



19



**SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT**  
EIDGENÖSSISCHES INSTITUT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

① **CH 694 814 A5**

⑤ Int. Cl. 7: **F 16 C 032/04**  
**F 16 C 039/06**

**Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein**  
Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

⑫ **PATENTSCHRIFT A5**

⑲ Gesuchsnummer: 01819/99

⑳ Anmeldungsdatum: 05.10.1999

㉔ Patent erteilt: 29.07.2005

④⑤ Patentschrift veröffentlicht: 29.07.2005

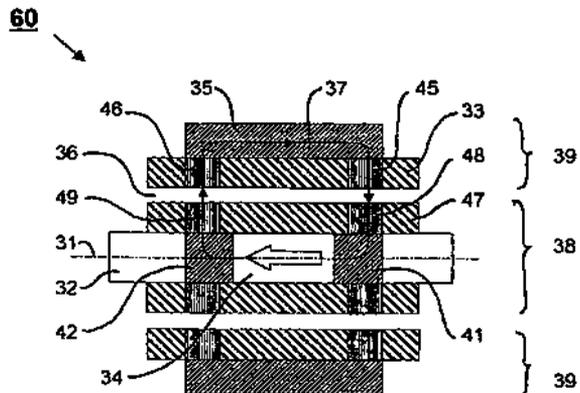
⑦③ Inhaber:  
SILPHENIX GmbH, Bennwilerstrasse 7  
4436 Oberdorf BL (CH)

⑦② Erfinder:  
Hans Konrad Asper, Plattenstrasse 98  
8706 Meilen (CH)  
Jan Sandtner, Sonnenweg 10  
4436 Oberdorf BL (CH)

⑤④ **Homopolares, passives, elektrodynamisches Magnetlager mit erhöhter Steifigkeit.**

⑤⑦ Homopolares, passives, elektrodynamisches Magnetlager (60) bestehend aus einem rotierenden (39) und einem stationären Teil (38) mit mindestens einem rotationssymmetrischen Permanentmagneten (34) sowie mindestens einem elektrisch gut leitenden coaxial angeordneten Hohlzylinder (33, 47) mit eingelagerten elektrisch und magnetisch gut leitenden Ringen (46, 45, 49, 48), wobei mindestens ein Hohlzylinder (33, 47) Teil mindestens eines der beiden Magnetlagerteile (39 und 38) ist. Der durch den Permanentmagneten (34) zwischen den beiden Magnetlagerteilen (38, 39) entstehende Magnetfluss (37) schliesst sich über die magnetisch leitenden Teile (42, 49), den Luftspalt (36), die magnetisch leitenden Teile (46, 35, 45), den Luftspalt (36) sowie die magnetisch leitenden Teile (48, 41) und bewirkt im Stillstand zwischen den Magnetlagerteilen (38, 39) anziehende Kräfte, welche mit zunehmender Drehzahl des rotierenden Teils (39) in abstossende Rückstellkräfte umgewandelt werden. Bei einer axialen Verschiebung des rotierenden Teils (39) entsteht eine axiale Stabilisierung infolge Verformung des magnetischen Hauptflusses (37). Die elektrisch und magnetisch gut leitenden Ringe (46, 45, 49, 48) bewirken eine Verstärkung

des Magnetflusses (37), was eine erhöhte Steifigkeit erbringt. Der Rotor (39) erfährt in der zentrierten Lage ein konstantes Magnetfeld, so dass während der Rotation weder Hysterisis- noch Wirbelstromverluste entstehen.



## Beschreibung

### Fachgebiet

Bei der vorliegenden Erfindung geht es um ein Magnetlager gemäss Anspruch 1:

Magnetlager haben grundsätzlich die Aufgabe, einen Rotationskörper berührungslos durch magnetische Kräfte zu halten. Die Berührungslosigkeit hat gegenüber konventioneller mechanischer Lager (Kugel-, Wälz- und Gleitlager) viele Vorteile, so dass einige höchsttourige Anwendungen erst mit Magnetlager möglich wurden. Zu diesem Bereich gehören u.a. Turbomolekularpumpen und Ultrazentrifugen. Magnetlager zeichnen sich dadurch aus, dass sie vollständig verschleiss- und wartungsfrei sind. Dies bedeutet eine beinahe unendliche Lebensdauer. Magnetlager weisen keine Reibungswärme auf, sie arbeiten geräusch- und vibrationsfrei und gewähren somit eine nahezu verlustfreie Lagerung selbst bei sehr hohen Rotationsgeschwindigkeiten. Da für Magnetlager auch keine Schmierung benötigt wird, werden Anwendungen mit kontaminationsgefährdeten Medien möglich, wie Lebensmittel- und Blutpumpen, oder Betrieb im Ultrahochvakuum bzw. Raumfahrt.

### Stand der Technik

Bei der magnetischen Lagerung unterscheidet man zwischen aktiven und passiven Magnetlagern. Aktive Magnetlager weisen eine hohe Tragfähigkeit, hohe Rückstellkräfte (mit Steifigkeiten von  $10^5$  bis  $10^6$  N/m), jedoch sehr kleine Luftspalte (ca. 0,2 mm) auf. Weiter benötigen sie Lagesensoren und eine Regelelektronik. Allgemein sind aktive Magnetlager heute noch entsprechend teuer.

Passive Magnetlager sind demgegenüber für geringere Rotormassen (ca. 5–10 kg) geeignet. Ihre Rückstellkräfte sind im Vergleich zu den aktiven Magnetlagern um ca. eine Grössenordnung geringer (mit Steifigkeiten von  $10^4$  bis  $10^5$  N/m) mit Luftspalten in der Grössenordnung von 2–5 mm. Die grösseren Luftspalten der passiven Magnetlager ermöglichen auch die Rotorlagerung in korrosiven und ätzenden Medien oder bei Anwendungen mit hohen Temperaturen (eine nichtmagnetische Trennwand im Luftspalt ist deswegen möglich). Passive Magnetlager sind infolge des geringeren Materialaufwandes sowie der fehlenden Regelelektronik meist zuverlässiger und auch kostengünstiger.

Industrielle Anwendungen von Magnetlagern finden sich in Turbomolekularpumpen, in Gasexpander und Kompressoren, in Textilmaschinenwindeln, Ultrazentrifugen und Schwungradspeichern, sowie in der Lebensmittelindustrie und in der Medizinaltechnik.

Neben der klassisch mechanischen Rotorlagerung in geschmierten Kugellagern werden heute auch Kombinationen von Permanentmagnetlagern und Kugellagern verwendet. Zur vollkommen berührungslosen Lagerung kommen aktiv gesteuerte Magnetlager verschiedenster Ausführungen zur Anwendung.

Es ist nun bereits eine Vorrichtung bekannt (WO 9 832 973 A1), die als Magnetlager für eine schnell-drehende Turbomolekularpumpe dient.

Dieses in der Zeichnung Fig. 1 (Prior Art) darge-

stellte Magnetlager 10 besteht aus einem stationären Teil 12 (Stator) in Verbindung mit einem rotations-symmetrischen Permanentmagnet 14 und einem rotierenden Teil 13 (Rotor), welcher um eine Rotationsachse 11 rotieren kann. Der Rotor 13 besteht aus einem elektrisch gut leitenden nicht magnetischen Material, z.B. aus Kupfer oder Aluminium. Der Rotor 13 ist vom im Stator 12 befestigten Permanentmagnetring 14 durch einen Luftspalt 15 getrennt. Der Permanentmagnet erzeugt im Luftspalt 15 ein in radialer Richtung inhomogenes Magnetfeld mit einem relativ starken Gradient. Dies ist so zu verstehen, dass die Intensität des Magnetfeldes in Richtung zur Rotationsachse 11 abnimmt. Die Richtung der magnetischen Polarisierung des Permanentmagnetringes ist für die Funktion dieses Magnetlagers belanglos, d.h., dass sowohl die radiale zur Rotationsachse 11 gerichtete Polarisierung 14a oder weg von der Rotationsachse 11 gerichtete Polarisierung 14c, als auch die axiale nach rechts gerichtete Polarisierung 14b oder nach links gerichtete Polarisierung 14d zur richtigen Funktion des Magnetlagers führen würde.

