

51

Int. Cl.: F 16 c, 32/00

BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



52

Deutsche Kl.: 47 b, 32/04

10

Offenlegungsschrift 2 213 513

11

21

Aktenzeichen: P 22 13 513.3

22

Anmeldetag: 20. März 1972

43

Offenlegungstag: 27. September 1973

Ausstellungspriorität: —

30

Unionspriorität

32

Datum: —

33

Land: —

31

Aktenzeichen: —

54

Bezeichnung: Gleichströmgesteuertes magnetisches Lager

61

Zusatz zu: —

62

Ausscheidung aus: —

71

Anmelder: Padana AG, Zug (Schweiz)

Vertreter gem. § 16 PatG. Eideneier, F., Dipl.-Ing.; Ruff, M., Dipl.-Chem. Dr.;
Beier, I., Dipl.-Ing.; Pat.-Anwälte, 7000 Stuttgart

72

Als Erfinder benannt Gewekw, Werner, 3054 Rodenberg

56

Rechercheantrag gemäß § 28 a PatG ist gestellt
Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht zu ziehende Druckschriften:
GB-PS 1 257 423
Zeitschrift »messtechnik«, 1972,
H. 1, S. 1 bis 6

DT 2213513

PATENTANWÄLTE

Dipl.-Ing. EIDENEIER

Dipl.-Chem. Dr. RUFF

Dipl.-Ing. J. BEIER

2213513

7 STUTTGART 1

Neckarstraße 50

Telefon 22 70 51

20. März 1972 JB/Rie.

Anmelderin: Padana AG, Zug/Schweiz, Daarer Straße 37

A 14 120

Gleichstromgesteuertes magnetisches Lager

Die Erfindung betrifft ein gleichstromgesteuertes magnetisches Lager für einen Körper, bei dem von Sensoren Signale geliefert werden, die von Veränderungen des Körpers gegenüber seiner Sollage abhängen und über ein Regelgerät elektromagnetischen Mitteln zugeführt werden, die auf den Körper einwirkende magnetische Kräfte erzeugen.

Derartige gleichstromgesteuerte magnetische Lager sind bekannt (vgl. DT-OS 1 750 602). Die Ansteuerung der elektromagnetischen Mittel (Spulen) vom Ausgang des verwendeten Regelgerätes her, weist jedoch den Nachteil auf, daß der Widerstand der elektromagnetischen Mittel nicht frequenz-

309839/0168

2213513

unabhängig ist, sondern vielmehr mit wachsender Frequenz der von den Sensoren wahrgenommenen Veränderungen des Körpers gegenüber seiner Sollage (insbesondere bei rotierenden Körpern) und entsprechend bei wachsender Frequenz zur Ansteuerung der elektromagnetischen Mittel zur Erzeugung entsprechender Rückstellkräfte zunimmt. Da aber die Rückstellkräfte, die in Abhängigkeit der von den Sensoren abgegebenen Signale durch entsprechende Ansteuerung der elektromagnetischen Mittel erzeugt werden sollen, nur von diesen und den bestimmten Übertragungseigenschaften des Regelgerätes, nicht aber von der Frequenz am Ausgang des Regelgerätes abhängen sollen, konnte man bei den seit her bekannt gewordenen Schaltungen nur eine Stromansteuerung verwenden, d.h. in Abhängigkeit der von den Sensoren abgegebenen Signale mußte entsprechend in den Ausgangskreis des Regelgerätes, der den elektromagnetischen Mitteln zugeführt wurde, ein Strom eingepreßt werden. Stromansteuerung wiederum bedingt hohe Versorgungsspannungen, die ihrerseits - gerade bei niedrigeren Frequenzen - eine höhere elektrische Verlustleistung, die in thermische Leistung umgesetzt wird, mit sich bringt. Spannungsansteuerung ist bei diesen bekannten Anordnungen wegen der erwähnten Frequenzabhängigkeit des Strom/Spannungsverhältnisses und der unterschiedlichen Phasenlage von Strom und Spannung zueinander in Abhängigkeit von der Frequenz nicht möglich.

Die Frequenzabhängigkeit der bekannten Anordnungen macht sich besonders dann störend bemerkbar, wenn der gelagerte Körper ein sich drehender Körper, beispielsweise ein mit sehr hohen Drehzahlen umlaufender magnetisch und daher berührungsfrei gelagerter Rotor einer Pumpe ist. Dann hat die beschriebene Frequenzabhängigkeit ferner den Nachteil, daß das Regelgerät durch drehzahlsynchrone Signale übersteuert wird, d.h. auf Signale anspricht, die von Unregel-

309839/0168

mäßigkeiten des Rotors selbst (Unrundheiten etc.) bewirkt werden, ohne daß sie auf eine Auslenkung der Drehachse des Rotors aus der Sollage zurückgehen und die demgemäß auch nicht zur Erzeugung von auf den Körper einwirkenden magnetischen Rückstellkräften führen sollen. Dies gilt vor allem dann, wenn der Rotor im überlagerkritischen Drehzahlbereich rotiert, d.h. oberhalb der Drehzahl, bei der die Eigenfrequenz des Regelkreises liegt.

Die genannten Nachteile treten bei allen bekannten gleichstromgesteuerten magnetischen Lagern auf. Als "gleichstromgesteuert" bezeichnet man dabei solche Lager, bei denen die Ansteuerung der elektromagnetischen Mittel nicht durch einen mit der eigentlichen Regelgröße modulierten Wechselstrom-Träger, sondern durch die Regelgröße selbst erfolgt. Der verwendete Begriff der "Gleichstromsteuerung" steht nicht im Widerspruch zu der Tatsache, daß die Regelgröße selbst Schwankungen unterworfen ist, die - insbesondere bei sich drehenden Körpern - periodisch sind und daher eine Berücksichtigung der Frequenzabhängigkeit des Ausgangskreises des Regelgerätes erforderlich machen.

Bei Arbeiten mit Stromansteuerung bei gleichstromgesteuerten magnetischen Lagern, d.h. mit eingprägtem, in Abhängigkeit von der Regelgröße geregelttem Strom bei Ansteuerung der elektromagnetischen Mittel tritt ferner neben dem aufgezeigten Nachteil der Notwendigkeit einer höheren Versorgungsspannung noch der Nachteil auf, daß die an und für sich im Gegensatz zur Spannungsansteuerung mögliche Umkehr der Wirkungsrichtung einen hohen apparativen Aufwand verursacht. Scheut man diesen und arbeitet man mit einer elektrischen Vormagnetisierung, so wird hierdurch ein hoher Leistungsaufwand bedingt.

Aufgabe der Erfindung ist es, die dargestellten Nachteile der bekannten gleichstromgesteuerten magnetischen Lager zu vermeiden.

Es ist ferner Aufgabe der Erfindung, ein gleichstromgesteuertes magnetisches Lager zu schaffen, dessen Leistungsbedarf gegenüber den bekannten Lagern erheblich geringer ist.

Es ist ferner Aufgabe der Erfindung, ein gleichstromgesteuertes magnetisches Lager zu schaffen, bei dem unter der Voraussetzung, daß die elektromagnetischen Mittel gleich dimensioniert^{sind}, geringere Versorgungsspannungen als bei den seither bekannten Lagern erforderlich sind.

Es ist ferner Aufgabe der Erfindung, ein gleichstromgesteuertes magnetisches Lager zu schaffen, bei dem eine Spannungsansteuerung der elektromagnetischen Mittel möglich ist.

Es ist ferner Aufgabe der Erfindung, ein gleichstromgesteuertes magnetisches Lager zu schaffen, bei dem der durch die Frequenzabhängigkeit der elektromagnetischen Mittel bedingte Leistungsverlust der Ansteuerung ausgeschaltet ist.

