (31, 32) kommenden Hauptstroms einen  
sinusförmigen Strom  $I_0 \sin \omega t$  einer konstanten Amplitude  $I_0$ ,  
einer Kreisfrequenz  $\omega$  und identischer Phase einzuspeisen,  
wobei das Verhältnis zwischen der vom Verstärker (13, 23)  
gelieferten Erfassungsspannung einer Kreisfrequenz  $\omega$  und der  
30 Spannung, die die vom entsprechenden Elektromagneten ausge-  
übte Kraft liefert, zwischen 5 und 20% und vorzugsweise nahe  
10% liegt, und daß es Schaltungen (41 bis 44) aufweist, um  
die Positionsinformation, die die Stärke des Hauptstroms  
bestimmt, der von den Regelkreisen (31, 32) an die Lei-



stungsverstärker (13, 23) angelegt werden soll, direkt ausgehend von den Spannungen  $u_1$ ,  $u_2$  an den Klemmen der Magnetspulen (11; 21) zu entnehmen, die mit der Frequenz des sinusförmigen Stroms gemessen werden, die eine Trägerfrequenz der Kreisfrequenz  $w$  bildet.

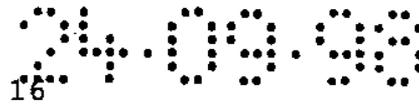
2. Aktives Magnetlager nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Frequenz des eingespeisten sinusförmigen Stroms einer Kreisfrequenz  $w$  wesentlich höher ist als der gewünschte Durchlaßbereich in der geschlossenen Schleife der Regelkreise.

3. Aktives Magnetlager nach Anspruch 1 oder Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Umschalt-Verstärker (13, 23) eine Umschaltfrequenz von mehreren zehn Kilohertz aufweisen.

4. Aktives Magnetlager nach einem beliebigen der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Umschaltfrequenzen der Umschalt-Leistungsverstärker (13, 23) und die Frequenz des sinusförmigen Stroms einer Kreisfrequenz  $w$  synchronisiert werden.

5. Aktives Magnetlager nach einem beliebigen der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Spannungen  $u_1$ ,  $u_2$  an den Klemmen der Magnetspulen (11, 21), die mit der Frequenz des sinusförmigen Stroms einer Kreisfrequenz  $w$  gemessen werden, in Differential-Messung in einem Komparator (41) verglichen werden, der eine Spannung  $u$  proportional zur Verschiebung des Körpers (1) in Bezug auf seine Gleichgewichtstellung liefert.

6. Aktives Magnetlager nach einem beliebigen der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Schaltungen (41 bis 44) für die Entnahme der Positionsinformation ein Bandfilter (42) aufweisen, das auf die Frequenz des sinusförmigen



Stroms einer Kreisfrequenz  $w$  zentriert ist und eine Halbbreite aufweist, die an den gewünschte Durchlaßbereich der Regelkreise (31, 32) angepaßt ist.

5 7. Aktives Magnetlager nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Schaltungen (41 bis 44) zur Entnahme der Positionsinformation einen synchronen Demodulator (43) aufweisen, der am Ausgang des Bandfilters (42) angeordnet ist und von der Frequenz des sinusförmigen Stroms einer Kreisfrequenz  $w$  gesteuert wird.  
10

8. Aktives Magnetlager nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Schaltungen (41 bis 44) zur Entnahme der Positionsinformation ein Filter der zweiten Ordnung (44) aufweisen, um die Frequenz zu filtern, die einer Kreisfrequenz  $2w$  entspricht, welche von der Vollweg-Demodulation innerhalb des synchronen Demodulators (43) erzeugt wird.  
15

9. Aktives Magnetlager nach einem beliebigen der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Elektromagneten so bemessen sind, daß die höchste von diesen Elektromagneten geforderte Kraft für eine magnetische Induktion erhalten wird, die außerhalb der Sättigungszone des Materials liegt, das zur Bildung der Schaltkreise (12; 22) der Elektromagneten verwendet wird.  
20  
25

10. Aktives Magnetlager nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Magnetkreise (12; 22) der Elektromagneten aus einem Material bestehen, das in Abhängigkeit von der magnetischen Induktion eine wenig variable Permeabilität hat, insbesondere in der Betriebszone der Elektromagneten, die sich weit von den Sättigungszonen entfernt befindet.  
30

11. Aktives Magnetlager nach einem beliebigen der Ansprüche 1 bis 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Regelkreise (31,  
35

32), die die Leistungsverstärker (13; 23) speisen, einen Komparator (31) für den Vergleich zwischen dem Positionssignal, das von den Schaltungen (41 bis 44) zur Entnahme der Positionsinformation kommt, und einem Positions-Sollwert, und mindestens Schaltungen (32) aufweisen, die eine Signalverarbeitungs-Korrektorschaltung und eine Linearisierungsschaltung des Ruhestroms enthalten.

5

10

15

12. Aktives Magnetlager nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Regelkreise weiter Fluß-Regelschleifen aufweisen, die zwischen die eine Korrektorschaltung und eine Linearisierungsschaltung enthaltenden Schaltungen (32) einerseits und Additionsschaltungen (14, 24) andererseits zwischengeschoben sind, die die Einspeisemittel bilden, welche den sinusförmigen Strom  $I_0 \sin \omega t$  einer Kreisfrequenz  $\omega$  empfangen.