Eine andere Version des vorbekannten Magnetlagers für die oben erwähnte Turbomolekularpumpe ist im Fig. 2 (Prior Art) dargestellt. Das Magnetlager 20 diesmal besteht aus einem zweiteiligen Stator 22 und 23, wobei jeder von den Teilen je einen Permanentmagnetring beinhaltet und zwar der innere Stator 22 den inneren Permanentmagnetring 25 und der äussere Stator 23 den äusseren Permanentmagnetring 26. Die magnetische Polarisierung der Permanentmagnetringe ist so gerichtet, dass die Magnete einen abstossenden Modus aufweisen. Im freien Raum zwischen den beiden Permanentmagnetringen 25 und 26 befindet sich ein elektrisch gut leitender nichtmagnetischer Hohlzylinder 24 als Rotor. Infolgedessen entstehen in diesem Fall zwischen dem Rotor 24 und den Permanentmagnetringen 25 und 26 zwei Luftspalten, ein innerer Luftspalt 28 und ein äusserer Luftspalt 27. Im Bereich zwischen den beiden Permanentmagnetringen 25 und 26, d.h. im äusseren Luftspalt 27, im Rotor 24 und im inneren Luftspalt 28 wird ein in radialer Richtung inhomogenes Magnetfeld erzeugt, das einen noch stärkeren Gradient als im ersten Magnetlagerbeispiel 10 aufweist.

Es gibt insgesamt vier Möglichkeiten, wie die Magnetringe polarisiert werden können:

- a) beide Magnetringe axial nach rechts gerichtet, 26a, 25a;
- b) der äussere Magnetring radial zur Rotationsachse 21 und der innere Ring radial weg von der Achse 21 gerichtet, 26b, 25b;
- c) oder umgekehrt, der äussere Magnetring radial weg von der Rotationsachse 21 und der innere Ring radial zur Achse 21 gerichtet, 26c, 25c;
- d) und letztens beide Magnetringe axial nach links gerichtet, 26d, 25d.

Alle vier Polarisierungsmöglichkeiten führen zum oben erwähnten abstossenden Modus, welcher zur Funktion dieses Magnetlagers 20 notwendig ist.

Es sei noch an dieser Stelle vermerkt, dass die beiden vorbekannten Magnetlager 10 und 20 ausschliesslich stationäre Permanentmagnete aufweisen. Bei diesen beiden Magnetlagern 10 und 20 gibt es

zwar keine destabilisierenden Kräfte im Stillstand, jedoch solche Magnetlager weisen keine axiale Stabilität auf. Nur durch zusätzliche Massnahmen kann die axiale Stabilität erreicht werden.

Weitere zum Stand der Technik gehörende Literatur sind:

Patent-Liste:

Conrad, Armin; Lembke, Torbjörn:  
«Reibungspumpe»  
EP 0 675 289 A1  
Priorität: 26.03.94

Conrad, Armin; Lembke, Torbjörn:  
«Friction pump with magnetic bearings disposed in the impeller»  
US 5 547 338  
Filed: Mar. 24, 1995

Lembke, Torbjörn:  
«Magnetically suspended high velocity vacuum pump»  
WO 9 832 973 A1  
Filed: Jan. 23, 1998

Pinkerton, Joseph F.:  
«Magnetic bearing and method utilizing movable closed conductive loops»  
US 5 302 874  
Filed: Dec. 23, 1992

Post, Richard F.:  
«Dynamically stable magnetic suspension/bearing System»  
US 5 495 221  
Filed: Mar. 9, 1994

Post, Richard F.:  
«Passive magnetic bearing element with minimal power losses»  
US 5 847 480  
Filed: Nov. 3, 1995

Wissenschaftliche Literatur:

Weitere zum Stand der Technik gehörende Literaturen sind:

Reitz, John R.:  
«Forces on Moving Magnets due to Eddy Currents»  
J. Appl. Phys., 41, 5 (April 1970) 2067-71

Reitz, John R.; Davis, L. C.:  
«Force on a Rectangular Coil Moving above a Conducting Slab»  
J. Appl. Phys., 43,4 (April 1972) 1547-53

Simone, Michelle; Tichy, John:  
«Force Due to a Magnetic Dipole Near a Sliding Conductor: Application to Magnetic Levitation and Bearings»  
Trans. ASME, 116 (Oct. 1994) 720-5

Saslow, W. M.:

«Maxwell's Theory of Eddy Currents in Thin Conducting Sheets, and Applications to Electromagnetic Shielding and MAGLEV»  
Am. J. Phys., 60, 8 (Aug. 1992) 693-711

5 Post, R. F. et al.:  
«Research on Ambient-Temperature Passive Magnetic Bearings at the Lawrence Livermore National Laboratory»  
10 LLNL Preprint UCRL-JC-126208 (April 1997)  
Prepared for submittal to 6th Int. Symp. on Magnetic Bearings,  
Cambridge, Mass., Aug. 5-7, 1998

15 Post, R.F.; Ryutov, D. D.:  
«Ambient-Temperature Passive Magnetic Bearings: Theory and Design Equations»  
LLNL Preprint UCRL-JC-129214 (Dec. 30, 1997)  
Prepared for submittal to 6th Int. Symp. on Magnetic Bearings,  
20 Cambridge, Mass., Aug. 5-7, 1998

Stell, Richard L.:  
«The Analysis of Eddy Currents»  
25 Clarendon Press, Oxford (1974)

Detaillierte Darstellung der Erfindung

30 Es ist das Ziel der vorliegenden Erfindung, eine Lagerungsvorrichtung zustande zu bringen, die in allen Richtungen völlig stabil ist und keinerlei Stützlager während des Betriebs erfordert. Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, wie in Fig. 3 dargestellt ist, einen möglichst gut geschlossenen Magnetkreis zu bilden und bei Abweichungen des Rotors 39 von der zentrierten Lage eine grössere Änderung des magnetischen Hauptflusses im Luftspalt 36 zu erhalten. Die Aufgaben werden durch die Merkmale von Anspruch 1 gelöst.

40 Das passive, elektrodynamische Magnetlager ist ein selbstregelndes Lager und beruht auf dem Prinzip der durch Änderung des Magnetflusses entstandenen Wirbelstrominduktion innerhalb elektrisch gut leitender Strukturen oder in kurzgeschlossenen Spulen. Die Wirbelströme erzeugen wiederum eigene Magnetfelder und dadurch auch solche Rückstellkräfte, die die radiale Stabilisierung des Rotors bewirken.

45 Der Ausdruck «homopolares Magnetlager» bedeutet eine Lagerkonstruktion, bei der das Magnetfeld im System so angeordnet ist, dass der rotierende Teil während der zentrierten Rotation ein konstantes Magnetfeld verspürt. Infolgedessen entstehen in der zentrierten Lage keine Hysterisis- oder Wirbelstromverluste. Deswegen sind solche homopolare Magnetlager beinahe verlustfrei.

50 Die vorliegende Erfindung baut auf demselben Prinzip auf wie die schwebenden japanischen MAGLEV Züge (MAGnetic LEVitation), welche sich, um die Kontaktlosigkeit zu erreichen abstossende Kräfte zwischen dem Zug und der Unterlage zunutze machen.

55 Wenn ein Magnet über eine elektrisch leitende Fläche geführt wird, dann werden Wirbelströme auf solche Weise in der Fläche induziert, dass das durch diese Wirbelströme erzeugte Magnetfeld zu absto-

senden Kräften zwischen dem Magneten und der Fläche führt. Wenn sich nun der Magnet der Fläche nähert, nimmt die Grösse der induzierten Ströme zu und damit auch die abstossende Kraft. Man kann dies so verstehen, dass die in der Metallfläche fließenden Wirbelströme als fiktive Magnete mit variabler Magnetisierung aufgefasst werden können.

Ein homopolares, passives, elektrodynamisches Magnetlager nach Erfindung beinhaltet mindestens einen oder mehrere Permanentmagnete, und diese Permanentmagnete sind so angeordnet, dass sie Wirbelströme in einem rotierenden elektrisch gut leitenden Teil induzieren und diese ein Magnetfeld erzeugen, welches eine in radialer Richtung stabilisierende Kraft auf den Rotor ausübt.