Es ist ferner Aufgabe der Erfindung, ein gleichstromgesteuertes magnetisches Lager zu schaffen, bei dem die in thermische Leistung umgesetzte Verlustleistung möglichst gering ist.

Es ist ferner Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein gleichstromgesteuertes magnetisches Lager für rotierende Körper zu schaffen, bei dem eine Übersteuerung des Reglers durch drehzahlsynchrone Stromsignale, insbesondere im überlagerkritischen Drehzahlbereich vermieden wird.

Erfindungsgemäß ist ein gleichstromgesteuertes magnetisches Lager für einen Körper, bei dem von Sensoren Signale ge-

liefert werden, die von Veränderungen des Körpers gegenüber seiner Sollage abhängen und über ein Regelgerät elektromagnetischen Mitteln zugeführt werden, die auf den Körper einwirkende magnetische Kräfte erzeugen, dadurch gekennzeichnet, daß den in einer Richtung auf den Körper einwirkenden elektromagnetischen Mitteln die Signale sowohl über eine Kapazität, als auch über eine Induktivität oder einen Ohm'schen Widerstand oder eine Parallelschaltung beider zugeführt werden.

Die Zuführung der Signale zu den elektromagnetischen Mitteln über eine Kapazität bewirkt, daß die Frequenzabhängigkeit des Spannungs/Stromverhältnisses im Ausgangskreis des Regelgerätes und die dadurch notwendige höhere Versorgungsspannung für die elektromagnetischen Mittel kompensiert wird. Die gleichzeitige Zuführung der Signale über eine weitere Induktivität oder einen Ohm'schen Widerstand sorgt dafür, daß bei niedriger Frequenz die Kapazität nicht überwiegend den Widerstand im Ausgangskreis des Regelgerätes bestimmt. Man erhält also durch die erfindungsgemäß vorgeschlagene Zuführung der Signale einmal über eine Kapazität, zum anderen über eine Induktivität oder über einen Ohm'schen Widerstand oder eine Parallelschaltung beider sowohl einen Zuführungspfad für die Zuführung der niederfrequenten Signale, als auch einen Zuführungspfad für eine Blindleistung in den elektromagnetischen Mitteln kompensierende Zuführung höher frequenter Signale. Ist jeweils in einer Krafrichtung nur ein elektromagnetisches Mittel vorgesehen, so wird die Erfindung dadurch verwirklicht, daß mit diesem elektromagnetischen Mittel ein komplexer Widerstand in Reihe geschaltet ist, der aus der Parallelschaltung einer Kapazität mit einer Induktivität oder einem Ohm'schen Widerstand gebildet wird. Sind jedoch zwei in einer Krafrichtung wirkende elektromagnetische Mittel vorgesehen, so

können z.B. dem einen elektromagnetischen Mittel die Signale über einen Ohm'schen Widerstand, dem anderen über die Kapazität zugeführt werden, so daß sich die Widerstände, die mit beiden elektromagnetischen Mitteln (die in einer Krafrichtung wirken) jeweils in Reihe geschaltet sind, sich als Komponenten eines aus einer Kapazität und der Parallelschaltung einer Induktivität oder eines Ohm'schen Widerstandes gebildeten komplexen Widerstandes darstellen.

Durch die erfindungsgemäße Lösung der eingangs dargestellten Aufgaben werden die Nachteile der seither bekannten Anordnungen vermieden. Es wird insbesondere infolge der gewonnenen Frequenzunabhängigkeit im interessierenden Regelbereich eine Spannungsansteuerung der elektromagnetischen Mittel möglich, die gegenüber den seither notwendigen Stromansteuerungen eine erhebliche Leistungseinsparung mit sich bringt. Da zur Zeit für Schaltungen, wie sie zur Spannungsansteuerung erforderlich sind, integrierte Schaltungen zur Verfügung stehen, dasselbe jedoch für Schaltungen, wie sie zur Stromansteuerung erforderlich sind, nicht der Fall ist, läßt sich bei Anwendung der erfindungsgemäßen Lösung die Regelung auch in erheblich vereinfachter Weise hinsichtlich des Schaltungsaufwandes realisieren, als das seither bei den bekannten gleichstromgesteuerten magnetischen Lagern durchführbar war.

Die gewonnene Frequenzunabhängigkeit des Ausgangskreises des Regelgerätes vermeidet den eingangs erwähnten Nachteil der Beeinflussung des Regelsystems durch drehzahl-synchrone Signale, vor allem im überlagerkritischen Drehzahlbereich und eine daraus gegebenenfalls resultierende Übersteuerung.

Die erfindungsgemäße Anordnung eignet sich auch zur Ansteuerung von rotationssymmetrischen Feldverdrängungs-

spulen unter Verwendung von Ringwicklungen. Sie ermöglicht es, unter Ausnutzung der angegebenen Vorteile und Überwindung der beschriebenen Nachteile bekannter Schaltungen in jeder Kraftrichtung zwei elektromagnetische Mittel vorzusehen und diese über verschiedene Komponenten des durch eine Kapazität einerseits und eine Induktivität und/oder einen Ohm'schen Widerstand gebildeten komplexen Widerstandes andererseits anzusteuern.

Es ist ferner möglich, die Reihenschaltung von zwei elektromagnetischen Mitteln, die in dem magnetischen Lager symmetrisch zu dem zu lagernden Körper angeordnet sind, zu einer "Einheit" zusammenzufassen und hintereinander geschaltet anzusteuern. Es ergibt sich dann bei Lagerebenen, die zwei mal zwei elektromagnetische Mittel aufweisen, eine Anordnung wie bei einer Drehfeldspule, die zur magnetischen Lagerung rotierender Körper besonders vorteilhaft ist.

Die Erfindung wird im folgenden anhand der beigefügten Zeichnungen, die Ausführungsbeispiele darstellen, beschrieben. Es bedeuten:

- Fig. 1 eine schematische Darstellung eines ersten Ausführungsbeispiels der Erfindung;
- Fig. 2 eine schematische Darstellung eines zweiten Ausführungsbeispiels der Erfindung;
- Fig. 3 eine schematische Darstellung eines dritten Ausführungsbeispiels der Erfindung;
- Fig. 4 eine schematische Darstellung eines vierten Ausführungsbeispiels der Erfindung;
- Fig. 5 die Darstellung einer "voll"-magnetischen Lagerebene unter Verwendung von zwei Anordnungen nach Fig. 1;
- Fig. 6 eine schematische Darstellung einer Lagerebene für einen rotierenden Körper unter Verwendung von zwei Anordnungen nach Fig. 2;

- Fig. 7 eine schematische Darstellung einer magnetischen Lagerebene für einen rotierenden Körper, die einer Kombination der in Fig. 3 und Fig. 4 gezeigten Anordnungen entspricht;
- Fig. 8 eine weitere Darstellung einer magnetischen Lagerebene gemäß der Erfindung;
- Fig. 9 eine Darstellung der in den Fig. 1 bis 8 verwendeten komplexen Widerstände;
- Fig. 10 eine weitere schematische Darstellung einer magnetischen Lagerebene für einen rotierenden Körper (ähnlich wie Fig. 7), die die Kurven C in Fig. 12, 13 ergibt;
- Fig. 11 eine schematische, lediglich der Erläuterung dienende Darstellung einer magnetischen Lagerebene, die die Kurven D in Fig. 12, 13 ergibt;
- Fig. 12 und 13 Diagramme, die für verschiedene Ansteuerungen der bei dem magnetischen Lager gemäß der Erfindung verwendeten elektromagnetischen Mittel den Kurvenverlauf der Kraft- und der Phasenvor- bzw. -nacheilung in Abhängigkeit von der Frequenz wiedergeben.

