



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2007 036 605 B4 2009.12.24**

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2007 036 605.3**

(22) Anmeldetag: **02.08.2007**

(43) Offenlegungstag: **05.02.2009**

(45) Veröffentlichungstag
 der Patenterteilung: **24.12.2009**

(51) Int Cl.⁸: **F16C 32/04 (2006.01)**

H02K 7/09 (2006.01)

H01F 6/00 (2006.01)

Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
NEXANS, Paris, FR

(74) Vertreter:
Einsel und Kollegen, 38102 Braunschweig

(72) Erfinder:
Walter, Heribert, 50374 Erftstadt, DE; Frohne, Christian, Dr.-Ing., 30657 Hannover, DE; Schippl, Klaus, Dipl.-Ing., 30659 Hannover, DE

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
 gezogene Druckschriften:

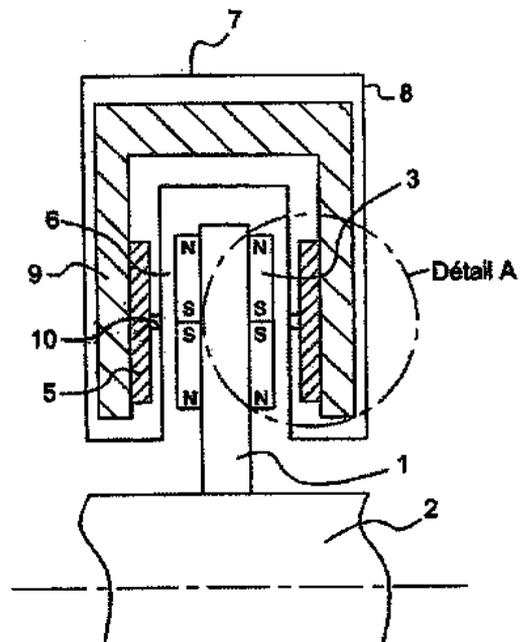
DE 196 43 844 C1

DE 203 18 389 U1

WO 02/18 807 A1

(54) Bezeichnung: **Stabilisiertes Hochtemperatur-Supraleiterlager**

(57) Hauptanspruch: Hochtemperatursupraleiterlager mit planarer Anordnung, aufweisend einen scheibenförmigen Rotor (1) auf einer Welle (2) und einen scheibenförmigen Stator (4), der den Rotor (1) umgibt, wobei die Stirnseiten des Rotors (1) jeweils eine Permanentmagnetanordnung aufweisen, die konzentrisch die Rotorwelle (2) umläuft, und wobei im Stator (4) der Permanentmagnetanordnung (3) gegenüberliegend konzentrisch verlaufende Hochtemperatursupraleiter (5) angeordnet sind, wobei die Permanentmagnetanordnung (3) und die Hochtemperatursupraleiter (5) planare Stirnflächen aufweisen, wobei eine planare Stirnfläche des Hochtemperatursupraleiters (5) einer planaren Stirnfläche der Permanentmagnetanordnung (3) gegenüberliegend angeordnet ist, und dazwischenliegend der Lagerspalt (6) ausgebildet ist, wobei die Hochtemperatursupraleiter (5) von einer Vakuumschleife (8) umgeben sind, und sich zwischen der Innenwand der Vakuumschleife (8) und der planaren Stirnfläche des Hochtemperatursupraleiters (5), die der Permanentmagnetanordnung gegenüberliegend angeordnet ist, mindestens ein Abstandshalter (10) befindet.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft Hochtemperatursupraleiterlager mit einem Rotor, der von einem Stator mit einem Hochtemperatursupraleiter umgeben ist, wobei der Rotor durch magnetische Kräfte in einem schwebenden Zustand gehalten wird.

[0002] HTS-Lager zeichnen sich durch einen stirnseitig in alle Raumrichtungen selbststabilen berührungsfreien Betrieb aus und bieten dadurch eine große Laufruhe und Wartungsarmut.

[0003] Die Nutzung des Levitationseffektes zwischen einem Magnetfeld (Erregung durch Dauermagnete oder Stromspulen) und einem Hochtemperatursupraleiter (HTS) zum Aufbau einer berührungsfreien Lagerung (superconductor magnetic bearing, SMB) von linearen bzw. rotierenden Systemen ist seit einigen Jahren bekannt.

