



19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

12 **Offenlegungsschrift**  
10 **DE 44 15 248 A 1**

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

21 Aktenzeichen: P 44 15 248.5  
22 Anmeldetag: 30. 4. 94  
43 Offenlegungstag: 2. 11. 95

DE 44 15 248 A 1

71 Anmelder:  
Löffler, Horst, Dipl.-Ing., 89551 Königsbronn, DE

72 Erfinder:  
gleich Anmelder

54 Magnetlager mit integrierten Sensoren zur berührungslosen Führung gegeneinander bewegter Teile

57 Neben den bekannten Gleit-, Wälz- oder Luftlagern zur Führung gegeneinander bewegter Teile mechanischer Vorrichtungen gibt es Magnetlager, bei denen die Führung berührungsfrei über den geregelten Luftspalt von Elektromagneten erreicht wird.

Die Erfindung umfaßt Elemente für Magnetlager mit integrierter Messung der Luftspaltbreite, so daß zusätzliche Sensoren entfallen. Diese Magnetlagerelemente können gleichzeitig zur Dämpfung dynamischer Störungen verwendet werden, wie z. B. Gebäudeschwingungen oder Vibrationen.

DE 44 15 248 A 1

Teile mechanischer Vorrichtungen, die gegeneinander bewegt werden, benötigen Führungselemente, damit sie trotz der Einwirkung von Kräften in der vorgesehenen Bahn bleiben. Für Rotationsbewegungen sind Gleitlager oder Kugellager bekannte Ausführungen von Führungselementen. Für geradlinige Bewegungen werden in bekannter Weise z. B. Gleitführungen (Schwalbenschwanz) oder Wälzführungen (Kugelumlauf) verwendet. Beliebige Bewegungen in einer Ebene können mit Luftlagern geführt werden, bei denen das zu bewegend Element auf einem Luftpolster von einigen µm Dicke schwimmt.

Gleit- oder Wälzführungen haben die mit der Berührung der bewegten Teile verbundenen Nachteile Reibung, Verschleiß und Schmierung. Dadurch wird die Genauigkeit nicht nur begrenzt, der im fabrikenen Zustand erreichte Wert verschlechtert sich über die Lebensdauer. Einsatzmöglichkeiten in Vakuum oder Reinräumen sind begrenzt.

Luftlager haben einen ständigen Verbrauch an Luft, wodurch der Einsatz in Vakuum oder Reinräumen begrenzt ist. Sie besitzen eine endliche Steifigkeit, da die Dicke des Luftpolsters lastabhängig schwanken kann.

Magnetlager haben wie Luftlager die Vorteile der berührungsfreien Führung und der Freiheit für beliebige Bewegungen in einer Ebene. Darüber hinaus haben Magnetlager weitere Vorteile. Sie verbrauchen keine Luft, können deshalb auch im Vakuum, in Reinräumen, bei tiefen Temperaturen oder im Weltraum eingesetzt werden. Der Abstand zwischen den bewegten Teilen wird in einem geschlossenen Regelkreis über elektromagnetisch erzeugte Kräfte konstant gehalten. Im definierten Regelbereich besitzen sie deshalb eine nahezu unendliche Steifigkeit. Der Abstand zwischen den bewegten Teilen kann größer als bei Luftlagern gewählt werden. Dadurch sinken die Anforderungen an Genauigkeit und Oberflächengüte. Im Gegensatz zu Luftlagern sind Magnetlager weitgehend unempfindlich gegen Verkippen.

Abstandstoleranzen zwischen Führungs- und Gegenlager bei Geradführungen müssen bei Luftlagern durch Justierelemente ausgeglichen werden. Magnetlager gemäß der Erfindung tolerieren diese Fehler.

Zur Messung des Abstandes zwischen den gegeneinander bewegten Teilen als dem Istwert eines Positionsregelkreises benötigen Magnetlager Sensoren. Üblicherweise werden käufliche Sensoren (z. B. Hallensoren, Feldplatten, Wirbelstromsensoren) verwendet, die jedoch eigene Montage- und Justier Vorrichtungen sowie elektronische Steuerungen erfordern.