In Fig. 1 ist der einfachste Fall einer Anwendung der Erfindung auf ein gleichstromgesteuertes magnetisches Lager gezeigt. Die Bedeutung der "Gleichstromansteuerung" wurde bereits eingangs erläutert. Das Lager dient zur Lagerung eines Körpers 1. Er wird durch ein elektromagnetisches Mittel 2 und die von diesem, wenn es stromdurchflossen ist, auf ihn ausgeübte Kraft in einer bestimmten Lage gehalten. Diese Lage wird von dem Sensor 3 "abgetastet". Der Sensor 3 stellt Veränderungen des Körpers 1 gegenüber seiner Sollage fest und gibt entsprechende Ausgangssignale an das Regelgerät 4 ab, das in Abhängigkeit von diesen

Ausgangssignalen den Strom in dem elektromagnetischen Mittel 2 steuert. Insoweit ist das dargestellte gleichstromgesteuerte magnetische Lager bekannt (vgl. oben). Als "elektromagnetische Mittel" werden dabei Spulen verwendet. Die im folgenden gegebene Darstellung der Ausführungsbeispiele verwendet durchweg Spulen.

Die Darstellung nach Fig. 1 zeigt ein Lager in der Richtung, in der die von der Spule 2 ausgehende Kraft auf den Körper 1 einwirkt. In den Fig. 2, 3, 6, 7, 8, 10, 11 werden magnetische Lager gezeigt, die zur Lagerung rotierender Körper dienen. Wie aus den prinzipiellen Darstellungen nach Fig. 1, 4 und 5 jedoch zu ersehen, ist die Erfindung nicht auf die Lagerung rotierender Körper beschränkt, sondern kann generell zur magnetischen Lagerung von Körpern in einer oder mehreren Ebenen Verwendung finden.

Erfindungsgemäß ist nun mit der Spule 2 ein komplexer Widerstand 5 in Reihe geschaltet, der, wie aus Fig. 9 ersichtlich, durch eine Kapazität 6 gebildet wird, der - im Ausführungsbeispiel nach Fig. 9 - ein Ohm'scher Widerstand 7 und eine Induktivität (Spule) 8 parallel geschaltet sind.

Dieser komplexe Widerstand hat die Aufgabe, in noch weiter unten näher zu erläuternder Weise die Frequenzabhängigkeit des durch die Spule 2 fließenden und die auf den Körper 1 ausgeübte Kraft bestimmenden Stromes im Ausgangskreis des Regelgerätes 4 bei vorgegebener Spannung und die Frequenzabhängigkeit der Phasenverschiebung zwischen dem Strom in der Spule 2 und der Spannung vom Ausgang des Regelgerätes zu kompensieren.

Die Kapazität wird dabei bei niederen Frequenzen entweder durch den Ohm'schen Widerstand 7 oder durch die Induktivität 8 oder durch eine Parallelschaltung beider überbrückt,

2213513

so daß im Ergebnis die hochfrequenten Ausgangssignale des Regelgerätes 4 über die Kapazität 6, die niederfrequenten Ausgangssignale des Regelgerätes 4 über die der Kapazität 6 parallel geschalteten Schaltelemente, also im Ausführungsbeispiel nach Fig. 9 über die Induktivität 8 und den Ohm'schen Widerstand 7 zugeführt werden.

Der komplexe Widerstand 5, wie er beim Ausführungsbeispiel 1 mit der Spule 2 in Reihe geschaltet ist, kann in Abweichung von Fig. 9 auch dadurch gebildet werden, daß der Kapazität lediglich eine Induktivität oder lediglich ein Ohm'scher Widerstand parallel geschaltet werden.

Die in den Fig. 2 gezeigten komplexen Widerstände 9 und 10, der in Fig. 3 gezeigte komplexe Widerstand 11, die in der Fig. 5 gezeigten komplexen Widerstände 12 und 13, die in Fig. 6 gezeigten komplexen Widerstände 14 und 15 sowie die in Fig. 8 gezeigten komplexen Widerstände 16 und 17 sind ebenso ausgebildet und unterliegen denselben Abwandlungsmöglichkeiten, wie das soeben unter Bezugnahme auf Fig. 1 und 9 beschrieben wurde.

In Fig. 2 ist ein weiteres Ausführungsbeispiel der Erfindung dargestellt, in dem ein Körper 1 durch das magnetische Lager in der durch strichpunktierte Linie 18 angedeuteten horizontalen Ebene gelagert werden soll (die Lagerung in vertikaler Richtung, also in senkrecht zur Linie 18 verlaufender Richtung erfolgt durch weitere, im vorliegenden Zusammenhang nicht interessierende Mittel, vgl. aber DT-OS 1 750 602). Es sind hier zwei Spulen 19 und 20 vorgesehen. Es ist ferner, wie in Fig. 1, ein Sensor 3 vorgesehen, der die Abweichungen des Körpers 1 von seiner Sollage mißt und über ein Regelgerät 4 entsprechende Steuersignale an die beiden Spulen 19 und 20 gibt. Beide Spulen 19 und 20 sind mit komplexen Widerständen 9 und 10 in Reihe geschaltet, deren Aufbau derselbe ist, wie derjenige des

309839/0168

2213513

komplexen Widerstandes 5, der bereits im Zusammenhang mit Fig. 1 beschrieben wurde. Auf den Körper 1 wirken dann Differenzkräfte, die sich aus der Differenz der von den Spulen 19 und 20 ausgeübten Kräfte ergeben. Man erhält auf diese Weise einen symmetrischen Aufbau.

In Fig. 3 ist eine Anordnung gezeigt, die sich von der Anordnung nach Fig. 2 dadurch unterscheidet, daß die beiden Spulen 21 und 22 miteinander in Reihe und zusammen mit dem komplexen Widerstand 11 in Reihe geschaltet sind. Im Hinblick auf die entgegengesetzte Wirkungsrichtung der von den beiden Spulen 21 und 22 bei Durchfluß von Strom ausgeübten Kräfte ist diese Schaltung dann anwendbar, wenn eine Vormagnetisierung durch Nullstrom nicht vorgenommen wird. Eine solche, schaltungsmäßig sehr einfache Hintereinanderschaltung beider Spulen in Richtung der Linie 18 ist nur dann möglich, wenn eine Vormagnetisierung durch Nullstrom nicht stattfindet. Dies aber wiederum ermöglicht eine Spannungsansteuerung, wie sie durch die im Regelbereich gegebene Frequenzunabhängigkeit des Spannungs/Strom-Verhältnisses gemäß der Erfindung gewährleistet wird.

In Abweichung von Fig. 3 kann man auch die beiden Spulen 21 und 22 parallel schalten und diese beiden parallel geschalteten Spulen mit einem komplexen Widerstand 11 hintereinander schalten und, wie in Fig. 3, nur einem Ausgang des Regelgerätes 4 zuordnen.