[0004] Prinzipiell enthält ein solches Hochtemperatur-Supraleiterlager (HTS-Lager) eine Permanentmagnetanordnung als Erregersystem sowie einen Hochtemperatursupraleiter, wobei der Hochtemperatursupraleiter von dem magnetischem Fluss der Permanentmagnetanordnung durchdrungen wird.

[0005] Wird nun der Hochtemperatursupraleiter auf eine Temperatur unterhalb seiner Sprungtemperatur T_c gekühlt, wird der ihn durchdringende magnetische Fluss eingefroren. Im Falle einer Lageveränderung werden Kräfte erzeugt, die der Lageveränderung entgegen wirken. Diese Kräfte können abstoßend oder anziehend sein, sind jedoch auf jeden Fall derart gerichtet, dass sie gegen eine Lageveränderung aus der Einkühlposition heraus entgegenwirken.

[0006] Da die Größe dieser Kräfte mit zunehmenden Abstand von Erregersystem und Hochtemperatursupraleiter abnimmt, sollte dieser Abstand zur Erzielung von möglichst hohen Kräften möglichst klein gehalten werden.

[0007] Zur Erhöhung der magnetischen Flussdichte kann die Permanentmagnetanordnung als so genannte Sammleranordnung ausgestaltet sein, wobei zwischen den einzelnen Permanentmagneten ferromagnetische Flussleiterstücke, z. B. Eisenpole, angeordnet sind.

[0008] HTS-Lager können zur berührungsfreien Lagerung von rotierenden Systemen eingesetzt werden. Diese Lager bestehen prinzipiell aus einem feststehenden Teil, dem Stator, und einem rotierenden Teil, dem Rotor. Üblicherweise enthält der Stator den Hochtemperatursupraleiter und der Rotor ist mit der Permanentmagnetanordnung versehen, die als Erregersystem wirkt. Die Magnetisierung der Permanentmagnete ist so gewählt, dass die Verteilung des ma-

gnetischen Flusses um die Drehachse herum bei der Rotation unverändert bleibt, d. h. durch die Rotation werden keine Kräfte erzeugt.

[0009] Der Hochtemperatursupraleiter befindet sich zur Kühlung in einem Kryostat oder einer ähnlichen Kühlvorrichtung. Zur thermischen Isolierung der gekühlten Elemente des Stators, insbesondere des Hochtemperatursupraleiters, wird Vakuum an den Kryostaten angelegt. Beispielhaft für Aufbau und Funktionsweise von HTS-Lagern wird auf die europäische Patentanmeldung EP 1 767 798 A1 sowie auf WO 02/06688 A1 verwiesen, auf die hier vollinhaltlich Bezug genommen wird.

[0010] Prinzipiell können HTS-Lager mit zylindrischer bzw. planarer Anordnung unterschieden werden.

[0011] In einer zylindrischen Anordnung sind die Permanentmagnete coaxial entlang der Rotorwelle angeordnet. Die Rotorwelle mit den darauf angeordneten Permanentmagneten wird zylinderförmig von dem Hochtemperatursupraleiter umgeben, wobei sich der zylinderförmige Hochtemperatursupraleiter in einem gleichfalls zylinderförmigen Kryostaten befindet. Die Rotorwelle mit dem Permanentmagneten befindet sich in der so genannten Warmbohrung des Kryostaten. Der die Lagerkräfte bestimmende Spalt, auch magnetisch wirksamer Spalt bezeichnet, verläuft damit konzentrisch zwischen den gekrümmten Oberflächen von Supraleiter und Permanentmagnet mit der dazwischen befindlichen gleichfalls gekrümmten Vakuumschale des Kryostaten.

[0012] In einer planaren Anordnung ist ein Rotor konzentrisch auf einer Rotorwelle angeordnet. Die Stirnseiten des Rotors sind planar und weisen Permanentmagnete auf, die konzentrisch um die Welle herum angeordnet sind. Den Stirnseiten des Rotors mit der Permanentmagnetanordnung gegenüberliegend sind Hochtemperatursupraleiter angeordnet, die parallel zu der Permanentmagnetanordnung konzentrisch um die Rotorwelle herum verlaufen.