Die Erfindung umfaßt Magnetlagerelemente, die Abstandssensoren bereits enthalten. Unter Ausnutzung physikalischer Gesetzmäßigkeiten wird der zur Krafterzeugung verwendete Elektromagnet selbst gleichzeitig auch als Sensor verwendet oder es werden einfache Zusatzelemente integriert. Damit entfallen Montage und Justierung externer Sensoren und der Elektronikaufwand wird verringert.

Fig. 1 zeigt am Beispiel eines Einzelelementes die Wirkungsweise. Fig. 2 zeigt eine Ausführung der erfindungsgemäßen Vorrichtung für eine geradlinige Bewegung. Fig. 3 und 4 zeigen schematisch die elektronische Steuerung für zwei unterschiedliche Meßverfahren.

Wie aus Fig. 1 hervorgeht, ähnelt das Einzelelement eines Magnetlagers äußerlich dem Pad eines Luftlagers. Es stellt jedoch zusammen mit der Führungsbahn, auf

der es sich bewegt, einen Elektromagneten dar. D. h. die Führungsbahn muß aus weichmagnetischem Material sein. Eine ringförmige Spule 2 erzeugt ein Magnetfeld 3, das sich über den Eisenkörper 1, den Luftspalt 5 und die Führungsbahn 6 schließt. Zwischen Eisenkörper 1 und Führungsbahn 6 entsteht eine Kraft, die den Luftspalt zu verkürzen sucht. Ein Positionssensor ermittelt die Luftspaltbreite und eine im Bild nicht gezeigte elektronische Regelschaltung verändert den Spulenstrom in einer Weise, daß über die damit veränderliche Kraft des Magneten die Luftspaltbreite konstant gehalten wird, auch wenn Störungen auf das System einwirken.

Neben der in Fig. 1 gezeigten rotationssymmetrischen Form sind natürlich auch beliebige andere Formen möglich, in denen Elektromagneten realisiert werden können, z. B. rechteckige Bauformen oder Formen, wie sie z. B. aus handelsüblichen Transformatorblechen zusammengesetzt werden können. Für die Lagerung von rotierenden Teilen werden der Oberfläche der rotierenden Welle angepaßte konkave Pole verwendet.

Im Gegensatz zum Luftlager, bei dem eine Luftschicht, die unter Druck steht, die bewegten Teile auseinander hält, entstehen beim Magnetlager Zugkräfte. In einem geschlossenen System entsprechend Fig. 2 spielt die Richtung der Einzelkräfte jedoch keine Rolle. Fig. 2 zeigt zwei Lagerpads, die für die Führung in einer Achse einander gegenüber angeordnet sind. Die Sensoren in beiden Pads in Verbindung mit der elektronischen Regelschaltung sorgen dafür, daß die Luftspalte stets gleich groß bleiben. Die Sensoren arbeiten nur in einem kleinen Bereich um die Mittelposition. Sie können in einer Differenzschaltung betrieben werden, so daß sich Gleichtaktfehler weitgehend aufheben.

Um kompakte Baueinheiten zu erhalten, ist es vorteilhaft, die Sensoren in die Lagerpads zu integrieren. Besonders einfach ist das, wenn das Lagerpad selbst als Abstandssensor benutzt wird.

Die Induktivität einer Anordnung nach Fig. 1 ist abhängig von der Breite des Luftspaltes 5. Geht man davon aus, daß der magnetische Widerstand des Eisenkreises klein gegen den magnetischen Widerstand des Luftspaltes ist, so ergibt sich für die Induktivität L des Elektromagneten folgende Näherung:

$$L = w^2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{a}{l}$$

Dabei sind w die Windungszahl,  $\mu_0$  die Permeabilitätskonstante, a der Luftspaltquerschnitt und l die gesamte Luftspaltlänge. Da jede geschlossene Feldlinie den Luftspalt zweimal passiert, ist l gleich dem doppelten Abstand zwischen Pad und Führungsbahn.

