

51

Int. Cl. 2:

H02K 5/16

19 BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND



DT 24 57 084 A1

11

# Offenlegungsschrift 24 57 084

21

Aktenzeichen: P 24 57 084.1-32

22

Anmeldetag: 30. 11. 74

23

Offenlegungstag: 10. 6. 76

30

Unionspriorität:

32 33 31

54

Bezeichnung: Radiales aktives magnetisches Lager

61

Zusatz zu: P 24 06 790.1

71

Anmelder: Licentia Patent-Verwaltungs-GmbH, 6000 Frankfurt

72

Erfinder: Hermann, Peter Konrad, Prof. Dr.-Ing., 1000 Berlin

Prüfungsantrag gem. § 28b PatG ist gestellt

DT 24 57 084 A1

ORIGINAL INSPECTED

Licentia Patent-Verwaltungs GmbH  
6 Frankfurt a.M., Theodor Stern Kai 1

Lehmann/li

B I 74/69

Radiales aktives magnetisches Lager.

(Zusatz zu Patentanmeldung P 24 06 790.1)

Das Hauptpatent .....(Patentanmeldung P 24 06 790.1) be-  
trifft ein radiales aktives magnetisches Lager mit Drehantrieb,  
bestehend aus der Kombination eines oder mehrerer Ständer und  
einem Rotor mit einem von Sensoren überwachten Luftspalt, wobei  
jeweils dem von der Ständerwicklung durch Speisung mit Drehstrom  
erzeugten Antriebsdrehfeld ein Steuerdrehfeld überlagert ist,  
derart, dass einem  $n$ -polpaarigen Antriebsdrehfeld ein  $(n\pm 1)$ -pol-  
paariges über die Sensoren moduliertes Steuerdrehfeld überla-  
gert ist.

Eine Erfindung vorstehender Art wird dadurch weitergebildet,  
dass eine in die als Sensoren wirkende Steuerdrehfeldwicklung  
induzierte, von einer Exzentrizität des Rotors abhängige Span-  
nung den Strom der Steuerdrehfeldwicklungen stellt.

Es wird also die Steuerdrehfeldwicklung als Sensorwicklung verwendet. Bei vorhandenem Antriebsdrehfeld wird in die Steuerdrehfeldwicklung nur bei vorhandener Exzentrizität des Läufers eine zusätzliche Spannung induziert, die z.3. beim Kurzschluss der Steuerdrehfeldwicklung einen Strom induziert, der seinerseits ein Steuerdrehfeld hervorruft, das in Verbindung mit dem Antriebsdrehfeld die radialen Stellkräfte vermindert, die bei Exzentrizität der Läuferachse auftreten und diese zu vergrössern suchen.

Bei nicht vorhandenen ohmschen und streuinduktiven Widerständen im Steuerkreis der Steuerdrehfeldwicklungen, ein Zustand, wie er durch aktive, negative Widerstände statt eines Kurzschlusses der Steuerdrehfeldwicklungen bewirkt werden kann, hebt das erzeugte Steuerdrehfeld den Einfluss der Exzentrizität des Läufers auf die Luftspaltinduktionsverteilung der Antriebsdrehfeldwicklungen gerade auf. Das Antriebsdrehfeld hat dann wieder die gleiche Rotationssymmetrie wie bei zentrischem Läufer, so dass keine Labilität der Läuferzentrierung wie bei üblichen Motoren und Generatoren verbleibt, die die einmal auftretende Exzentrizität zu vergrössern trachtet.

Der Abschluss der Steuerdrehfeldwicklungskreise mit die ohmschen Widerstände gerade kompensierenden aktiven negativen Widerstände besteht aus rückgekoppelten Verstärkern. Dies stellt zwar noch kein aktives magnetisches Lager mit stabiler Zentrierung des Läufers dar, wohl aber eine indifferente Lagerung, die die Maschine beispielsweise als Motorantrieb

für Fahrzeuge vorteilhaft verwendbar macht, bei denen der Läufer direkt auf die Radsatzachse und der Ständer auf dem elastisch gegen die Lager aufgehängten Wagenkasten oder Drehgestell befestigt wird, so dass die ungefederte Masse an den Radsätzen erheblich vermindert wird.