In der Anordnung nach Fig. 4 sind zwei Spulen 23 und 24 vorgesehen, die beide in der strichpunktiert angedeuteten Richtung auf den Körper 1 einwirken. Dabei ist die Spule 23 mit einem Schaltelement 25, die Spule 24 mit einem Schaltelement 26 in Reihe geschaltet. Eines der Schaltelemente 25 bzw. 26 stellt eine Kapazität, das andere eine Induktivität, einen Ohm'schen Widerstand oder eine Parallelschaltung einer

309839/0168

2213513

Induktivität mit einem Ohm'schen Widerstand dar. Auf diese Weise wird sichergestellt, daß bei niedrigen Frequenzen diejenige Spule der Spulen 23 bzw. 24 wirksam wird, die mit einem Ohm'schen Widerstand oder einer Parallelschaltung aus einem Ohm'schen Widerstand und aus einer Induktivität in Reihe geschaltet ist, bei höheren Frequenzen dagegen diejenige der beiden Spulen 23 bzw. 24 wirksam wird, die mit einer Kapazität in Reihe geschaltet wird. Die beiden Schaltelemente 25 und 26 enthalten zusammen die gleichen Komponenten wie der komplexe Widerstand, der in Fig. 9 dargestellt ist und dort aus der Kapazität 6, dem Ohm'schen Widerstand 7 und der Induktivität 8 gebildet wird. Der Unterschied besteht darin, daß die Komponenten des komplexen Widerstandes, der in Fig. 9 dargestellt ist, auf zwei verschiedene Reihenschaltungen mit zwei Spulen 23 und 24 und entsprechend zwei Zuführungspfade vom Regelgerät 4 her aufgespalten werden. Man trennt also hier die "Funktionen" der Spulen; der eine Teil wirkt überwiegend nur bei Gleichstrom und niedrigerer Frequenz, der andere überwiegend bei höheren Frequenzen. Dadurch ist eine erhebliche Vereinfachung des Aufwandes gegeben.

Bei der Anordnung nach Fig. 5 wirken zwei magnetische Lager, wie sie je einzeln im Zusammenhang mit Fig. 1 dargestellt worden sind, in verschiedenen Richtungen auf einen Körper. Das erste Lager besteht aus dem Sensor 3, dem Regelgerät 4, dem komplexen Widerstand 12 und der Spule 27, das zweite Lager aus dem Sensor 3', dem Regelgerät 4', dem komplexen Widerstand 13 und der Spule 27'. Das Ausführungsbeispiel nach Fig. 5 zeigt, wie man dadurch, daß man mehrere magnetische Lager nach der Erfindung in verschiedenen Richtungen auf einen Körper einwirken lassen kann, "voll"-magnetische Lagerebenen herstellen kann.

Die Anordnung nach Fig. 6 zeigt ein weiteres, in der Praxis sehr bedeutsames Ausführungsbeispiel der Erfindung. Ein

309839/0168

rotierender Körper 1 wird hier in horizontaler Richtung (zur Lagerung in vertikaler Richtung vgl. z.B. DT-OS 1 750 602) durch die Spulen 28, 29, 30, 31 gehalten. Die Veränderungen des rotierenden Körpers von seiner Sollage (d.h. von der Sollage seiner Drehachse 18) wird von den Sensoren 3 und 3' festgestellt, die entsprechende Ausgangssignale an die Regelgerät 4 und 4' geben. Der Ausgang des Regelgerätes 4 steuert über den komplexen Widerstand 14 die beiden hintereinander geschalteten Spulen 28 und 30, das Regelgerät 4' über den komplexen Widerstand 15 die beiden hintereinander geschalteten Spulen 29 und 31 an. Die komplexen Widerstände 14 und 15 sind so aufgebaut, wie das im Zusammenhang mit der Beschreibung der Anordnung nach Fig. 1 dargelegt worden ist. Es handelt sich bei der Anordnung nach Fig. 6 im Prinzip um zwei Anordnungen, wie sie je einzeln im Zusammenhang mit Fig. 3 erläutert worden sind.

Die Anordnung nach Fig. 7 entsteht durch eine Kombination der beiden Anordnungen nach den Fig. 3 und 4. Die magnetische Lagerung des um die Drehachse 18 rotierenden Körpers 1 erfolgt durch acht, in vier Paaren zu je zwei angeordnete Spulen 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39. Die Spulenpaare 32 und 33, 34 und 35, 36 und 37, 38 und 39 wirken jeweils in einer Richtung. Jeweils zwei Spulenpaare liegen einander gegenüber. Jeweils zwei gegenüberliegende Spulen, die jeweils zu einem Spulenpaar gehören, sind mit einem Schaltelement in Reihe geschaltet. Dabei stellen die Schaltelemente in der gleichen Weise Komponenten eines Kapazität aufweisenden komplexen Widerstandes dar, wie das bereits im Zusammenhang mit der Anordnung nach Fig. 4 erläutert worden ist. So ist die Reihenschaltung der beiden Spulen 37 und 32 mit einer Kapazität 40, die Reihenschaltung der Spulen 36 und 33 entweder mit einem Ohm'schen Widerstand 41 oder aber mit einer Parallelschaltung eines

Ohm'schen Widerstandes und einer Induktivität in Reihe geschaltet. Die Reihenschaltung der beiden Spulen 35 und 39 ist in Reihe geschaltet mit einer Kapazität 42, die Reihenschaltung der beiden Spulen 34 und 38 ist in Reihe mit einem Ohm'schen Widerstand 43 oder mit einer Parallelschaltung eines Ohm'schen Widerstandes und einer Induktivität geschaltet. Die Wirkungsweise von je zwei Spulenpaaren entspricht der der beiden einzelnen Spulen 21 und 22 in Fig. 3, die Wirkungen der beiden zu einem Spulenpaar gehörenden Spulen 32 und 33 der des Spulenpaares 23 und 24 nach Fig. 4. Die beiden Spulenpaare 32 und 33, 36 und 37 liegen am Ausgang des Regelgerätes 4, die beiden Spulenpaare 34 und 35, 38 und 39 am Ausgang des Regelgerätes 4'.

Die Anordnung nach Fig. 8 gleicht hinsichtlich der Anordnung der Spulen der Anordnung nach Fig. 6, jedoch sind die Spulen nicht, wie in Fig. 6, hintereinander, sondern parallel geschaltet. Die Parallelschaltung der beiden Spulen 44 und 45 ist der komplexe Widerstand 16, der Parallelschaltung der beiden Spulen 46 und 47 der komplexe Widerstand 17 in Reihe geschaltet. Die Parallelschaltung der Spulen 44 und 45, die zusammen in Reihe mit dem komplexen Widerstand 16 geschaltet sind, liegt am Ausgang des Regelgerätes 4, das von dem Sensor 3 gesteuert wird. Die Parallelschaltung der Spulen 46 und 47, hintereinandergeschaltet mit dem komplexen Widerstand 17, liegt am Ausgang des Regelgerätes 4', das vom Sensor 3' angesteuert wird.

Im folgenden wir anhand der in den Fig. 12 und 13 dargestellten Kurven, die für die in den Fig. 10 und 11 dargestellten Schaltungen gemessen bzw. errechnet wurden, die Wirkungsweise der Erfindung erläutert:

Fig. 12 zeigt in doppeltlogarithmischer Darstellung die Frequenzabhängigkeit der maximal erzielbaren Kraft, die

309839/0168

von einer Spule auf den Körper 1 ausgeübt wird bei einem magnetischen Lager mit vorgegebenen Parametern (Versorgungsspannung, elektromagnetisches Mittel, Eckfrequenz). Fig. 13 zeigt den Phasengang zwischen Kraft und Ausgangssignal des Regelgerätes in Abhängigkeit von der Frequenz in einfachlogarithmischer Darstellung.

Der einfachste und ideale Fall der Stromsteuerung, wie er bei den bekannten Anordnungen Verwendung findet, ist in Fig. 12 und 13 durch die Kurve A angezeigt. Dabei wird definitionsgemäß ein konstanter Strom eingeprägt. Zwischen Kraft und Strom tritt keine Phasenverschiebung auf.