Die Induktivität ändert sich proportional zu  $1/l$ . Geht man davon aus, daß ein Regelkreis dafür sorgt, daß sich der Luftspalt nur um kleine Beträge  $\Delta l$  gegenüber dem mittleren Abstand  $l_m$  ändert, so kann angenähert werden:

$$\Delta L \approx - \frac{\mu_0 w^2 a}{2 l_m^2} \cdot \Delta l$$

Für  $\Delta l \ll l_m$  besteht Proportionalität zwischen Induktivitätsänderungen und Änderungen der Luftspaltbreite. Der Elektromagnet stellt eine Reihenschaltung dar

aus einem Widerstand  $R_m$ , der die Verluste repräsentiert und der Induktivität  $L$ . Überlagert man der Spulenerregung eine Wechselspannung  $U$  konstanter Amplitude und Reihe geschalteten Widerstand  $R$ , so erhält man neben einer der mittleren Luftspaltbreite  $l_m$  proportionalen Komponente auch eine Komponente proportional zur Luftspaltung  $\Delta l$ :

$$U_R = U_{l_m} + \Delta U_R$$

$$\Delta U_R \approx \frac{RU}{\pi \mu_0 f w^2 a} \cdot \Delta l$$

Die beiden Luftspalte in einer Achse ändern sich stets um gleiche Beträge, aber mit entgegengesetzten Vorzeichen. Subtrahiert man die Spannungen  $U_R$  für beide Luftspalte einer Achse voneinander, so erhält man die Spannung  $2 \cdot \Delta U_R$ , die gleich Null wird, wenn beide Luftspalte gleich groß sind. Diese Spannung wird in einem Regelkreis bekannter Ausführung dazu benutzt, über die Änderung des Spulenstromes die Luftspalte einer Achse auf gleiche Größe einzustellen.

Die Elektronik zur Steuerung der erfindungsgemäßen Vorrichtung kann entsprechend dem in Fig. 3 dargestellten Schema ausgeführt werden.

Die in einer Achse wirkenden Lagerpads 2 sind mit Meßwiderständen 13 in Reihe geschaltet. Die Spannungen an den Meßwiderständen werden verstärkt (8) und voneinander subtrahiert (14), das Ergebnis ist eine Wechselspannung  $2 \cdot \Delta U_R$ , die der Abweichung der Luftspalte von der Mittellage entspricht. Ein Oszillator 7 erzeugt eine Meßwechselspannung  $U$  konstanter Amplitude und Frequenz. Die Spannung  $U$  wird am Eingang des Leistungsverstärkers 11 der vom Positionsregler 10 kommenden Steuerspannung für den Spulenstrom überlagert und gleichzeitig zur Steuerung des Synchrongleichrichters 9 benutzt. Der Synchrongleichrichter erzeugt eine zu  $2 \cdot \Delta U_R$  proportionale Gleichspannung, deren Vorzeichen die Richtungsinformation enthält, aufgrund der phasenrichtigen Bewertung.

Der Positionsregler 10, in bekannter Weise als P- oder PI-Regler ausgelegt und in ebenso bekannter Weise mit einer geschwindigkeitsproportionalen Dämpfung versehen, verändert die Steuerspannung für den Leistungsverstärker 11 solange, bis über die damit verbundenen Änderungen von Spulenstrom und Zugkraft des Magneten die Luftspalte beider Pads gleich groß und die Spannung  $2 \cdot \Delta U_R$  Null geworden ist.

Eine Variante der erfindungsgemäßen Vorrichtung ergibt sich, wenn das Lagerpad zusätzlich zur Erreger- spule eine Hilfswicklung als Meßwicklung erhält. Dann läßt sich die Elektronik vereinfachen. Fig. 4 zeigt das Prinzip. Die Hilfswicklungen 4 der Pads einer Achse werden in Reihe geschaltet und mit gegenphasigen Wechselspannungen konstanter Amplitude und Frequenz gespeist. Sind die Wechselstromwiderstände beider Hilfswicklungen gleich groß, so befindet sich der Mittelpunkt stets auf Nullpotential. Mit Änderung der Luftspaltbreite ändern sich auch die Wechselstromwiderstände der Hilfswicklungen: Die Induktivität der Seite mit verkleinertem Luftspalt nimmt zu, während gleichzeitig die Induktivität der anderen Seite abnimmt. Die Mittenspannung zwischen den Hilfswicklungen verschiebt sich vom Wert Null. Diese durch Spannungsteilung aus der Meßwechselspannung entstandene Spannung ist für kleine Änderungen proportional zur Abwei-

chung der Luftspaltbreite vom Sollwert. Nach Verstärkung (8) und Synchrongleichrichtung (9) wird sie als Führungsgröße für den Positionsregelkreis benutzt, in gleicher Weise wie oben bereits beschrieben.