Neben dieser zentrierenden Wirkung können rotierende Permanentmagnete – im Falle, dass der Rotor unerwünschte und stark destabilisierende Taumelbewegungen ausübt – in einem diesmal stationären elektrisch gut leitenden Teil Wirbelströme induzieren, welche wiederum entsprechende Rückstellkräfte erzeugen und dadurch diese Instabilität unterdrücken und gleichzeitig wirkungsvoll dämpfen.

Da die induzierten Ströme und damit die veränderlichen Magnetfelder nur bei dem rotierenden Hohlzylinder entstehen, ist das Lager bei Stillstand der Anordnung wirkungslos. Für diesen Fall sind Anlauflager vorhanden, welche die Rotoranordnung im Stillstand und bei Beginn der Rotation unterstützen, oder als Fanglager, wenn der Rotor wieder zum Stillstand kommt. Diese Lager dienen gleichzeitig als Notlager für die Gesamtanordnung im Betrieb. In der Beschreibung oder in den Abbildungen wird die Auslegung der Notlager nicht näher betrachtet.

#### Aufzählung der Zeichnungen

Im Folgenden werden anhand der beiliegenden Zeichnungen einige Ausführungsbeispiele der Erfindung näher beschrieben. Es zeigen

Fig. 1: (Prior Art) Ein Magnetlager für eine Turbomolekularpumpe mit einem elektrisch gut leitenden Zylinder als Rotor und einem ringförmigen Permanentmagneten als Stator,

Fig. 2: (Prior Art) Eine andere Ausführung dieses Magnetlagers mit einem elektrisch gut leitenden Rohr als Rotor und zwei ringförmigen Permanentmagneten im abstossenden Modus als Stator,

Fig. 3: Magnetlager nach Erfindung mit einem elektrisch gut leitenden Hohlzylinder und mit einem den Verlauf des Magnetflusses beeinflussenden Teil als Rotor und einem rotationssymmetrischen Permanentmagneten als Stator,

Fig. 4: Eine andere Ausführung des Magnetlagers nach Erfindung mit zwei elektrisch gut leitenden coaxialen Hohlzylindern, wobei der innere Hohlzylinder Teil des Stators während der äussere Teil des Rotors ist,

Fig. 5: Eine weitere Anordnung des Magnetlagers nach Erfindung mit zwei rotationssymmetrischen Permanentmagneten, wobei der innere Permanentmagnet Teil des Stators, während der äussere Permanentmagnet Teil des Rotors ist, und weiter mit einem elektrisch gut leitenden Hohlzylinder, der im Bereich

des magnetischen Hauptflusses aus einem elektrisch gut leitenden Material besteht, welches gleichzeitig eine magnetische Permeabilität von grösser als 1 aufweist,

Fig. 6: Eine weitere Anordnung des Magnetlagers nach Erfindung mit einem rotationssymmetrischen Permanentmagneten als Stator und mit zwei elektrisch gut leitenden coaxialen Hohlzylindern, die im Bereich des magnetischen Hauptflusses aus einem elektrisch gut leitenden Material bestehen, welches gleichzeitig eine magnetische Permeabilität von grösser als 1 aufweist,

Fig. 7: Eine noch weitere Ausführung des Magnetlagers nach Erfindung mit zwei rotationssymmetrischen Permanentmagneten, wobei der elektrisch gut leitende Hohlzylinder aus mehreren coaxial angeordneten elektrisch leitenden Hohlzylindern so zusammengesetzt ist, dass alle Hohlzylinder sowohl im mechanischen als auch im elektrischen Kontakt sind,

Fig. 8a: Eine schematische Zeichnung der Wirbelstrompfade im Rotor in einer Schnittdarstellung,

Fig. 8b: Eine schematische Zeichnung der Wirbelstrompfade im Rotor in einer Draufsichtdarstellung,

Fig. 9: Eine zusätzliche Variante für alle vorgehenden Ausführungen des Magnetlagers nach Erfindung, wo sich im Luftspalt zwischen dem rotierenden und stationären Teil im Bereich des stärksten magnetischen Hauptflusses eine magnetische Flüssigkeit befindet.

#### Ausführung der Erfindung

Die Erfindung soll anhand der Abbildungen Fig. 3 bis 9 näher erläutert werden. Das homopolare, passive, elektrodynamische Magnetlager 30 nach Erfindung besteht aus einem stationären Teil 38 (Stator), d.h. aus einer Stütze 32 in Verbindung mit einem rotationssymmetrischen Permanentmagnet 34 und einem rotierenden Teil 39 (Rotor) in Form eines Hohlzylinders 33, welcher um eine Rotationsachse 31 rotieren kann. Der Rotor 39 besteht aus einem elektrisch gut leitenden nicht magnetischen Hohlzylinder 33, welcher z.B. aus Kupfer oder Aluminium hergestellt ist, und aus einem den Verlauf des Magnetflusses beeinflussenden Teil 35 (obere Hälfte der Abbildung Fig. 3), welcher entweder aus einem weichmagnetischen Material 35a, z.B. Eisen, besteht. Der Rotor 39, bzw. der Hohlzylinder 33, ist vom im Stator 38 befestigten Permanentmagnetring 34 durch einen mechanischen Luftspalt 36 getrennt.

Der Permanentmagnet 34 erzeugt im Luftspalt 36 in radialer Richtung ein Magnetfeld, das sich durch den rotierenden Hohlzylinder 33 und das weichmagnetische Material 35a schliesst und dessen eine magnetische Kraftlinie 37 in der Abbildung Fig. 3 dargestellt ist. Es ist deutlich sichtbar, dass der Magnetfluss des linken magnetischen Luftspaltes von der linken Stirnseite des stationären Permanentmagneten 34 über den mechanischen Luftspalt 36 und den rotierenden Hohlzylinder 33 zur linken Stirnseite des den Verlauf des Magnetflusses beeinflussenden Teiles 35 (bzw. 35a oder 35b) verläuft. Auf der rechten Seite ist der Verlauf des Magnetflusses ähnelnd, nur dass der Magnetfluss dort in entgegengesetzter Richtung verläuft.

Das im Fig. 3 wiedergegebene Magnetlager 30 nach Erfindung (und ähnlich die weiteren unten erwähnten Lager) ist als eine Version mit einem inneren Stator und einem äusseren Rotor in der Abbildungen dargestellt. Es ist selbstverständlich, dass die Wirkungsweise des Lagers grundsätzlich erhalten bleibt, auch wenn die Lage des Rotors mit der Lage des Stators ausgetauscht wird.

Als ein anderes Ausführungsbeispiel des Magnetlagers nach Erfindung soll anhand derselben Abbildung Fig. 3 erwähnt werden. In diesem Fall kann der Teil 35 (die untere Hälfte der Abbildung Fig. 3), welcher den Verlauf des Magnetflusses beeinflusst, aus einem hartmagnetischen Material, d. h. aus einem weiteren Permanentmagneten 35b bestehen, wobei die magnetische Polarisierung von den beiden im Magnetkreis eingegliederten Permanentmagneten 34 und 35b additiv ist. Genau so, wie im oben erwähnten Fall das weichmagnetische Material 35, ist nun der Permanentmagnet 35b Bestandteil des Rotors und ist mit dem rotierenden elektrisch gut leitenden Hohlzylinder 33 mechanisch fest verbunden.

Im Gegensatz zu den auf Fig. 1 und 2 (Prior Art) dargestellten Magnetlagern entstehen im Luftspalt 36 des Magnetlagers 30 nach Erfindung (Fig. 3) anziehende Kräfte, die das Magnetlager axial stabilisieren, aber beim Stillstand oder während den niedrigeren Drehzahlen radial instabil machen. Dies könnte auf den ersten Blick als Nachteil beurteilt werden, was jedoch, wie später erklärt wird, zu einer besseren Fuktionsfähigkeit des Magnetlagers führt. Es sollte betont werden, dass das Magnetlager 30 nach Erfindung neben den stationären Magneteilen 34, auch rotierende Magneteile 35b beinhaltet.