Wird den weiteren Möglichkeiten des Erfindungsgedankens entsprechend der aktive negative Abschlusswiderstand so ausgelegt, dass der ohmsche Widerstand des Steuerdrehfeldkreises zu Null ergänzt und der induktive Widerstand auf einen Restwert der Nutzflusskomponente der Wicklungsinduktivität verringert wird, der den Bruchteil  $1/k$  von dieser ausmacht, so entsteht eine magnetische, aktive, stabile Lagerung von einer Steifigkeit, die das  $k$ -fache des Betrages der Labilität der magnetischen Läuferstellkräfte bei offenen Steuerdrehfeldwicklungen ausmacht. Die Rückstellkräfte bei Läufer-Exzentrizitäten sind dann rein elastisch, also der vorhandenen Exzentrizität genau entgegengerichtet. Um auch eine Dämpfung etwa entstehender Lager-schwingungen zu erzielen, ist der negative Widerstand so zu dimensionieren, dass auch die ohmsche Komponente nicht ganz bzw. gar nicht kompensiert oder sogar durch zusätzliche ohmsche Abschlusswiderstände erhöht wird.

Ein spezielles Anwendungsgebiet des Erfindungsgedankens ist die zusätzliche magnetische gedämpfte Lagerung der Läufer von Motoren oder Generatoren mit überkritischer Drehzahl zur Erleichterung des Durchfahrens kritischer Drehzahlen beim Hochlaufen. Die Möglichkeit der magnetischen Läuferlagerung

kann aber auch bei der Betriebsdrehzahl angewendet werden, um zu Konstruktionen noch grösserer Läuferlänge und mit- hin kleinerer Durchmesser für gleiche Leistung der Ma- schinen vorzudringen als bei nur mechanischer Lagerung und labilisierenden magnetischen Feldkräften möglich ist. Langgestreckte Motorformen kleinen Durchmessers werden z.B. im Brunnenbau für Tiefpumpen benötigt.

Handelt es sich um Massnahmen zum leichteren Durchfahren der kritischen Drehzahlen, so kann die Steuerwicklung mit relativ sehr kleinem zusätzlichen Bedarf an Wickelquer- schnitt in den Ständernuten auskommen, da sie strommässig nur kurzzeitig belastet wird.

Die Kompensation der Induktivität der Steuerwicklungen durch negative, induktive, aktive Widerstände darf nicht die Gesamtinduktivität der Steuerwicklungsstromkreise negativ machen, was zu selbsterregten ungedämpften Lagerkraftschwin- gungen führen würde.

Aus diesem Grunde ist auch der Ersatz der aktiven, negativen, induktiven Abschlusswiderstände durch kapazitive Abschluss- widerstände in vielen Anwendungsfällen nicht möglich, weil für evtl. angeregte Frequenzen jedenfalls bei kompensierten ohmschen Widerständen in den Steuerstromkreisen Selbsterre- gung auftritt.

Bei fester Speisefrequenz kann jedoch auch mit kapazitivem Abschluss der Steuerstromkreise eine gedämpfte stabile magnetische Lagerung erreicht werden, wenn die Resonanzfre-

quenz unter der Speisefrequenz liegt und erforderlichenfalls ohmsche Reihen- oder Parallelwiderstände zu der Abschlusskapazität hinzugeschaltet werden.

Eine derartige magnetische Lagerung durch Abschluss der Steuerwicklungen mit passiven ohmschen und kapazitiven Widerständen kann auch nur zur Herstellung statischer oder nur langsam veränderlicher Lagerkräfte ausreichen, weil im Steuerstromkreis die Summen- und Differenzfrequenzen von Speisefrequenz und Schwingungsfrequenz der Exzentrizitäten wirksam ist, und die kapazitive Kompensation der Induktivität der Steuerwicklung frequenzabhängig ist.

Ausreichende Dämpfung von Lagerschwingungen mit passivem Widerstandsabschluss kann insbesondere bei kleinen Motoren nur mit relativ grossem Aufwand an Kupfer und Wickelvolumen für die Steuerwicklung erreicht werden, was aufwendiger sein kann als eine magnetische Lagerung unter Verwendung aktiver negativer ohmscher und induktiver Widerstände mit entsprechenden Verstärkerschaltungen.

Derartige aktive negative Widerstände als Abschluss für beide Steuerwicklungen einer Drehfeldmaschine zum Zwecke der magnetischen, auch für dynamische Beanspruchung geeigneten Lagerung von Drehfeldmaschinen werden im folgenden anhand einer Zeichnung schematisch erläutert.