Eine weitere Variante der erfindungsgemäßen Vorrichtung ergibt sich, wenn zur Messung der Luftspaltbreite nicht die Induktivität des Elektromagneten, sondern die Kapazität zwischen den durch den Luftspalt getrennten Weicheisenteilen des magnetischen Kreises benutzt wird. Dazu wird z. B. die Führungsbahn mit Masse verbunden und an den von Masse isolierten Weicheisenteil des Lagerpads eine Wechselspannung konstanter Amplitude und Frequenz angeschlossen. Die Kapazität zwischen bewegtem Pad und fester Führungsbahn ändert sich mit der Luftspaltbreite. Ein elektronisches Verfahren analog zum oben für die variable Induktivität beschriebenen kann zur Gewinnung eines Positionssignales verwendet werden. Um den isolierten Aufbau des Lagerpads zu vermeiden, kann auch eine isoliert aufgebrachte dünne Hilfselektrode verwendet werden, z. B. in Form einer dünnen, selbstklebenden Isolierfolie, die auf der dem Luftspalt zugekehrten Seite metallisch beschichtet ist.

Beim Luftlager stellt sich der Abstand zwischen Führungsbahn und bewegtem Pad als Gleichgewichtszustand zwischen Luftdruck, Paddurchmesser und mechanischer Last ein. Eine Rückkopplung zur Ausregelung von Schwankungen wie beim Magnetlager besteht nicht. Deshalb besitzt ein Luftlager eine endliche Steifigkeit und dynamische Störungen können nur in sehr begrenztem Maße korrigiert werden.

In Gegensatz dazu kann mit einem Magnetlager aufgrund der aktiven elektronischen Regelung auch eine Korrektur dynamischer Störungen ausgeführt werden, wie z. B. Vibrationen oder Schwingungen beim Anfahren. Da der Positionsregelkreis eine hohe Bandbreite besitzt, kann er alle die dynamischen Störungen ausregeln, die sich als Luftspaltänderungen auswirken.

Aber auch externe dynamische Störungen, wie z. B. Gebäudeschwingungen lassen sich kompensieren. Dazu ist ein geeigneter Sensor erforderlich, dessen Signal dem Regelkreis nach Fig. 3 zusätzlich zugeführt wird. An einem Beispiel soll die Funktion erläutert werden.

Üblicherweise werden Gebäudeschwingungen vom feststehenden auf den bewegten Teil der Führung übertragen, aufgrund der im Arbeitsbereich gegen unendlich gehenden Steifigkeit des Magnetlagers. Begrenzt man die Bandbreite des Regelkreises und bringt gleichzeitig am bewegten Teil der Führung einen Beschleunigungssensor an, dessen Signal im Regelkreis ebenfalls als Führungsgröße verwendet wird, so läßt sich das Verhalten des Lagers frequenzabhängig in zwei Bereiche aufteilen. Im Bereich der Frequenzen von Null bis zu einem systemabhängig definierten unteren Grenzwert werden die Luftspaltbreiten konstant gehalten. Oberhalb des Grenzwertes übernimmt der Beschleunigungssensor die Führung des Regelkreises und es werden detektierte Beschleunigungskräfte durch Gegenkräfte in den Lagern auf Null geregelt. Das Lager kann also bei höherfrequenten Störungen Bewegungen um die Ruhelage ausführen und damit dynamische Beschleunigungskräfte kompensieren, während es seine Lage im langzeitigen Mittel beibehält.

#### Patentansprüche

1. Vorrichtung zur berührungslosen Führung gegeneinander bewegter Teile, basierend auf der

Zugkraft von Elektromagneten, deren Luftspalte die bewegten Teile voneinander trennen und deren Luftspaltbreite gegen die Einwirkungen äußerer Kräfte durch Stromänderungen in den Erregerspulen auf einem konstanten Wert gehalten wird, gekennzeichnet dadurch, daß die mit der Luftspaltbreite veränderliche Induktivität des Elektromagneten zur Messung der Luftspaltbreite verwendet wird.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, gekennzeichnet dadurch, daß dem zur Konstanthaltung der Luftspaltbreite erforderlichen Spulenstrom ein Testsignal überlagert wird, z. B. eine Wechselspannung konstanter Amplitude und Frequenz, das an einem in Reihe mit der Erregerspule liegenden Meßwiderstand eine Signalkomponente proportional zur Induktivität der Erregerspule erzeugt.