Es gibt mehrere Möglichkeiten, wie die Magnetringe polarisiert werden können. Wir begrenzen uns jedoch in der Beschreibung ausschliesslich auf die axiale Polarisierung, die für die vorliegende Anwendung von leistungsfähigeren anisotropen Permanentmagneten aus Herstellungsgründen vorteilhaft ist:

1) Im Falle, dass der den Verlauf des Magnetflusses beeinflussende Teil 35 aus einem weichmagnetischen Material besteht, wird:

- a) der Magnetring 34 axial nach links 34a und der weichmagnetische Ring 35 indifferent 35a polarisiert
- b) der Magnetring 34 axial nach rechts 34b und der weichmagnetische Ring 35 ebenso indifferent 35a polarisiert

2) Im Falle, dass der den Verlauf des Magnetflusses beeinflussende Teil 35 aus einem hartmagnetischen Material, d.h. aus einem weiteren Permanentmagneten besteht, wird:

- a) der Magnetring 34 axial nach links 34a und der Magnetring 35 axial nach rechts 35b polarisiert
- b) der Magnetring 34 axial nach rechts 34b und der Magnetring 35 axial nach links 35c polarisiert.

Alle von diesen vier Polarisierungsmöglichkeiten führen zum oben erwähnten anziehenden Modus, welcher zur Funktion dieses Magnetlagers 30 notwendig ist.

Eine weitere Ausführung des Magnetlagers nach Erfindung ist in Fig. 4 gezeigt. Einfachheitshalber ist nur die obere Hälfte oberhalb der Rotationsachse 31 des Magnetlagers dargestellt. Das Magnetlager 40 besteht wiederum aus einem rotierenden Teil 39,

welcher aus einem nicht magnetischen und elektrisch gut leitenden Hohlzylinder 33 und einem den Verlauf des Magnetflusses beeinflussenden Teil 35 zusammengesetzt ist und aus einem stationären Teil 38, d.h. aus einer Stütze 32 in Verbindung mit einem axial polarisierten rotationssymmetrischen Permanentmagneten 34, welcher diesmal noch mit einem zusätzlichen nichtmagnetischen elektrisch gut leitenden Hohlzylinder 47 mechanisch fest verbunden ist. Die beiden Hohlzylinder, d.h. der rotierende Hohlzylinder 33 und der stationäre Hohlzylinder 47, sind mechanisch durch einen Luftspalt 36 getrennt.

Der Permanentmagnet 34 erzeugt im Luftspalt 36 in radialer Richtung wiederum ein Magnetfeld, das sich durch den stationären Hohlzylinder 47, den rotierenden Hohlzylinder 33 und das weichmagnetische Material 35 schliesst und dessen eine magnetische Kraftlinie 37 in der Abbildung Fig. 4 dargestellt ist. Es ist deutlich sichtbar, dass der Magnetfluss des linken magnetischen Luftspaltes 36 von der linken Stirnseite des stationären Permanentmagneten 34, über den stationären Hohlzylinder 47, den mechanischen Luftspalt 36 und den rotierenden Hohlzylinder 33 zur linken Stirnseite des den Verlauf des Magnetflusses beeinflussenden Teiles 35 verläuft. Auf der rechten Seite ist der Verlauf des Magnetflusses ähnlich, nur der Magnetfluss dort in entgegengesetzter Richtung verläuft. Es ist zu beachten, dass der magnetische Luftspalt in radialer Richtung länger als der mechanische Luftspalt 36 ist.

Der den Verlauf des Magnetflusses beeinflussende Teil 35 kann selbstverständlich im Sinne der in der Abbildung Fig. 3 dargestellten Kombinationen (34a, 35b oder 34b, 35c) durch einen Permanentmagnet ersetzt werden.

In der Abbildung Fig. 5 ist ein weiteres Magnetlager 50 gezeigt. Einfachheitshalber ist wieder nur die obere Hälfte oberhalb der Rotationsachse 31 des Magnetlagers dargestellt. Der stationäre Teil 38 ist aus einem axial polarisierten rotationssymmetrischen Permanentmagneten 34, aus einem linken Polschuh 42 und einem rechten Polschuh 41 zusammengesetzt, wobei die beiden Polschuhe aus einem weichmagnetischen Material, z.B. aus Eisen, bestehen.

Der rotierende Teil 39 ist auch aus einem axial polarisierten rotationssymmetrischen Permanentmagneten 35b, aus einem linken Polschuh 44 und einem rechten Polschuh 43 zusammengesetzt, wobei die beiden Polschuhe ebenso aus einem weichmagnetischen Material, z.B. aus Eisen, bestehen. Der rotierende nichtmagnetische elektrisch gut leitende Hohlzylinder 33 ist mit den beiden rotierenden Polschuhen 44 und 43 mechanisch fest verbunden.

Bei höheren Drehzahlen, d.h. bei höheren Frequenzen haben generell die elektrischen Ströme eine Tendenz, nur unmittelbar unter der Leiteroberfläche zu fliessen (der so genannte Skineffekt). Deswegen, um die Durchdringungstiefe des Magnetfeldes in das Material zu erhöhen, können die Polschuhe 42, 41, 44 und 43 und der den Verlauf des Magnetflusses beeinflussende Teil 35 laminiert, d.h. geblecht werden oder aus so einem Material hergestellt werden, das gleichzeitig eine hohe magnetische Permeabilität, eine hohe magnetische Sättigung und einen hohen elektrischen spezifischen Wider-

stand aufweist, wie es z.B. bei kunststoffgebundenen Pulverkernen der Fall ist.

Das Material des Hohlzylinders 33 ist im Bereich des magnetischen Hauptflusses 46 und 45 durch ein anderes Material ersetzt, welches neben einer guten elektrischen Leitfähigkeit auch eine relative Permeabilität von grösser als 1 aufweist. Das könnte z.B. ein metallischer, insbesondere ein anisotropischer Verbundstoff sein. Die Ringe 46 und 45 sind mit den restlichen Hohlzylindern 33 mechanisch fest verbunden, z.B. durchs Löten oder Schweißen, insbesondere durchs Reibungsschweißen, wobei die beiden Ringe 46 und 45 mit den restlichen Hohlzylindern 33 auch in einem guten elektrischen Kontakt sind, so dass der elektrische Übergangswiderstand zwischen den zusammengesetzten Hohlzylindern 33 und Ringen 46 und 45 möglichst klein wird.

Aus der Abbildung Fig. 5 ist es deutlich sichtbar, dass im diesen Fall der mechanische, den Rotor 39 und Stator 38 trennende Luftspalt 36 mit dem magnetischen Luftspalt geometrisch übereinstimmt. Dadurch wird ein gut geschlossener Magnetkreis ohne nennenswerte Streuung gebildet, und der magnetische Hauptfluss im Luftspalt nimmt eine grössere Intensität auf, und dies beinahe unabhängig von der radialen Dicke des Hohlzylinders 33. Auf der linken Seite verläuft der Luftspalt zwischen der äusseren Umfangsfläche des Polschuhes 42 und der inneren Umfangsfläche des Ringes 46, auf der rechten Seite zwischen der inneren Umfangsfläche des Ringes 45 und der äusseren Umfangsfläche des Polschuhes 41. Der Verlauf einer magnetischen Kraftlinie ist wiederum mit Ziffer 37 markiert.

Die in der Abbildung Fig. 5 gezeigte Verbesserung kann im Sinne der Abbildung Fig. 4 noch weiter geführt werden. Wie im Fig. 6 dargestellt ist, beinhaltet das Magnetlager 60 einen stationären Teil 38, welcher aus einer Stütze 32, aus einem axial polarisierten rotationssymmetrischen Permanentmagneten 34, aus einem linken 42 und einem rechten weichmagnetischen Polschuh 41 und aus einem nichtmagnetischen elektrisch gut leitenden Hohlzylinder 47 besteht. Weiter beinhaltet das Magnetlager 60 einen rotierenden Teil 39, welcher aus einem nichtmagnetischen elektrisch gut leitenden Hohlzylinder 33 und aus einem den Verlauf des Magnetflusses beeinflussenden Teil 35 besteht, welcher wiederum z. B. aus Eisen hergestellt ist.