Nach Fig. 1 wird die Steuerwicklung 1 als Induktivität  $L_1$  in Reihe mit einem ohmschen Widerstand  $R_1$  wirksam. In dieser Wicklung wird vom Speisestrom eine der Exzentrizität proportionale Spannung  $u_1$  induziert, die ebenfalls in Reihe ge-

schaltet dargestellt ist, so dass die Gesamtspannung an  $L_1$ ,  $R_1$  und  $u_1$  die Spannung an den Anschlussklemmen der Steuerwicklung darstellt. Diese wird in Reihe mit einer Vergleichsinduktivität 2, die auch mit zusätzlicher Sekundärwicklung ausgestattet sein kann, an den Ausgang eines Verstärkers 3 geschaltet, der spannungsmässig so gegengekoppelt ist, dass seine Ausgangsspannung  $u_{a3}$  zur Eingangsspannung  $u_{e3}$  in einem konstanten, nahezu stromunabhängigen Verstärkungsverhältnis steht.

Die Vergleichsinduktivität 2, bestehend aus der Reihenschaltung einer Induktivitätsgrösse  $L_2$  und einer Widerstandsgrösse  $R_2$ , ist in Reihe mit der Steuerwicklung 1 zum Erdpunkt hin verbunden, und es führt die elektrische Verbindung beider zum Verstärkereingang.:

$R_1$  und  $R_2$  setzen sich zusammen aus den ohmschen Anteilen von Steuerwicklung 1 und Vergleichsinduktivität 2 sowie bei  $R_1$ , dem Innenwiderstand des Verstärkerausganges ( $u_{a3}$ ) und zusätzlichen stellbaren Widerständen bei  $R_2$ , mit denen die Lager-schwingungen zusätzlich be- oder entdämpft werden können.

Die Lagersteifigkeit ist umso grösser, je kleiner der Induktionswert  $L_1 - (V-1) L_2$  gemacht wird. Er darf jedoch nicht negativ werden. Ferner ist die Schwingungsdämpfung umso grösser, je kleiner der Widerstandswert  $R_1 - (V - 1) R_2$  wird. Auch dieser Wert darf nicht negativ werden.

Da die Induktivität  $L_1$  der Steuerwicklung mit zunehmender Exzentrizität zunimmt, ist die Lagersteifigkeit der so er-

zeugten magnetischen Lagerung degressiv, das heisst, sie nimmt mit zunehmender Auslenkung ab, die Rückstellkraft steigt weniger als proportional mit anwachsender Exzentrizität. Dem kann dadurch begegnet werden, dass im Rückkopplungsweg des Verstärkers ein vorzugsweise mit dem Quadrat des ausgesteuerten Stromes  $i$  zunehmender Verstärkungsfaktor erzeugt wird, wobei die Randbedingung zu erfüllen ist, z.B. durch eine Strombegrenzerschaltung, dass der Strom  $i$  der Steuerwicklung im Luftspalt keine Induktion erzeugt, die grösser als die Induktion ist, die durch den Antriebsstrom hervorgerufen wird.

Eine weitere erfindungsgemässe Verbesserungsmöglichkeit der Lagersteifigkeit besteht in der konstruktiven Gestaltung der Vergleichsinduktivität  $2$  mit einem ferromagnetischen Kern derart, dass die dem maximalen Strom  $i$  entsprechende Feldstärke im Kern noch unterhalb derjenigen Feldstärke liegt, an der die Permeabilität des Kernmaterials ihr Maximum erreicht.

Fig. 2 zeigt eine weitere Schaltungsmöglichkeit für aktive negative Widerstände als Abschluss der Steuerwicklungskreise für magnetische Lagerung. Der Verstärker  $32$  ist bei dieser Schaltung strommässig so gegengekoppelt, dass der Ausgangstrom  $i_a$  der Eingangsspannung  $u_{e2}$  mit einem nahezu spannungsunabhängigen Proportionalitätsfaktor  $V_2$ , dem in diesem Fall dimensionsbehafteten Verstärkungsfaktor, proportional ist. Die Steuerwicklung  $1$  ist wie in Fig. 1 durch die Reihenschaltung von  $L_1$ ,  $u_1$  und  $R_1$  dargestellt. Sie wird in Reihe mit einem Rückkopplungswiderstand  $R_3$  an Verstärkerausgang und Erde angeschlossen. Parallel dazu wird ein Vergleichs-

zweig 22, bestehend aus Vergleichsinduktivität  $L_{22}$  und ohmschem Widerstand derselben einschliesslich zuschaltbarem ohmschen Widerstand  $R_{22}$  an den Verstärkerausgang und Erde (bzw. Sternpunkt) geschaltet, so dass der Ausgangsstrom  $i_a$  sich aufteilt in den Teilstrom  $i_{12}$  der Steuerwicklung und  $i_{22}$  des Vergleichszweiges. Die Spannung an Widerstand  $R_3$  dient als Eingangsspannung  $u_{e2}$  des Verstärkers.