3. Vorrichtung nach Anspruch 1, gekennzeichnet dadurch, daß der Elektromagnet zur Messung des luftspaltabhängigen Wechselstromwiderstandes mit einer zusätzlich zur Erregerwicklung angebrachten Hilfswicklung ausgestattet ist, die mit einer Wechselspannung konstanter Frequenz und Amplitude gespeist wird.

4. Vorrichtung zur berührungslosen Führung gegeneinander bewegter Teile, basierend auf der Zugkraft von Elektromagneten, deren Luftspalte die bewegten Teile voneinander trennen und deren Luftspaltbreite gegen die Einwirkungen äußerer Kräfte durch Stromänderungen in den Erregerspulen auf einem konstanten Wert gehalten wird, gekennzeichnet dadurch, daß die mit der Luftspaltbreite veränderliche Kapazität zwischen einer mit dem Elektromagneten verbundenen Hilfselektrode und einer auf der gegenüberliegenden Luftspaltseite angebrachten Gegenelektrode, die auch durch das feststehende metallische Bett der Führung gebildet werden kann, zur Messung der Luftspaltbreite verwendet wird.

5. Vorrichtung nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 4, gekennzeichnet dadurch, daß die Meßsignale der zur Führung einer Achse benutzten Elektromagneten entgegengesetzter Krafrichtung in einer Differenzschaltung bekannter Ausführung voneinander subtrahiert werden, somit ein Wert Null entsteht, wenn die Luftspalte der auf eine Achse einwirkenden Elektromagnete gleich groß sind.

6. Vorrichtung nach einem oder mehreren der Ansprüche 1 bis 5, gekennzeichnet dadurch, daß das nach Anspruch 5 gewonnene Differenzsignal als Führungsgröße eines Regelkreises für eine konstante und gleich große Luftspaltbreite in den auf eine Bewegungsachse einwirkenden Elektromagneten verwendet wird.

7. Vorrichtung

— zur berührungslosen Führung gegeneinander bewegter Teile, basierend auf der Zugkraft von Elektromagneten, deren Luftspalte die bewegten Teile voneinander trennen und deren Luftspaltbreite gegen die Einwirkungen äußerer Kräfte durch Stromänderungen in den Erregerspulen auf einem konstanten Wert gehalten wird

— und zur gleichzeitigen Kompensation dynamischer Störungen, wie z. B. Gebäudeschwingungen,

gekennzeichnet dadurch, daß den Elektromagneten einer Bewegungsachse ein Beschleunigungssensor

bekannter Ausführung zugeordnet ist und das Meßsignal des Beschleunigungssensors so auf das Eingangssignal des Leistungsverstärkers für den Erregerstrom der Elektromagneten einwirkt, daß die Elektromagneten den vom Beschleunigungssensor detektierten Kräften entgegengesetzt gleich große Kräfte erzeugen.

8. Vorrichtung nach Anspruch 7, gekennzeichnet dadurch, daß zur Stabilisierung der überlagerten Regelkreise für Position und Beschleunigung die zugehörigen Führungsgrößen in ihren Frequenzbereichen durch Filter getrennt werden, und dem Positionsregelkreis der Frequenzbereich von Null Hertz bis zu einer systemabhängig festgelegten Maximalfrequenz zugeordnet wird und dem Beschleunigungsregelkreis der darüberliegende Bereich hin zu hohen Frequenzen.