[0013] Die Hochtemperatursupraleiter und das diese umgebende Kryostatgehäuse mit Vakuumschale sind Bestandteile des Stators des Lagers.

[0014] Der die Lagerkräfte bestimmende Spalt befindet sich auch hier zwischen Hochtemperatursupraleiter und Permanentmagnetanordnung. Anders als in der zylindrischen Anordnung sind die Flächen des Hochtemperatursupraleiters und der Permanentmagnete, die sich gegenüber stehen, jedoch planar.

[0015] Um den magnetisch wirksamen Luftspalt zwischen dem Hochtemperatursupraleiter und der Permanentmagnetanordnung möglichst klein zu halten, sollte die Stärke der Vakuumschale sowie der Ab-

stand zwischen Hochtemperatursupraleiter und Innenwand der Vakuumschale so gering wie möglich sein.

[0016] Wird nun der Kryostat zur Wärmeisolation evakuiert, entsteht eine Druckdifferenz zwischen dem Inneren des Kryostaten und dessen äußerer Umgebung, so dass entsprechende Kräfte auf die Vakuumschale ausgeübt werden. In einer zylindrischen Anordnung wirkt die im magnetischen Spalt gewölbte Fläche der Vakuumschale der äußeren Krafteinwirkung entgegen, wodurch eine Verbiegung der Schale, auch bei geringer Stärke der Vakuumschale, nach innen aufgrund der Druckdifferenz verhindert wird.

[0017] Bauartbedingt ist dies bei der planaren Anordnung nicht gegeben und die planare Stirnseite der Vakuumschale in einer planaren Lageranordnung biegt sich aufgrund der Druckdifferenz nach Innen durch und legt sich an die kalten Oberflächen des Stators an. Eine Isolationswirkung des Vakuums ist damit nicht mehr gegeben.

[0018] DE 196 43 844 C1 betrifft eine planare Hochtemperatursupraleiter-Magnetlageranordnung, wobei sich der scheibenförmige Hochtemperatursupraleiter in einem separaten Kryostatgehäuse befindet, und das Kryostatgehäuse in einer Vakuumkammer angeordnet ist. Der Boden des Kryostatgehäuses, der sich auf der dem Lagerspalt abgewandten Seite des Kryostatgehäuses befindet, ist über Kryostatbefestigungen im Inneren der Vakuumkammer aufgehängt, wobei die Kryostatbefestigung Bolzen aufweist, die über Fahnen und Bolzen genannte Elemente an dem Kryostatboden ansetzen. Es finden sich jedoch keine Abstandshalter zwischen der Innenwand der Vakuumschale und der Stirnfläche des Hochtemperatursupraleiters, die der Permanentmagnetanordnung gegenüberliegend angeordnet sind.

[0019] DE 203 18 389 U1 und WO 2002/18807 A1 betreffen zylinderförmige magnetische Lager, wobei ein zylinderförmiger Hochtemperatursupraleiter eine Rotorwelle umgibt, auf der gleichfalls zylinderförmig die Permanentmagnete angeordnet sind. Wie vorstehend erörtert, ist hier auf Grund der baulichen Konstruktion die Gefahr der Eindellung der Vakuumschale, die im Lagerspalt verläuft, nicht gegeben.

[0020] Erfindungsgemäß wird dieses Problem durch die Merkmale des Anspruchs 1 gelöst. Die Unteransprüche betreffen bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung nach Anspruch 1.

[0021] Weiter umfasst die Erfindung die Verwendung eines Aerogels zur Ausbildung von Abstandhaltern.

[0022] Um den Abstand zwischen kalter Oberfläche und Vakuumschale sowie die Stärke der Vakuumschale,

und damit den magnetisch wirksamen Spalt, so gering wie möglich halten zu können, wird erfindungsgemäß ein Abstandshalter vorgesehen, der nicht nur eine hohe mechanische Festigkeit aufweist, sondern mit dem auch die erforderliche Isolationswirkung erzielt werden kann.

[0023] Erfindungsgemäß wird daher eine Stützanordnung vorgesehen, die nicht nur der Vakuumschale ausreichende Stabilität verleiht, sondern die materialbedingt und/oder anordnungsbedingt eine Wärmeübertragung in das Kühlsystem möglichst unterbindet und die Isolationsseigenschaften des Vakuums im Wesentlichen nicht beeinträchtigt.