Das Material des rotierenden Hohlzylinders 33, so wie des stationären Hohlzylinders 47, ist im Bereich des magnetischen Hauptflusses 46, 45, 49 und 48 durch ein anderes Material ersetzt, welches neben einer guten elektrischen Leitfähigkeit auch eine relative Permeabilität von grösser als 1 aufweist. Die Ringe 46, 45, 49 und 48 sind mit den restlichen Hohlzylinderteilen 33, bzw. 47 mechanisch fest verbunden, z.B. durchs Löten oder Schweißen, insbesondere durchs Reibungsschweißen, wobei die beiden Ringe 46 und 45 mit den restlichen Hohlzylinderteilen 33, so wie die beiden Ringe 49 und 48 mit den restlichen Hohlzylinderteilen 47, auch in einem guten elektrischen Kontakt sind, so dass der elektrische Übergangswiderstand zwischen den zusammengesetzten Hohlzylindern 33 und Ringen 46 und 45, so wie zwischen den zusammengesetzten Hohl-

zylindern 47 und Ringen 49 und 48, möglichst klein wird.

Der Permanentmagnet 34 erzeugt im Luftspalt 36 in radialer Richtung ein Magnetfeld, das sowohl durch den rotierenden Hohlzylinder 33 als auch durch den stationären Hohlzylinder 47 verläuft und zwar durch die Ringe 46 und 45, bzw. 49 und 48, welche aus einem Material, das neben einer guten elektrischen Leitfähigkeit auch eine relative Permeabilität von grösser als 1 aufweist. Weiter schliesst sich das Magnetfeld durch das weichmagnetische Material 35, wobei eine magnetische Kraftlinie 37 in der oberen Hälfte der Abbildung Fig. 6 über der Rotationsachse 31 dargestellt ist.

Es ist deutlich ersichtlich, dass der Magnetfluss des linken magnetischen Luftspaltes von der linken Stirnseite des stationären Permanentmagneten 34, durch den linken Polschuh 42 und Ring 49 über den mechanischen Luftspalt 36 und den rotierenden Ring 46 zum den Verlauf des Magnetflusses beeinflussenden Teil 35 verläuft. Auf der rechten Seite ist der Verlauf des Magnetflusses ähnlich, beginnend vom Verlauf des Magnetflusses beeinflussenden Teil 35, durch den rotierenden Ring 45, über den mechanischen Luftspalt 36, durch den stationären Ring 48 und Polschuh 41 zur rechten Stirnseite des stationären Magneten 34.

Ferner ist es aus der Abbildung Fig. 6 deutlich erkennbar, dass auch im diesen Fall der mechanische, den Rotor und Stator trennende Luftspalt 36 mit dem magnetischen Luftspalt geometrisch übereinstimmt. Dadurch wird ein gut geschlossener Magnetkreis ohne nennenswerte Streuung gebildet und der magnetische Hauptfluss im Luftspalt nimmt eine grössere Intensität auf, und dies beinahe unabhängig von der radialen Dicke der Hohlzylinder 33 und 47. Gleichzeitig wird bei Abweichungen des Rotors 39 von der zentrierten Lage oder bei Taumelbewegungen des Rotors eine grössere Änderung des magnetischen Hauptflusses im Luftspalt 36 erzielt. Daraus folgt, dass stärkere Wirbelströme in den elektrisch gut leitenden Hohlzylindern 33 und 47 induziert werden und infolgedessen auch eine erhöhte Steifigkeit des Magnetlagers 60 erreicht wird.

Eine noch weitere Ausführung des Magnetlagers 70 ist in der Abbildung Fig. 7 gezeigt. In diesem Fall ist der elektrisch gut leitende stationäre Hohlzylinder 47 aus mehreren koaxial angeordneten elektrisch leitenden Hohlzylindern 61, 62, 63 und 64 so zusammengesetzt, dass alle Hohlzylinder 61, 62, 63 und 64 sowohl im mechanischen als auch im elektrischen Kontakt sind. Es ist von besonderer Wichtigkeit, dass der elektrische Übergangswiderstand auf der Kontaktfläche 65 zwischen den zusammengefügteten Hohlzylindern 61, 62, 63 und 64 möglichst klein gehalten wird. Die zusätzlich elektrisch leitenden Hohlzylinder 62, 63 und 64 mit dem den Luftspalt 36 angrenzenden Hohlzylinder 61 können z.B. durch Ausnutzung der Wärmeausdehnung und durch nachfolgende mechanische Pressung fest verbunden werden. Um den Übergangswiderstand noch kleiner zu machen, können die Kontaktflächen 65 zwischen allen zusammengefügteten Hohlzylindern z.B. auch mit Silber beschichtet werden.

Es ist selbstverständlich, dass im Sinne der Abbil-

dungen Fig. 4 und 6 auch der rotierende Hohlzylinder 33 ebenso aus mehreren koaxial angeordneten Hohlzylindern zusammengesetzt werden kann.

Eine schematische Darstellung der Wirbelstrompfade im Rotor 39 ist in den Abbildungen Fig. 8a und 8b gezeigt. Sobald sich der Rotor 39 aus der zentrierten Lage bewegt, ändern sich auch die Ausmasse des Luftspaltes 36 und entstehen somit Flussänderungen 71 und 72 im Magnetkreis 37. Durch diese Flussänderungen werden Wirbelströme 73 und 74 erzeugt. Wie aus der Abbildung Fig. 8b deutlich zu sehen ist, führen die Wirbelstrompfade 73 und 74 durch das Material 46 und 45 hindurch. Dieses Material 46 und 45, wie bereits oben erwähnt, weist neben einer relativen Permeabilität von grösser als 1 auch eine gute elektrische Leitfähigkeit auf. Um die Intensität der Wirbelströme 73 und 74 im Hohlzylinder 33 nicht zu beeinträchtigen, ist die gute elektrische Leitfähigkeit dieses Materials von grösster Wichtigkeit. Jede Verbesserung der elektrischen Leitfähigkeit der Wirbelstrompfade 73 und 74 – insbesondere im Bereich des magnetischen Hauptflusses 46 und 45 – hat eine Erhöhung der Intensität der im Hohlzylinder 33 induzierten Wirbelströme zur Folge. Infolgedessen werden auch stärkere Rückstellkräfte im Magnetlager entstehen. Die relative Permeabilität des Materials 46 und 45 von grösser als 1 hilft wieder den Magnetkreis 37 besser zu schliessen und damit die unerwünschten magnetischen Streuflüsse zu reduzieren, was wiederum eine erhöhte Steifigkeit des Magnetlagers erbringt.

In der letzten Abbildung Fig. 9 ist ein Teil 80 des Magnetlagers 50, 60 oder 70 dargestellt, wo sich im Luftspalt 36 zwischen dem rotierenden 33 und stationären 47 Hohlzylindern im Bereich des stärksten magnetischen Hauptflusses 37, wo auch die magnetisch und elektrisch gut leitenden Ringe 46, 45, 49 und 48 angeordnet sind, eine ferromagnetische Flüssigkeit 52 und 51 befindet. Eine magnetische Flüssigkeit (Ferrofluid) ist eine kolloidale Dispersion feiner magnetischer Teilchen, welche in einem flüssigen Träger schweben. Da sich die relativen Permeabilitäten der magnetischen Flüssigkeiten im Bereich von 1,5 bis 5 bewegen, bedeutet die Anwesenheit solcher magnetischen Flüssigkeiten im Luftspalt eine Reduzierung der Luftspaltreluktanz, was zu einer noch erhöhten Steifigkeit des Magnetlagers führt. Die absolute Berührungslöslichkeit zwischen dem Rotor 39 und Stator 38 des Magnetlagers geht zwar verloren, aber für eine gewisse Art von relativ langsamtourigen Anwendungen, wo eine schwache hydrodynamische Reibung nicht hinderlich wird, könnte diese Variante durchaus annehmbar sein.