---

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

---

- Leerseite -

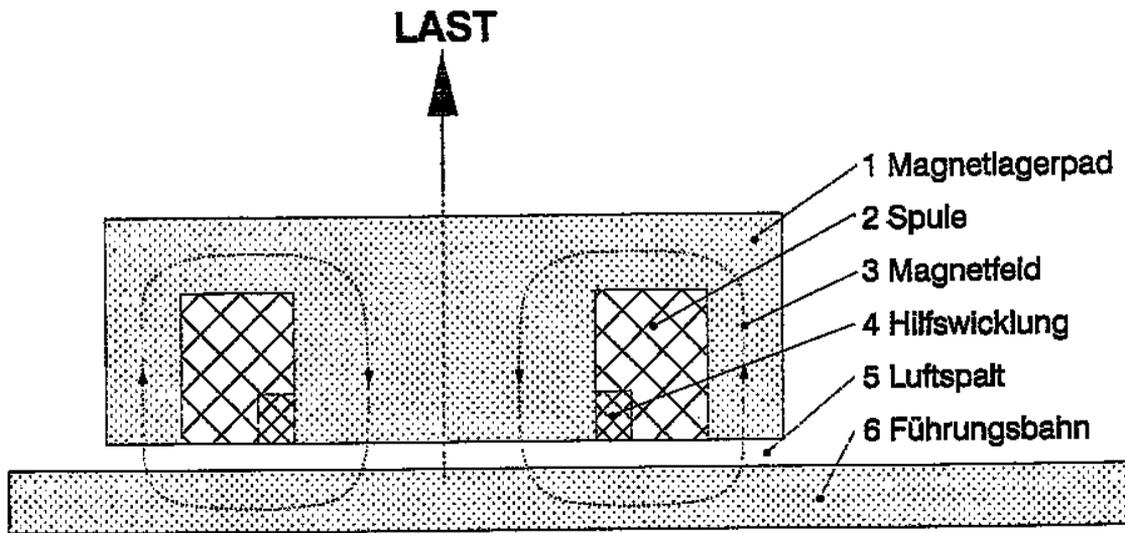


Fig. 1: Ausführung der erfindungsgemäßen Vorrichtung

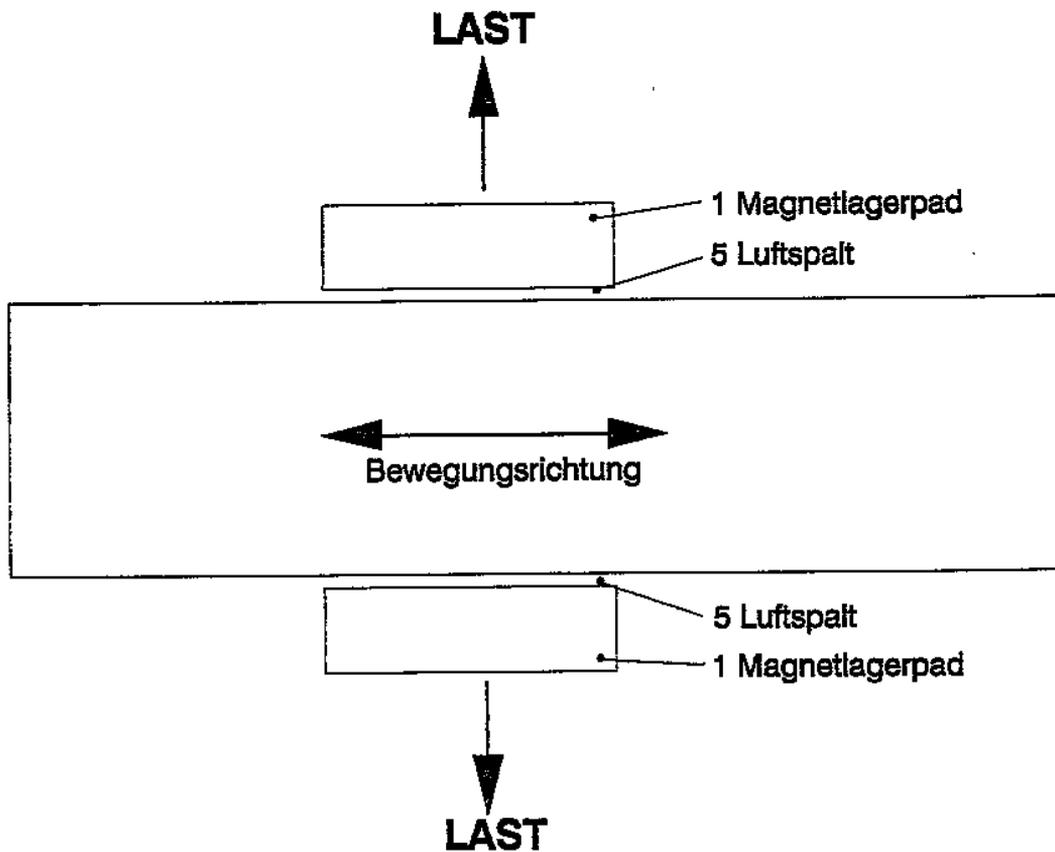