Die Kurven B in Fig. 12 und 13 zeigen die Frequenzabhängigkeit von Kraft und Phasenverschiebung bei der Spannungssteuerung der Spule ohne Maßnahmen gemäß der Erfindung, d.h. wie sich eine Spannungssteuerung bei den bekannten gleichstromgesteuerten magnetischen Lagern auswirken würde, wenn man die eingangs geschilderten Nachteile der Stromsteuerung vermeiden, eine Spannungssteuerung aber ohne die Maßnahmen gemäß der Erfindung vornehmen wollte. Es handelt sich also um die Spannungssteuerung einer reinen Spule. Wie zu erwarten, nimmt die Kraft, die dem Strom in der Spule proportional ist, mit wachsender Frequenz ab (vgl. Fig. 12). Mit wachsender Frequenz gibt sich auch eine Phasennacheilung (Fig. 13).

Die Kurve D in Fig. 12 und 13 zeigt die Abhängigkeit von Kraft und Phasenverschiebung für eine Schaltung nach Fig. 11. Ein solches Lager kann als Mittellager an einem biegeweichen gestreckten Rotor zur Erzeugung von Dampfkräften in einem bestimmten Frequenzbereich Verwendung finden. Hier werden die Spulen 48, 49, 50, 51, wobei die Spulen 48 und 50 bzw. 49 und 51 hintereinander geschaltet sind, über mit den hintereinander geschalteten Spulenpaaren ebenfalls in Reihe geschaltete Kapazitäten 52 und 53 im Wege der Spannungs-

ansteuerung angesteuert. Es ergibt sich dabei das typische Verhalten eines Reihenschwingkreises, d.h. der Kraftverlauf hat bei einer bestimmten Frequenz, die in Fig. 12 zwischen 50 und 100 Hz liegt, ein Maximum. Beiderseits des Maximums fällt, sowohl zu niedrigeren Frequenzen, als auch zu höheren Frequenzen hin die Kraft ab. Im Bereich gegenüber dieser Frequenz niedrigerer Frequenzen ergibt sich eine zu niedrigeren Frequenzen hin zunehmende Phasenvoreilung, im Bereich höherer Frequenzen eine zu höheren Frequenzen hin zunehmende Phasennacheilung (Fig. 13).

Die Kurve C schließlich zeigt das Verhalten einer Schaltung gem. Fig. 10, die ein in der Praxis, sehr bedeutsames Ausführungsbeispiel der Erfindung darstellt. Die Schaltung nach Fig. 10 entspricht im wesentlichen derjenigen, die im Zusammenhang mit Fig. 7 beschrieben wurde. Der Unterschied zu der Schaltung in Fig. 7 besteht darin, daß je zwei gegenüberliegende Spulenpaare v von beiden Seiten her über Verstärker 54 und 55 bzw. 54' und 55' angesteuert werden und daß eine rotationssymmetrische Feldverdrängungsspule Anwendung findet. Die Spulen 32 und 37 sind hintereinander und ferner mit dem Ohm'schen Widerstand 56 hintereinander geschaltet. Die Spulen 33 und 36 sind parallel geschaltet, die durch sie gebildete Parallelschaltung mit der Kapazität 59 in Reihe geschaltet. Es ergibt sich damit, daß jeweils einem der Spulenpaare 32 und 33, 34 und 35, 36 und 37, 38 und 39 die Ausgangssignale des Regelgerätes einmal über eine Kapazität, zum anderen über einen Ohm'schen Widerstand zugeführt werden, also über Schaltelemente, die sich als Komponenten eines aus Ohm'schem Widerstand und Kapazität gebildeten komplexen Widerstandes darstellen. Mit der Schaltung nach Fig. 10 wurden die Kurven C in Fig. 12 und 13 gemessen. Es ergibt sich hier (vgl. Fig. 12) eine in einem sehr weiten Bereich konstante Kraft. Sie fällt dann (bei einer Frequenz, die höher ist als die Resonanzfrequenz des durch Kapazität und Induktivität der Spule gebildeten Reihenschwingkreises) ab. In dem so begrenzten Bereich

weist die Kurve C jedoch einen Verlauf auf, der demjenigen der Kurve A weitgehend angenähert, d.h. weitgehend frequenzunabhängig ist. Dasselbe gilt, wie aus Fig. 13 ersichtlich, für die Phasenverschiebung. Auch hier ist bei der durch die Erfindung ermöglichten Spannungsansteuerung ein Verhalten zu erzielen, wie es weitgehend dem der seither bekannten, aber schaltungsmäßig viel aufwendigeren und leistungsmäßig ungünstigeren Stromansteuerung entspricht.

Die charakteristische Frequenz (Eckfrequenz) der Schaltung nach Fig. 10 kann durch eine entsprechende Dimensionierung der Schaltelemente bestimmt werden. Oberhalb der Frequenz, für die sich das Maximum der Kurve C in Fig. 12 ergibt, erfolgt mit wachsender Frequenz ein zunehmender Abbau der drehzahlsynchronen Regelkräfte. Dieser Abbau, der mit der Spannungsansteuerung möglich wird, stellt einen erheblichen Vorteil der Erfindung dar.

PATENTANSPRÜCHE

- 1) Gleichstromgesteuertes magnetisches Lager für einen Körper, bei dem von Sensoren Signale geliefert werden, die von Veränderungen des Körpers gegenüber seiner Sollage abhängen und über ein Regelgerät elektromagnetischen Mitteln zugeführt werden, die auf den Körper einwirkende magnetische Kräfte erzeugen, dadurch gekennzeichnet, daß den in einer Richtung auf den Körper einwirkenden elektromagnetischen Mitteln (2; 23, 24) die Signale sowohl über eine Kapazität (5, 6; 25, 6) als auch über eine Induktivität (5, 8; 26, 8) oder einen Ohm'schen Widerstand (5, 7; 26, 7) oder eine Parallelschaltung beider zugeführt werden.
- 2) Gleichstromgesteuertes magnetisches Lager nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die elektromagnetischen Mittel (2) mit einem komplexen Widerstand (5), der eine Kapazität (6) aufweist, in Reihe geschaltet sind (Fig. 1, Fig. 2),
- 3) Gleichstromgesteuertes magnetisches Lager nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß zwei elektromagnetische Mittel (21, 22), die auf den zu lagernden Körper (1) in entgegengesetzter Kraft-richtung einwirken, mit einem komplexen Widerstand (11), der eine Kapazität (6) aufweist, in Reihe geschaltet sind (Fig. 3).
- 4) Gleichstromgesteuertes magnetisches Lager nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zwei elektromagnetische Mittel (23, 24), die auf den zu regelnden Körper (1) in derselben Richtung einwirken, vorgesehen

- sind und mit dem ersten elektromagnetischen Mittel (23) eine Kapazität (26, 6), mit dem zweiten elektromagnetischen Mittel (24) ein Ohm'scher Widerstand oder eine Induktivität (26, 7, 8) in Reihe geschaltet ist.
- 5) Gleichstromgesteuertes magnetisches Lager nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß zwei elektromagnetische Mittel (27, 27') vorgesehen sind, die jeweils mit einem komplexen Widerstand (13) in Reihe geschaltet sind (Fig. 5).
- 6) Gleichstromgesteuertes magnetisches Lager nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß zwei Paare von in entgegengesetzter Richtung auf den zu regelnden Körper (1) einwirkenden elektromagnetischen Mitteln (28, 30; 29, 31) vorgesehen sind und jedes Paar von elektromagnetischen Mitteln (28, 30; 29, 31) mit einem komplexen Widerstand (15, 14) in Reihe geschaltet ist (Fig. 6).
- 7) Gleichstromgesteuertes magnetisches Lager nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß vier Paare von elektromagnetischen Mitteln (32, 33; 34, 35; 36, 37; 39, 39) vorgesehen sind, wobei jeweils die ein Paar bildenden beiden elektromagnetischen Mittel in derselben Richtung auf den zu regelnden Körper (1) einwirken und jeweils zwei Paare von elektromagnetischen Mitteln einander in Bezug auf den zu regelnden Körper (1) gegenüberliegend angeordnet sind und auf den zu regelnden Körper (1) in entgegengesetzter Richtung einwirken, und jeweils ein zu einem Paar gehörendes elektromagnetisches Mittel (33, 34, 36, 38) mit dem jeweils in Bezug auf den zu regelnden Körper (1) gegenüberliegenden elektromagnetischen Mittel und einer Kapazität (41), das andere zu einem Paar gehörende elektromagnetische Mittel (32, 35, 37, 39) mit dem anderen des gegenüberliegenden

Paares elektromagnetischer Mittel und einem Ohm'schen Widerstand oder einer Induktivität (40) in Reihe geschaltet ist (Fig. 7).