Bei dieser Schaltung ist die Lagerung umso steifer, je kleiner der Induktionswert  $L_{12} - (V_2 R_3 - 1) L_{22}$  ist. Dieser darf jedoch nicht negativ werden. Die Dämpfung von Lagerschwingungen ist umso grösser, je kleiner der Widerstandswert  $R_1 - (V_2 R_3 - 1) R_{22}$  ist. Auch dieser Wert darf nicht negativ werden. Eine Kompensation der mit der Exzentrizität anwachsenden Induktivität  $L_1$  durch mit anwachsendem Strom  $i_a$ ;  $i_{12}$  und  $i_{22}$  zunehmendem Proportionalitätsfaktor  $L_2$  oder zunehmendem Vergleichsinduktivitätswert  $L_{22}$  ist bei dieser Schaltung noch effektiver als bei der zu Bild 1 beschriebenen. Als weitere Möglichkeit der Linearitätskorrektur der Steifigkeit kommt bei den Schaltungen hinzu, dass man für  $R_3$  einen mit dem Strom zunehmenden Widerstand verwenden kann. Vorzugsweise soll diese Stromabhängigkeit trägheitsfrei sein, so dass spannungsabhängige Widerstände solchen vorzuziehen sind, bei denen die Temperaturabhängigkeit durch Stromwärme wirksam ist.

Am Verstärkereingang kann auch, wie aus Fig. 3 ersichtlich, ein Spannungsteiler, bestehend aus der Reihenschaltung eines ohmschen Widerstandes  $R_4$  und eines durch antiparallele Dioden gebildeten, mit zunehmendem Strom abnehmenden Gleichrichter-

widerstandes  $R_d$ , zu einem mit zunehmendem Strom zunehmenden Verstärkungsfaktor benutzt werden (vergl..Fig. 3).

Eine Anwendung der vorstehenden Erfindung ist beispielsweise auch bei der modernen Gestaltung eines Lüfters möglich. Diese erfolgt dann derart, dass in einem Ständer berührungsfrei ein Läufer ring magnetisch gelagert ist, in dem die zur Bewegung der Luft bzw. eines Gases erforderlichen Flügel befestigt sind.

9 S. Beschreibung  
15 Patentansprüche  
1 Zeichnung m. 3 fig.

- 10 -

Licentia Patent-Verwaltungs GmbH  
6 Frankfurt a.M., Theodor Stern Kai 1

Lehmann/li

B I 74/69

P a t e n t a n s p r ü c h e

- 1.) Radiales aktives magnetisches Lager mit Drehantrieb, bestehend aus der Kombination eines oder mehrerer Ständer und einem Rotor mit einem von Sensoren überwachten Luftspalt, wobei jeweils dem von der Ständerwicklung durch Speisung mit Drehstrom erzeugten Antriebsdrehfeld ein Steuerdrehfeld überlagert ist, derart, dass einem  $n$ -polpaarigen Antriebsdrehfeld ein  $n^{\pm 1}$ -polpaariges über Sensoren modulierte Steuerdrehfeld überlagert ist nach Patent.....(Patentanmeldung P 24 06 790.1), dadurch gekennzeichnet, dass eine in die als Sensoren wirkenden Steuerdrehfeldwicklungen induzierte von einer Exzentrizität des Rotors abhängige Spannung den Strom der Steuerdrehfeldwicklungen stellt.
- 2.) Radiales aktives magnetisches Lager nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die in die Steuerwicklungen induzierten Spannungen an den Wicklungsenden der Steuerwicklungen abgegriffen werden.

. 11.

- 3.) Radiales aktives magnetisches Lager nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die in die Steuerwicklungen induzierten Spannungen kurzgeschlossen sind.
- 4.) Radiales aktives magnetisches Lager nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Steuerwicklungsenden über RC-Glieder verbunden sind.
- 5.) Radiales aktives magnetisches Lager nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Steuerwicklungsenden über aktive negative Widerstände verbunden sind.
- 6.) Radiales aktives magnetisches Lager nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass die aktiven negativen Widerstände aus Verstärkern und einer Rückkopplungsschaltung aufgebaut sind.
- 7.) Radiales aktives magnetisches Lager nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Rückkopplungsschaltungen aus der Reihenschaltung der Steuerwicklungen und je einer Vergleichsinduktivität aufgebaut sind.
- 8.) Radiales aktives magnetisches Lager nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass der Eingang der Verstärker mit der Vergleichsinduktivität und der Ausgang mit der Reihenschaltung von Steuerwicklung und Vergleichsinduktivität verbunden ist.
- 9.) Radiales aktives magnetisches Lager nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass der Rückkopplungsschaltung aus der Reihenschaltung der Steuerwicklungen mit ohmschem

- 12.