Fig. 2: Anordnung der Magnetlagerpads zur Führung einer geradlinigen Bewegung

Fig. 3: Schema der Steuerelektronik mit Meßwiderständen

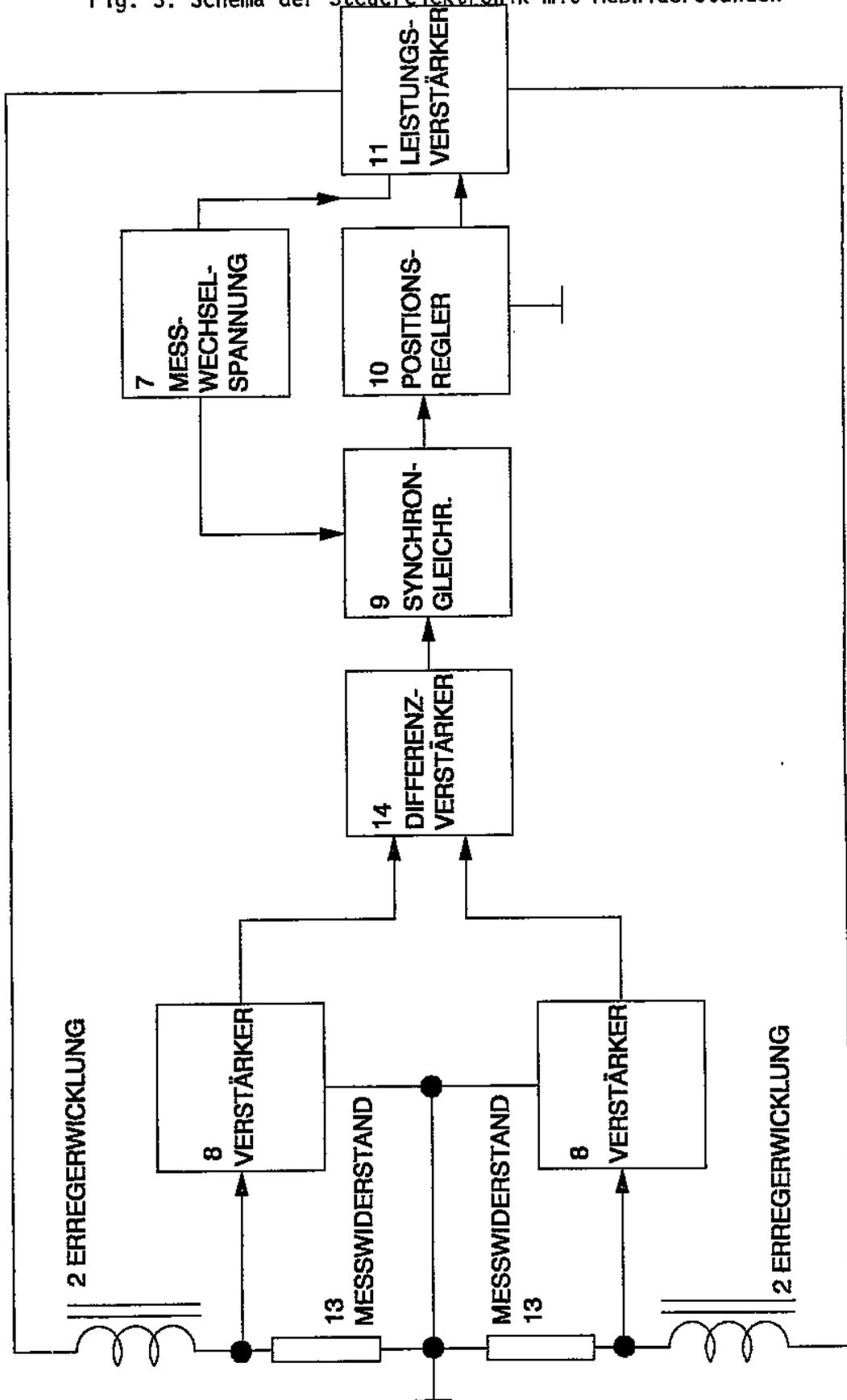


Fig. 4: Schema der Steuerelektronik mit Hilfswicklung