- 8) Gleichstromgesteuertes magnetisches Lager nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zwei in Bezug auf einen zu regelnden Körper gegenüberliegend angeordnete elektromagnetische Mittel (44, 45; 46, 47) parallel geschaltet und die Parallelschaltung beider mit einem komplexen Widerstand (16, 17) in Reihe geschaltet ist (Fig. 8).

- 9) Gleichstromgesteuertes magnetisches Lager nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß jeweils in Bezug auf den zu regelnden Körper einander gegenüberliegend zwei Paare von elektromagnetischen Mitteln (32, 33; 36, 37) vorgesehen sind und ein elektromagnetisches Mittel (32) eines Paares (32, 33) mit einem elektromagnetischen Mittel (37) des gegenüberliegenden Paares (36, 37) in Reihe geschaltet, das andere elektromagnetische Mittel (33) eines Paares (32, 33) mit dem anderen elektromagnetischen Mittel (36) eines Paares (36, 37) parallel geschaltet ist und eine Gruppe von zwei zusammengeschalteten, gegenüberliegenden elektromagnetischen Mitteln (32, 37) in Reihe mit einem ersten Schaltelement (56), die zweite Gruppe von einander gegenüberliegenden elektromagnetischen Mitteln (33, 36) in Reihe mit einem zweiten Schaltelement (57) geschaltet ist, wobei eines der beiden Schaltelemente (57) durch eine Kapazität, das andere der beiden Schaltelemente durch einen Ohm'schen Widerstand (56) durch eine Induktivität oder eine Parallelschaltung beider gebildet wird (Fig. 9).

- 10) Gleichstromgesteuertes magnetisches Lager nach Anspruch 1 oder einem der folgenden, dadurch gekennzeichnet, daß die elektromagnetischen Mittel durch eine Spannung angesteuert werden, die von den von den Sensoren (3) abgegebenen Signalen abhängig ist.

309839/0168

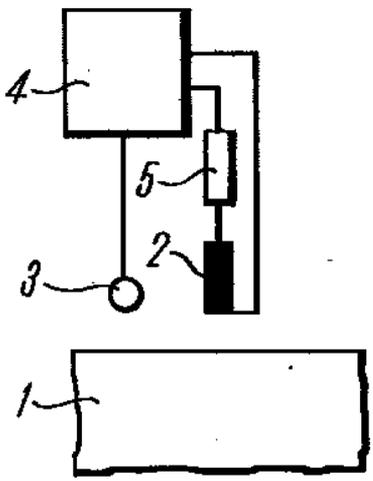


Fig. 1

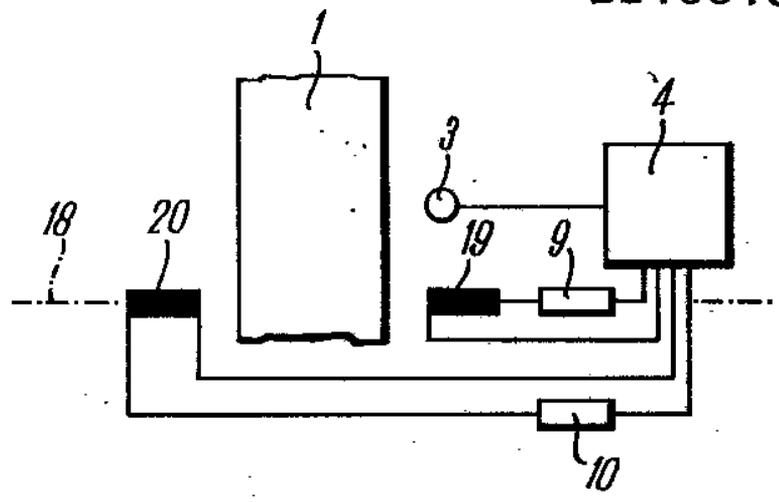


Fig. 2

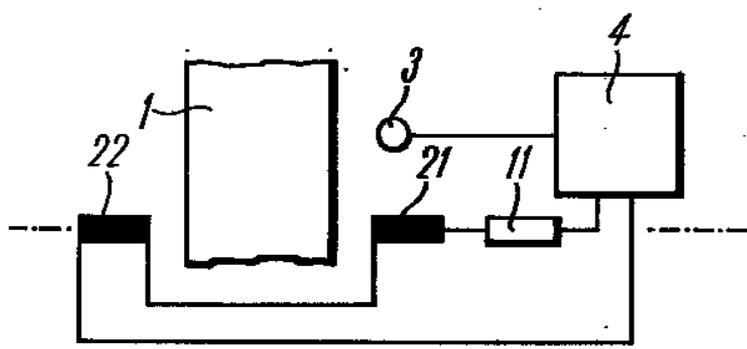


Fig. 3

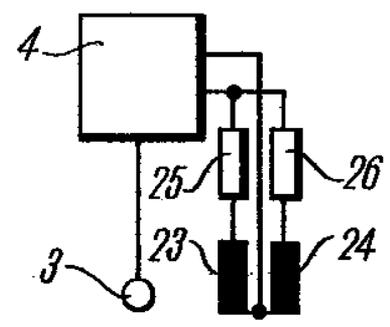


Fig. 4

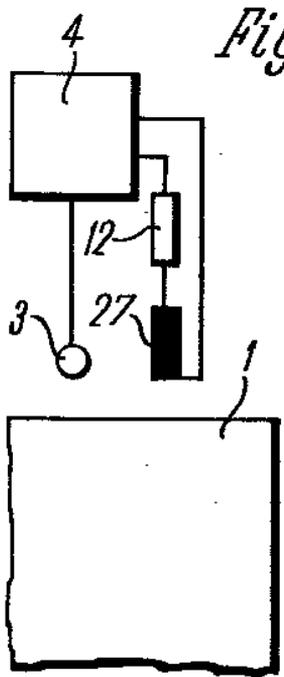


Fig. 5

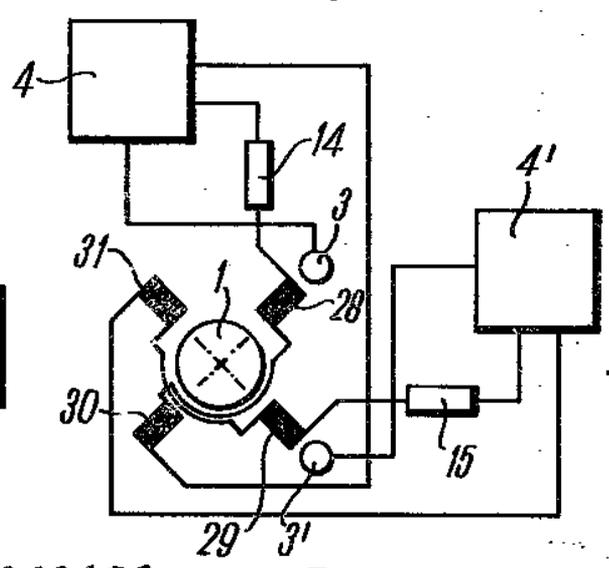
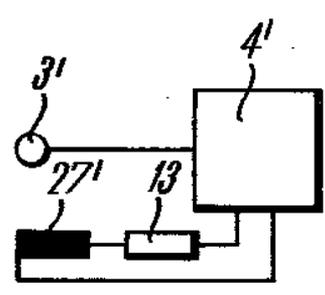