- Widerständen aufgebaut ist, wobei jeder Verstärker-  
eingang mit einem dieser Widerstände verbunden und  
der Ausgang mit der Reihenschaltung von Steuerwicklung  
und Widerstand verbunden ist.
- 10.) Radiales aktives magnetisches Lager nach Anspruch 9,  
dadurch gekennzeichnet, dass parallel zum Verstärker-  
ausgang und zur Rückkopplungsschaltung eine Vergleichs-  
induktivität mit ohmschem Reihenwiderstand angeordnet  
ist.
- 11.) Radiales aktives magnetisches Lager nach Anspruch  
7 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Verbindung  
zum Verstärkereingang über einen nichtlinearen Span-  
nungsteiler erfolgt.
- 12.) Radiales aktives magnetisches Lager nach Anspruch 11,  
dadurch gekennzeichnet, dass der Spannungsteiler aus  
der Reihenschaltung von antiparallelen Dioden und  
einem ohmschen Widerstand aufgebaut ist.
- 13.) Radiales aktives magnetisches Lager nach Anspruch 8,  
dadurch gekennzeichnet, dass die Vergleichsinduktivität  
mit einer Sekundärwicklung versehen ist, die in Reihe  
mit der elektrischen Verbindung der Steuerwicklung  
und der Primärwicklung der Vergleichsinduktivität einer-  
seits und dem Verstärkereingang andererseits geschaltet  
ist.
- 14.) Radiales aktives magnetisches Lager nach Anspruch 1 - 3,  
dadurch gekennzeichnet, dass die Vergleichsinduktivität mit  
einem ferromagnetischen Kern ausgeführt ist.

. 13.

- 15.) Radiales aktives magnetisches Lager nach Anspruch  
1 - 14, dadurch gekennzeichnet, dass es zur berührungsfreien Aufhängung des Läufers eines Lüfterantriebes  
in einem Ständer verwendet wird.

14  
Leerseite

FIG.1

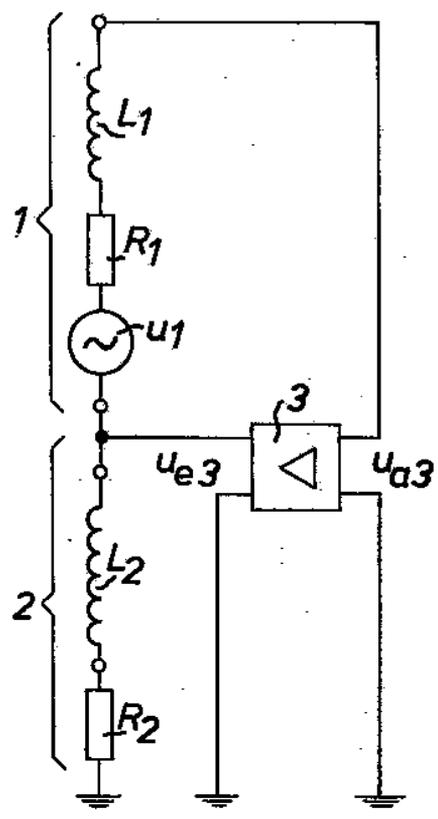


FIG.2

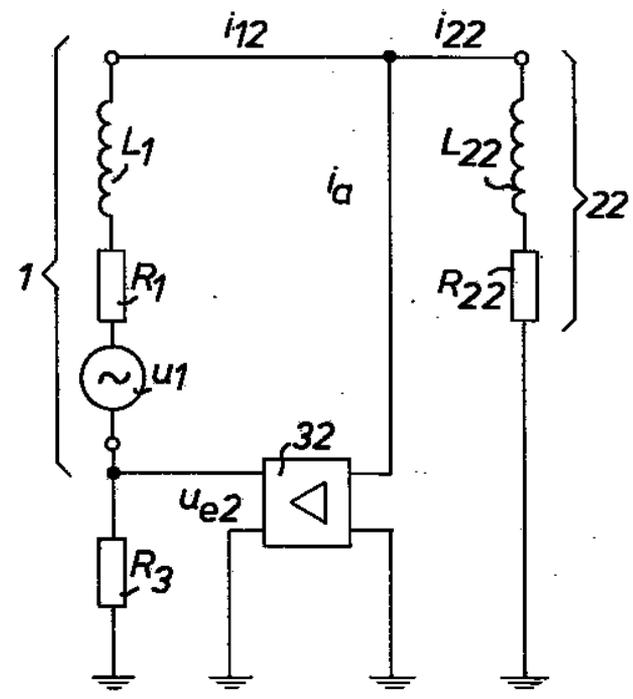


FIG.3