Alle die oben aufgezählten Varianten des Magnetlagers 30, 40, 50, 60, 70 und 80 nach Erfindung weisen eine axiale Stabilität nach dem Prinzip der minimalen magnetischen Reluktanz auf, d.h. durch direkt wirkende Rückstellkraft des bei einer axialen Verschiebung veränderten magnetischen Hauptflusses. Infolgedessen gibt es destabilisierende radiale Kräfte im Stillstand, welche jedoch mit zunehmender Drehzahl des rotierenden Teiles 39 abnehmen, bis sie bei noch höherer Drehzahl in abstossende Rückstellkräfte umgewandelt werden. Dadurch wird das Magnetlager in allen restlichen Freiheitsgra-

den, abgesehen von der Rotationsrichtung, stabilisiert.

Interessanterweise, je grösser die radiale Instabilität im Stillstand ist, desto stärker wird auch die gewünschte radiale Dämpfung bei der Nenndrehzahl. Die zur Stabilisierung notwendige Energie wird aus der Rotation bezogen. Aufgrund der homopolaren Auslegung des Magnetlagers erfährt der Rotor 39 in der zentrierten Lage ein konstantes Magnetfeld, so dass während der Rotation weder Hysterisis- noch Wirbelstromverluste entstehen.

#### Patentansprüche

1. Homopolares, passives, elektrodynamisches Magnetlager (30, 40, 50, 60 und 70) bestehend aus einem rotierenden (39), und einem stationären Teil (38) mit mindestens einem rotationssymmetrischen Permanentmagneten (34), sowie mindestens einem elektrisch gut leitenden koaxial angeordneten Hohlzylinder (33 und 47), dadurch gekennzeichnet, dass mindestens ein Hohlzylinder (33 und 47) Teil mindestens eines der beiden Magnetlagerteile (39 und 38) ist, wobei ein zwischen den beiden Magnetlagerteilen (38 und 39) bestehender Magnetfluss (37) durch den mindestens einen Hohlzylinder (33 und 47), über den zwischen den Magnetlagerteilen bestehenden Luftspalt (36) und durch einen den Verlauf des Magnetflusses beeinflussenden Teil (35) schliesst, so dass zwischen den beiden Magnetlagerteilen (38 und 39) im Stillstand anziehende Kräfte wirken, welche mit zunehmender Drehzahl des rotierenden Teiles (39) abnehmen, bis sie bei noch höherer Drehzahl in abstossende Rückstellkräfte umwandelbar sind.

2. Magnetlager (30) nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der den Verlauf des Magnetflusses beeinflussende Teil (35) aus einem weichmagnetischen Material (35a) besteht.

3. Magnetlager (30) nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der den Verlauf des Magnetflusses beeinflussende Teil (35) aus mindestens einem weiteren rotationssymmetrischen Permanentmagneten (35b) besteht, wobei die magnetische Polarisierung von allen im Magnetflusskreis eingegliederten Permanentmagneten additiv ist (34a und 35b, 34b und 35c).

4. Magnetlager (50 und 60) nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens einer der koaxial angeordneten Hohlzylinder (33 und 47) im Bereich des magnetischen Hauptflusses (46 und 45, 49 und 48) neben einer guten elektrischen Leitfähigkeit auch eine relative Permeabilität von grösser als 1 aufweist.

5. Magnetlager (50 und 60) nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass das Hohlzylindermaterial im Bereich des magnetischen Hauptflusses (46 und 45, 49 und 48) aus einem metallischen Verbundstoff, insbesondere aus einem anisotropen Verbundstoff besteht, bei dem die Ausgangsubstanzen gesintert oder verbacken sind.

6. Magnetlager (70) nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass der elektrisch gut leitende Hohlzylinder (47, 33) aus mehreren koaxial angeordneten elektrisch leitenden Hohlzylindern (61, 62, 63 und

64) besteht und so zusammengesetzt ist, dass alle diese koaxial angeordneten Hohlzylinder (61, 62, 63 und 64) sowohl im mechanischen als auch im elektrischen Kontakt sind, so dass der elektrische Übergangswiderstand auf der Kontaktfläche (65) zwischen den zusammengefügt koaxial angeordneten Hohlzylindern (61, 62, 63 und 64) möglichst klein wird.

5

7. Magnetlager (70) nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass der dem Luftspalt (36) angrenzende Hohlzylinder (61) von den koaxial angeordneten Hohlzylindern mit den übrigen koaxial angeordneten Hohlzylindern (62, 63 und 64) durch Ausnutzung der Wärmeausdehnung und durch nachfolgende mechanische Pressung fest verbindbar ist, so dass ein minimaler elektrischer Übergangswiderstand auf der Kontaktfläche (65) zwischen allen zusammengefügt Hohlzylindern (61, 62, 63 und 64) gewährleistet ist.

10

15

8. Magnetlager (50 und 60) nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass der elektrisch gut leitende Hohlzylinder (33 und 47) teilweise aus Kupfer besteht und dass die ringförmigen Rohrteile an den Stellen des stärksten radialen magnetischen Hauptflusses (46 und 45, 49 und 48) aus Eisen bestehen, wobei in der axialen Richtung eine gute mechanische und elektrische Verbindung zwischen den Eisenringen (46 und 45, 49 und 48) und dem Kupferrohr (33 und 47) gewährleistet ist.

20

25

9. Magnetlager (50 und 60) nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Eisenringe (46 und 45, 49 und 48) mit dem Kupferrohr (33 und 47) zusammen gelötet oder geschweisst, insbesondere reibungsgeschweisst sind.

30

10. Magnetlager (80) nach einem der Ansprüche 1 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass der Luftspalt (36) zwischen den beiden Magnetlagerteilen (38 und 39) im Bereich des magnetischen Hauptflusses (46 und 45, 49 und 48) eine ferromagnetische Flüssigkeit (51 und 52) enthält.

35

40

45

50

55

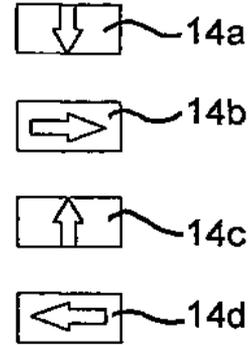
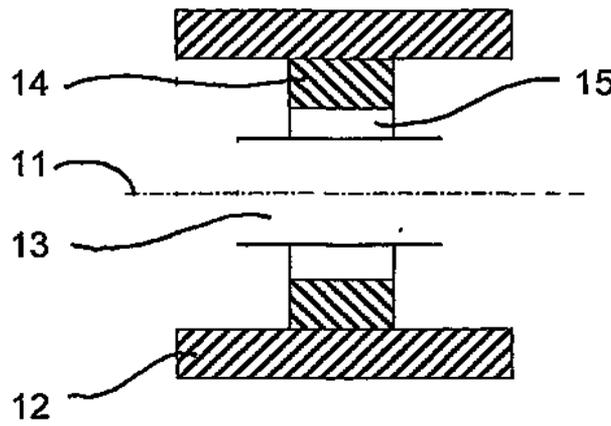
60

65

8

Prior Art

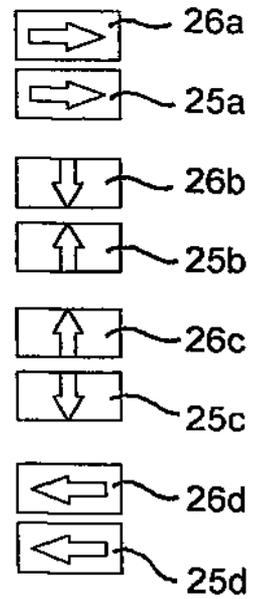
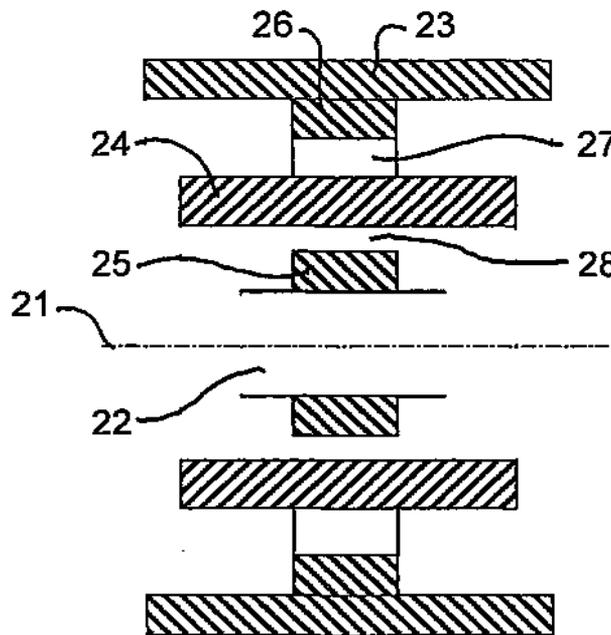
**10**