Fig. 6

309839/0168

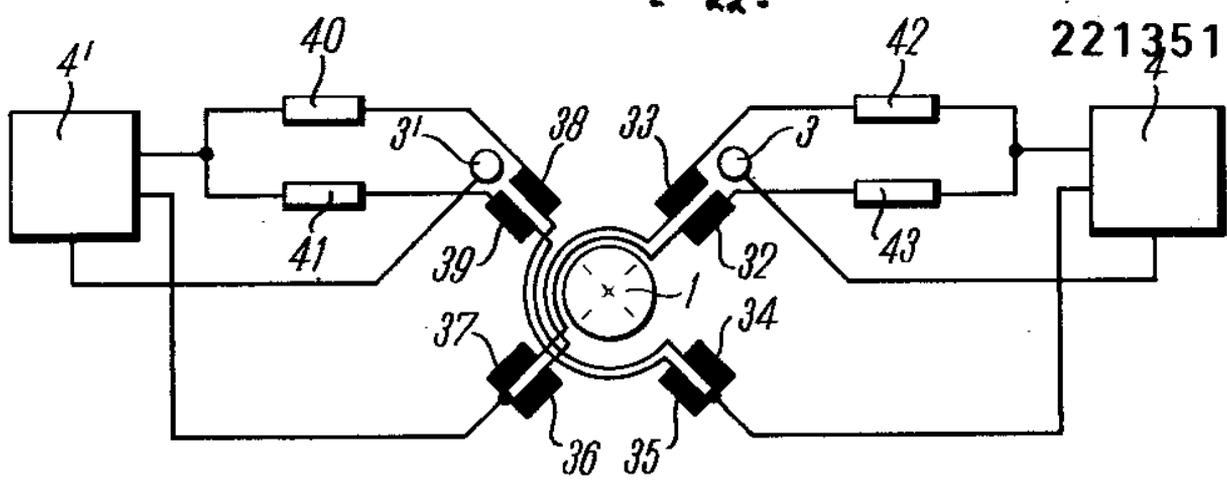


Fig.7

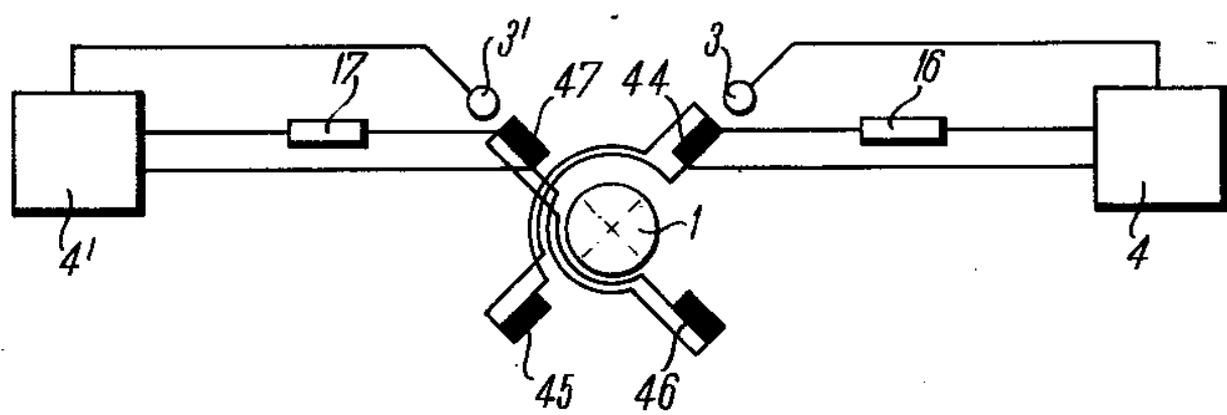


Fig.8

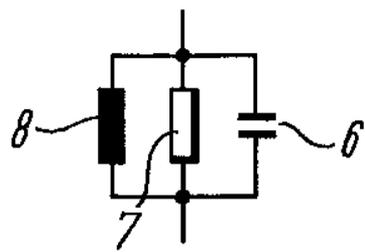


Fig.9