20

25

30

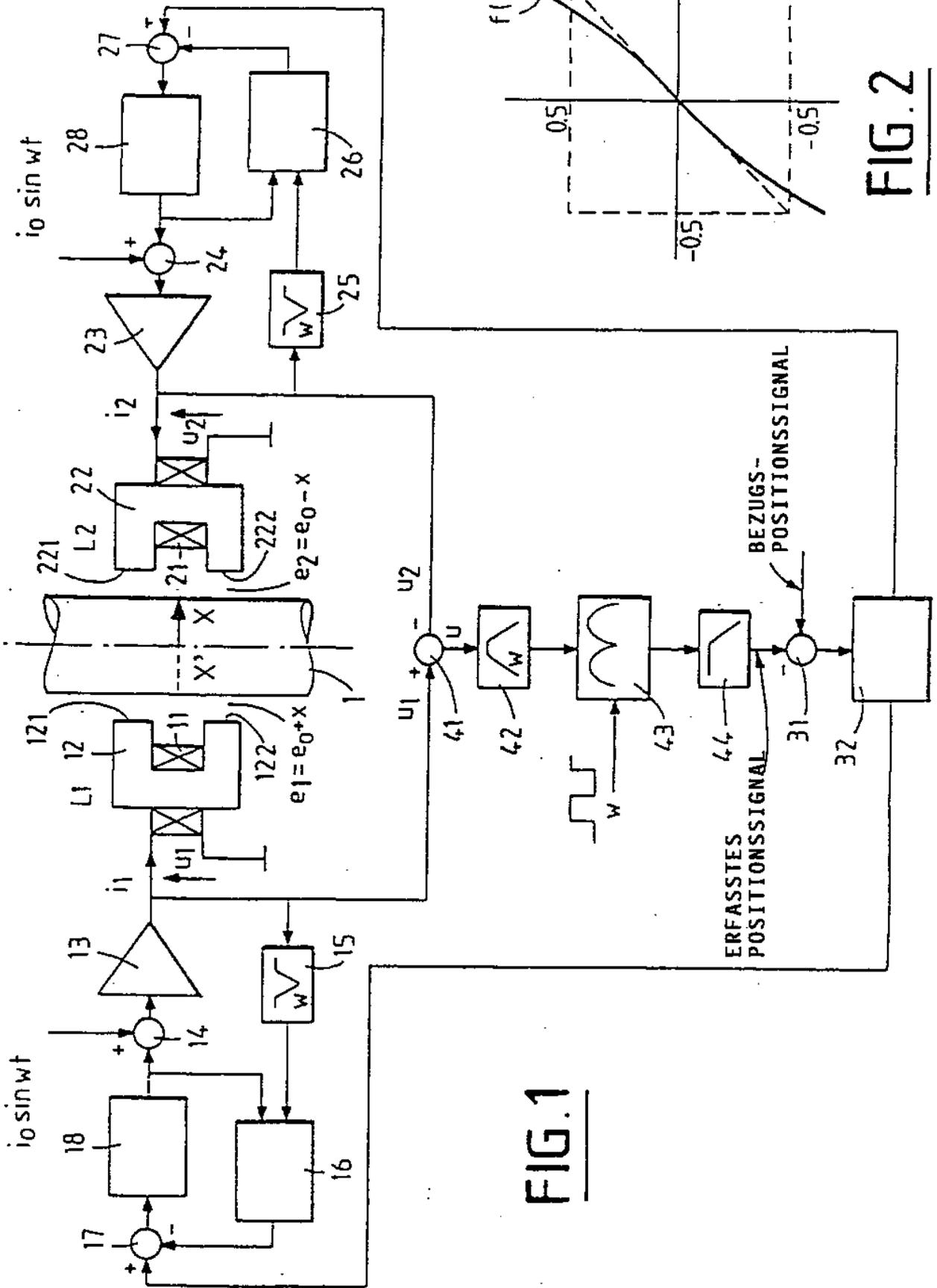
13. Aktives Magnetlager nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, daß jede Fluß-Regelschleife ein Sperrkreis-Filter (15; 25), das auf eine Frequenz einer Kreisfrequenz  $\omega$  zentriert ist und am Eingang das Ausgangs-Spannungssignal des entsprechenden Verstärkers (13; 23) empfängt, eine Fluß-Berechnungsschaltung (16; 26), an die einerseits das Ausgangssignal des entsprechenden Sperrkreis-Filters (15; 25) und andererseits das Ausgangssignal eines Fluß-Reglers (18; 28) angelegt werden, das auch an einen Eingang der entsprechenden Additionsschaltung (14; 24) angelegt wird, und eine Subtrahierschaltung (17; 27) enthält, die vom von den eine Korrektorschaltung und eine Linearisierungsschaltung enthaltenden Schaltungen (32) kommenden Signal das Signal subtrahiert, das von der entsprechenden Fluß-Berechnungsschaltung (16; 26) kommt, und ein Ausgangssignal an den Eingang der entsprechenden Fluß-Regelschaltung (18; 28) liefert.

35

14. Aktives Magnetlager, das zwei Systeme von aktiven Ma-

24.09.98  
18

gnetlagern gemäß einem beliebigen der Ansprüche 1 bis 13  
enthält, die gemäß zwei Richtungen  $XX'$ ,  $YY'$  ausgerichtet  
sind, die zueinander senkrecht liegen.



**FIG. 1**

**FIG. 2**