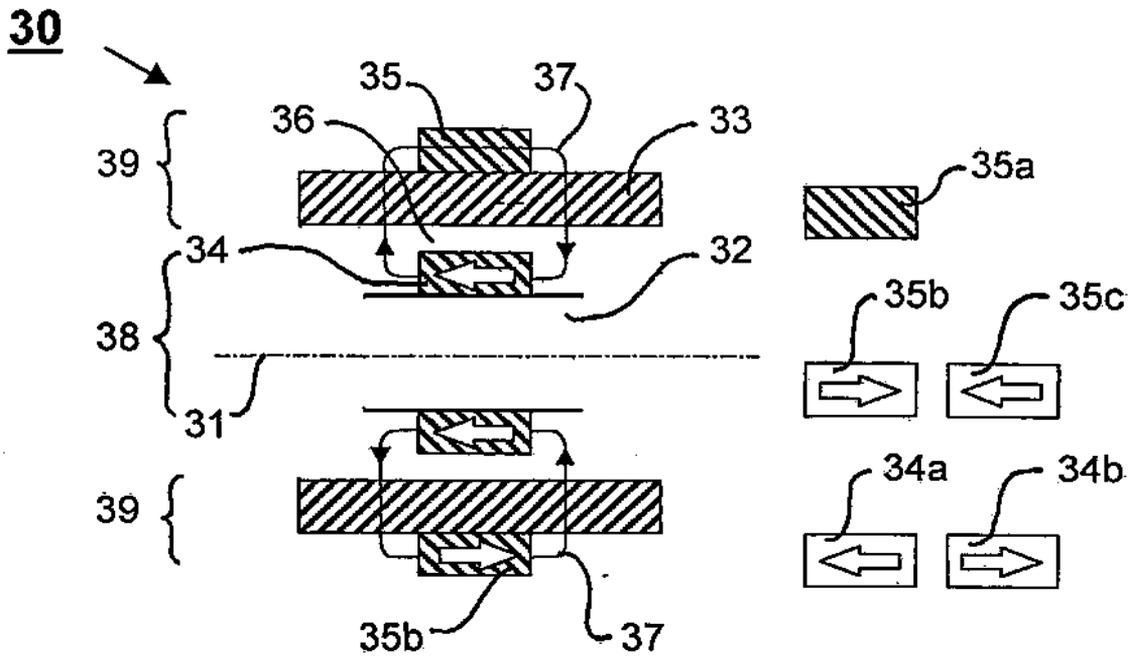
**Fig. 1**

Prior Art

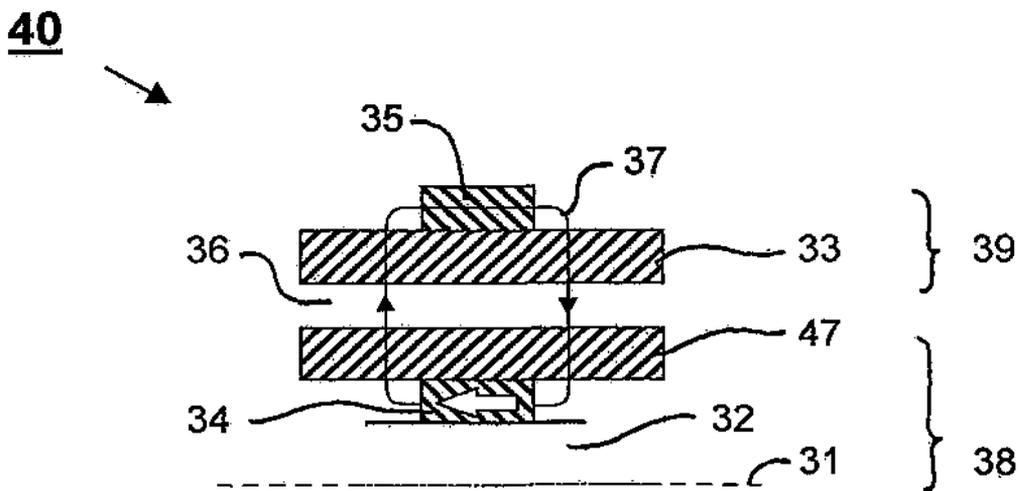
**20**



**Fig. 2**



**Fig. 3**



**Fig. 4**

50

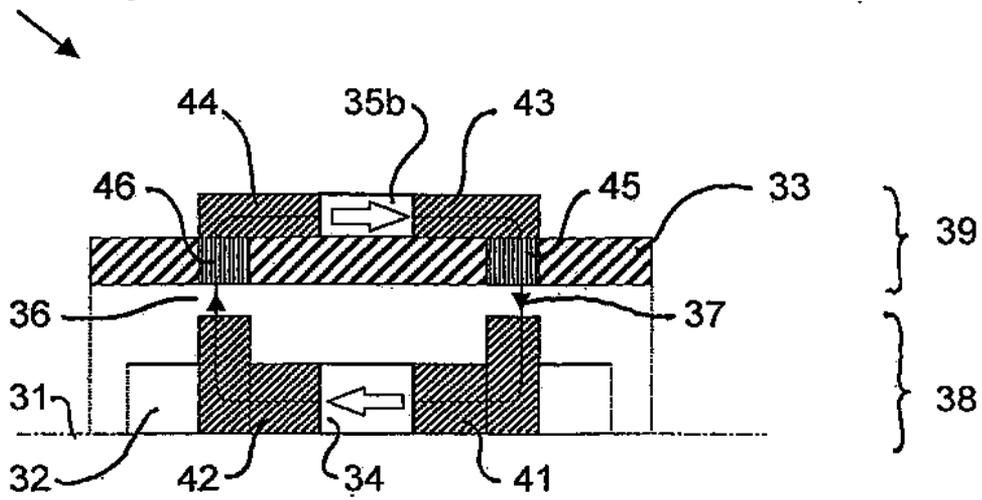


Fig. 5

60

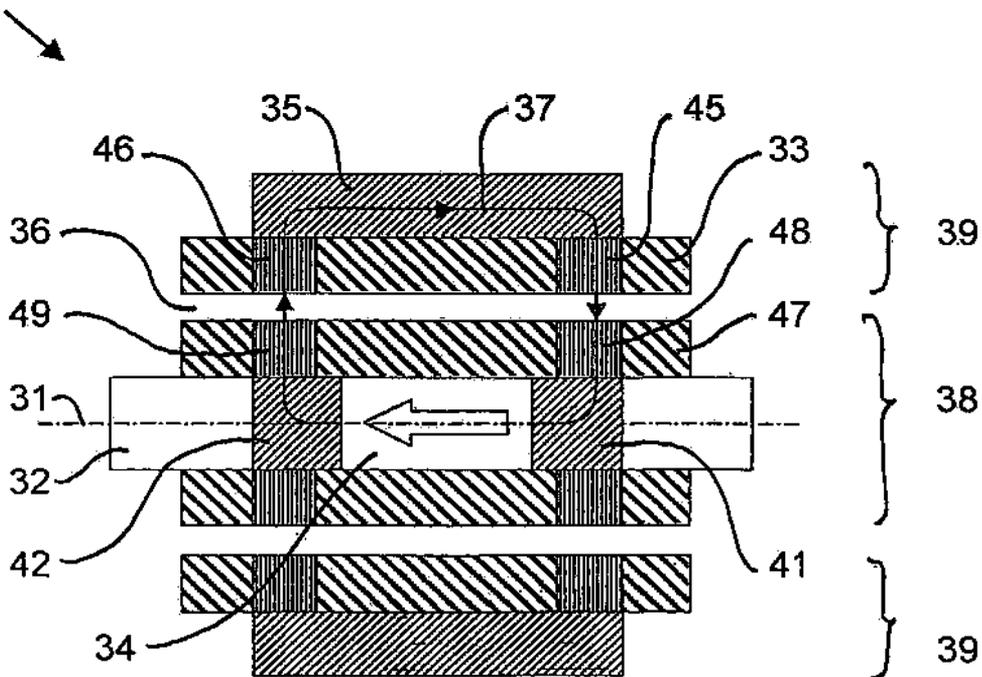