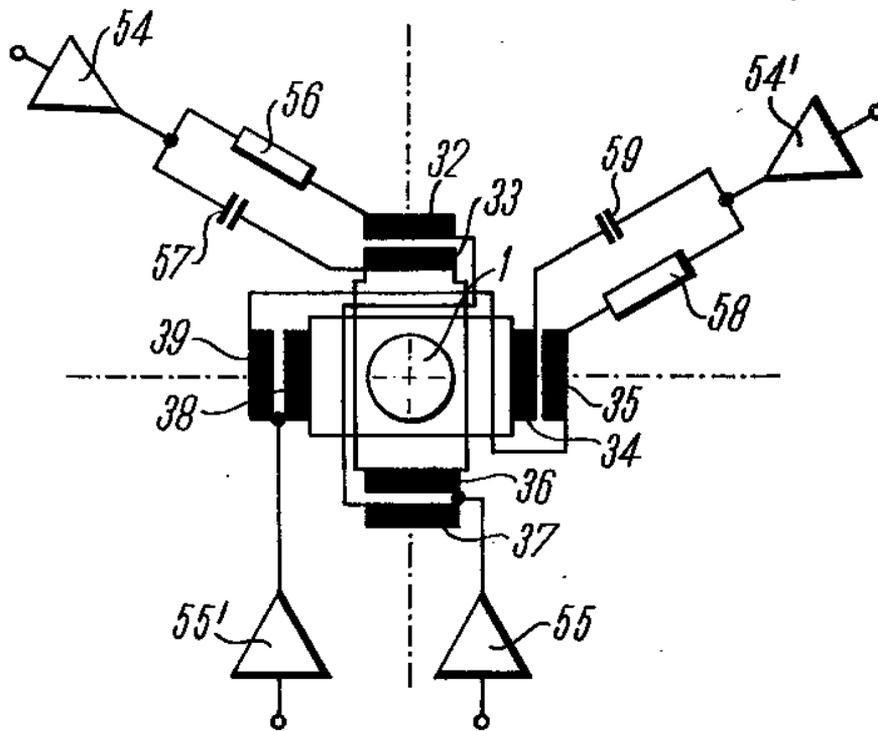


Fig. 10

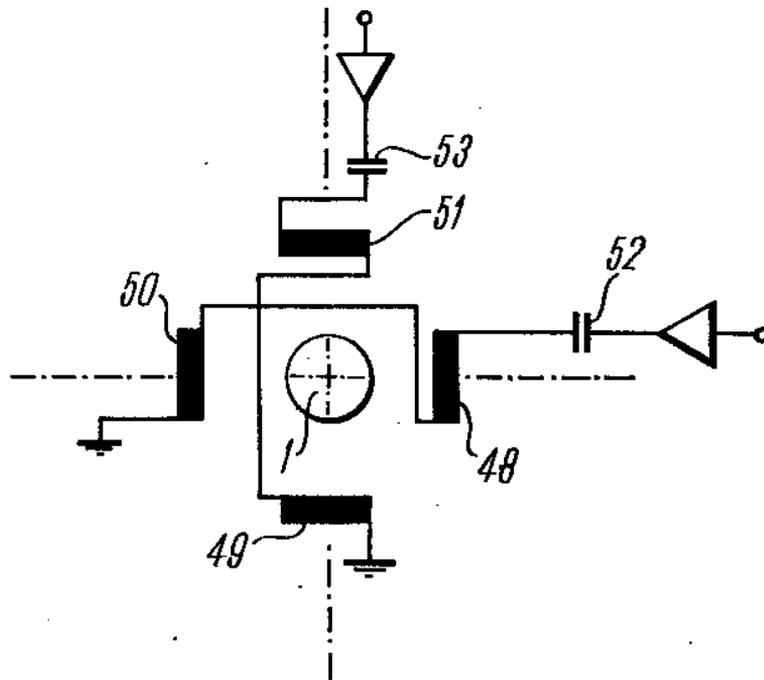


Fig. 11

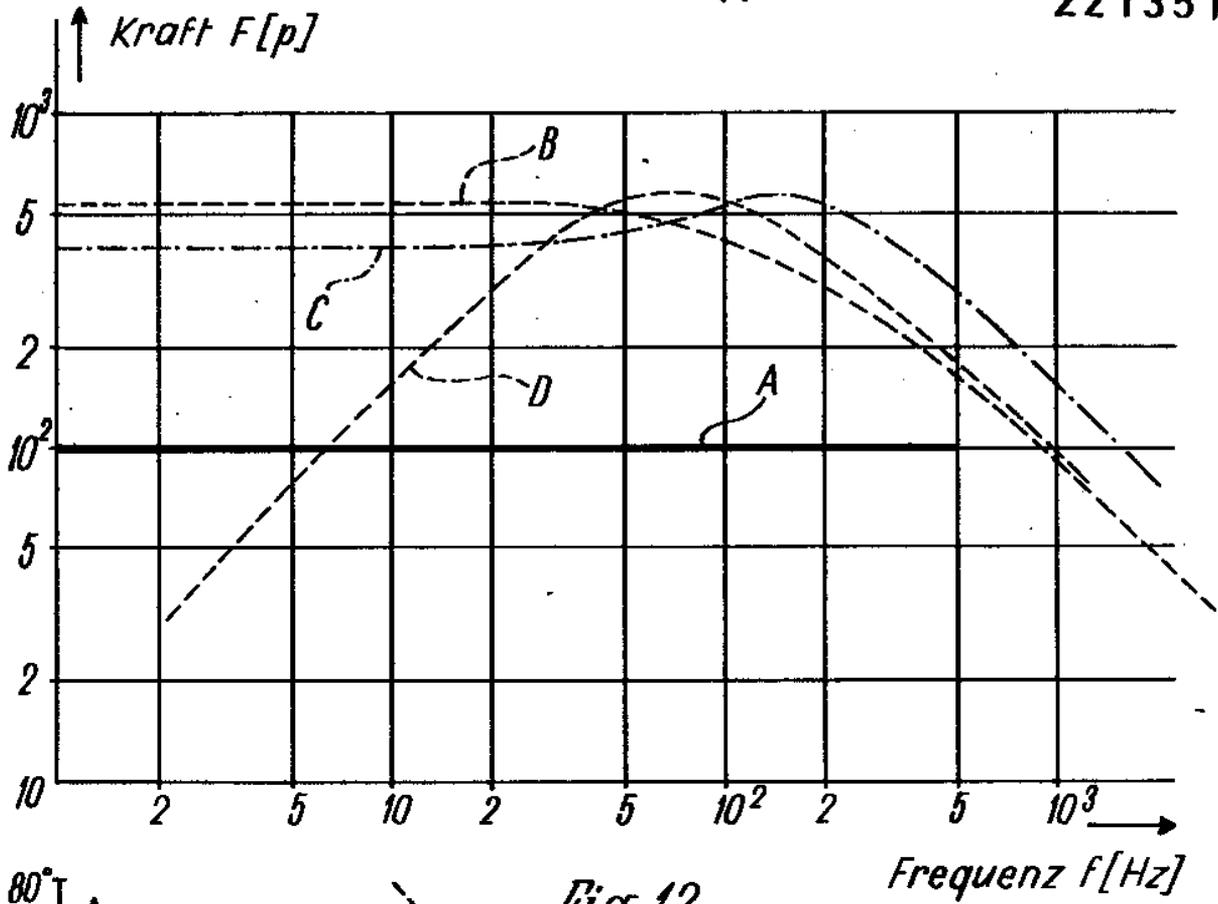


Fig. 12

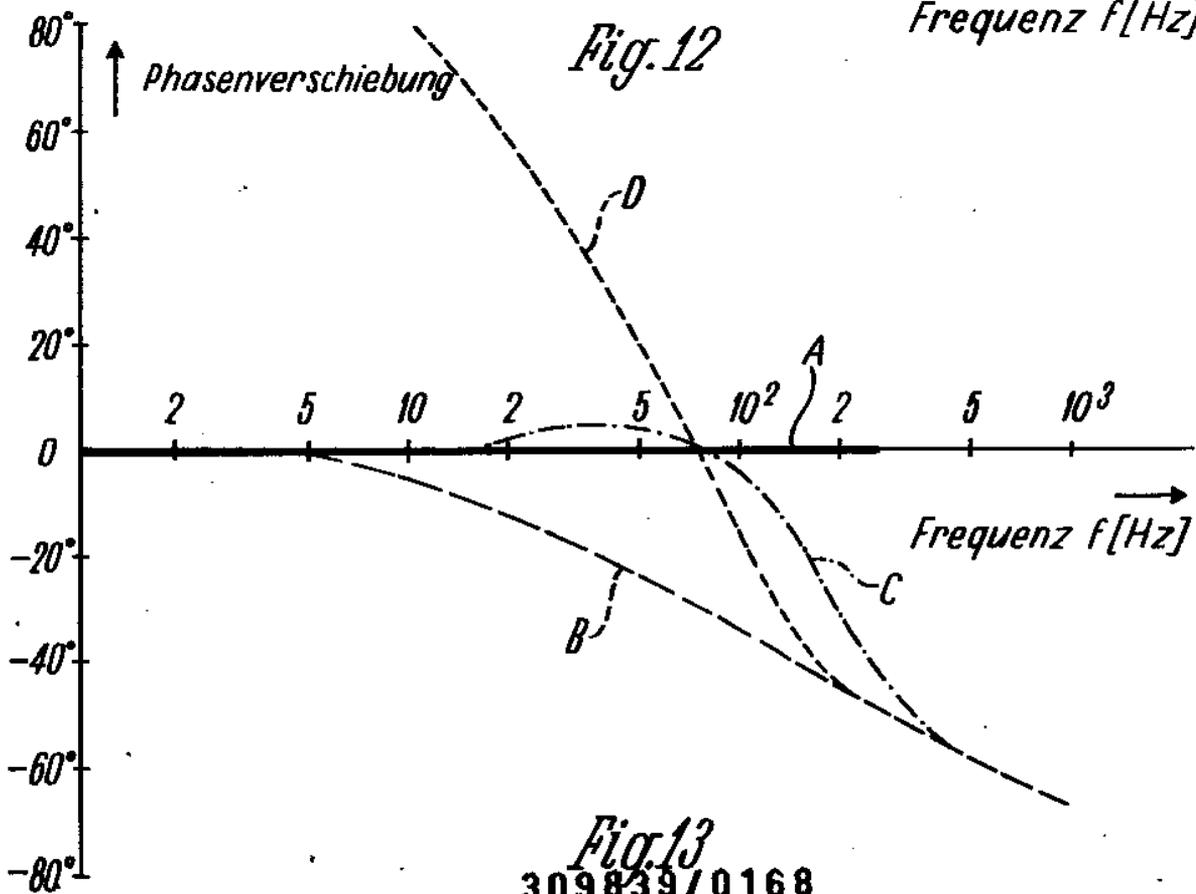


Fig. 13