Fig. 6

70

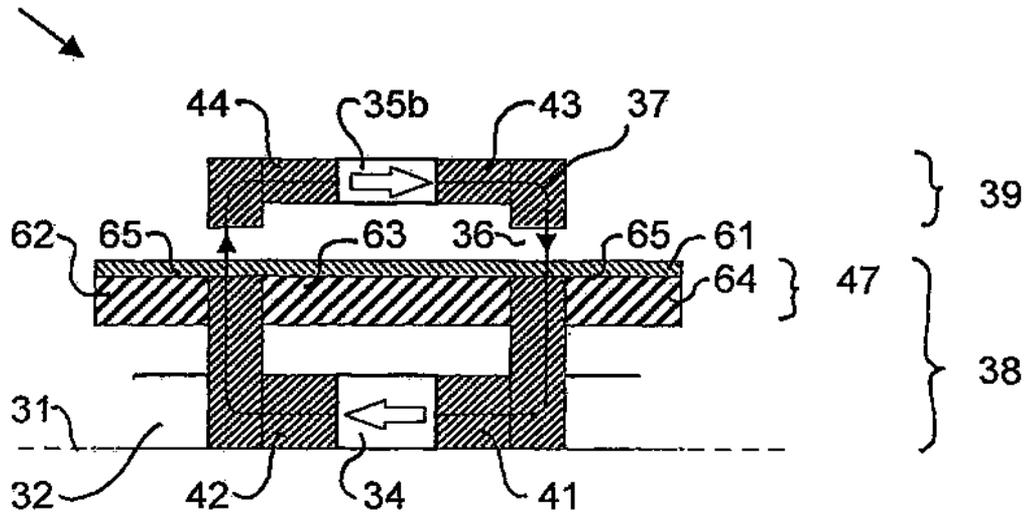


Fig. 7

80

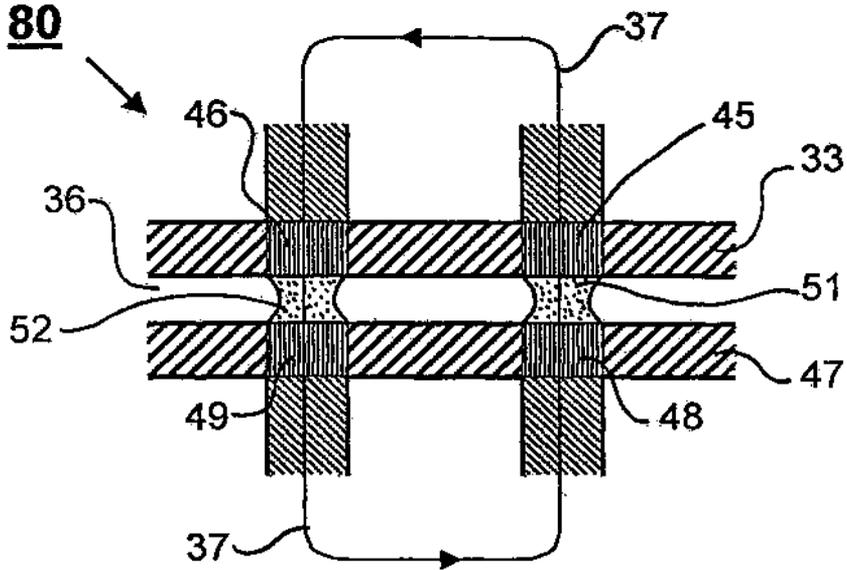
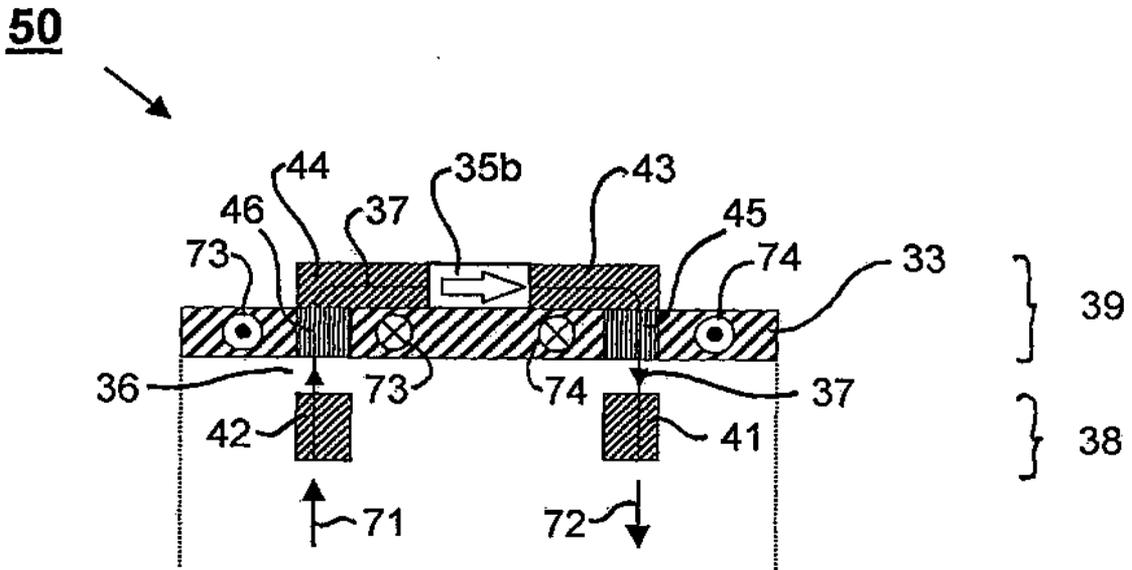
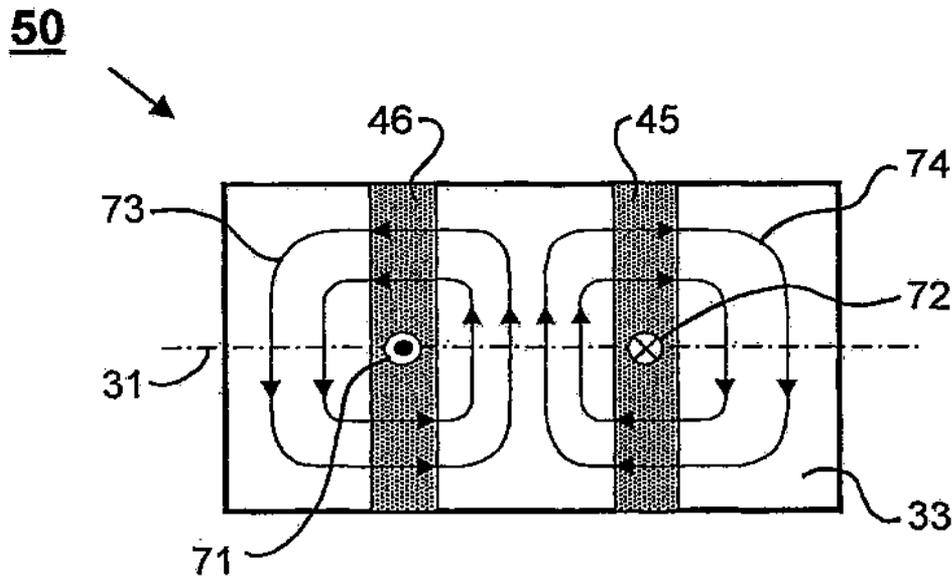


Fig. 9



**Fig. 8a**



**Fig. 8b**