[0024] Beispiele für geeignete Stützanordnungen sind Stützanordnungen aus Aerogelen sowie Strukturen aus faserverstärktem Kunststoff mit reduziertem Querschnitt und reduzierter Auflagefläche.

[0025] Nachfolgend wird die Erfindung anhand der anliegenden Figuren näher erläutert.

[0026] Es zeigen

[0027] Fig. 1a, b schematisch eine zylindrische HTS-Lageranordnung;

[0028] Fig. 2 schematisch eine planare HTS-Lageranordnung gemäß der vorliegenden Erfindung im Längsschnitt; und

[0029] Fig. 3 einen Ausschnitt der erfindungsgemäßen Lageranordnung nach Fig. 2

[0030] In Fig. 1a ist schematisch ein Längsschnitt durch ein Hochtemperatursupraleiterlager mit zylindrischem Aufbau gezeigt. Der Rotor 1 ist konzentrisch auf einer Welle 2 aufgebracht, wobei sich an den beiden Enden der Welle 2 ein Erregersystem befindet. Das Erregersystem ist eine Sammleranordnung mit von Permanentmagneten 3 und dazwischen angeordneten Flussleiterstücken 4. Das Erregersystem ist von einem zylinderförmigen Hochtemperatursupraleiter 5 umgeben. Zwischen Erregersystem und Hochtemperatursupraleiterlager 5 befindet sich der magnetisch wirksame Spalt 6.

[0031] Die zylinderförmige Anordnung von Erregersystem 3, 4 und Hochtemperatursupraleiter 5 ist in Fig. 1b verdeutlicht, die einen Aufriss des zylinderförmigen Erregersystems 3, 4 und des das Erregersystem umgebenden Hochtemperatursupraleiters 5 zeigt.

[0032] Ein Hochtemperatursupraleiterlager mit planarem Aufbau ist schematisch in Fig. 2 dargestellt. Gezeigt ist ein Rotor 1, der mit einer Welle 2 verbunden ist und diese im Wesentlichen konzentrisch umgibt. Die Stirnseiten des Rotors weisen konzentrisch

angeordnete Permanentmagnete **3** auf, die radial hintereinander angeordnet und hier entgegengesetzt magnetisiert sind. Die Magnetisierung ist durch N für den Nordpol und S für den Südpol angedeutet.

[0033] Zwischen den Permanentmagneten **3** befinden sich vorzugsweise Flussleiterstücke, zum Beispiel Eisenpole.

[0034] Der Rotor **1** mit den Permanentmagneten **3** ist von einem Stator **7** umgeben, der gleichfalls um die Welle **2** angeordnet ist.

[0035] Der Stator **7** weist eine Vakuumschale **8** auf. Innerhalb der Vakuumschale **8** verlaufen unterhalb und oberhalb des Rotors **1** Hochtemperatursupraleiter **5** um die Welle **2** herum, deren planare Stirnseiten den planaren Stirnseiten der Permanentmagnetaordnung **3** gegenüberliegend angeordnet sind. Die Hochtemperatursupraleiter **5** sind hier auf einer Trägerkonstruktion **9** aufgebracht.

[0036] Die Magnetisierung der Permanentmagnetaordnung **3** des Rotors **1** ist so gewählt, dass die Rotation des Rotors **1** zu keinen Feldveränderungen und damit nicht zu Kräften führt, und der rotierende Rotor **1** berührungsfrei in seiner Position relativ zu dem Stator gehalten wird.

[0037] Je nach Anwendung können auf der Rotorwelle **2** auch zwei oder mehrere Hochtemperatursupraleiterlager mit Rotor **1** und Stator **7** angeordnet sein.

[0038] Zur mechanischen Stabilisierung der Vakuumschale **8** ist mindestens ein Abstandshalter **10** zwischen Vakuumschale **8** und Hochtemperatursupraleiter **5** vorgesehen. Durch das Vorsehen des mindestens einen Abstandshalters **10** wird eine Verbiegung der Vakuumschale nach Innen und ein Anlegen an den Hochtemperatursupraleiter im evakuierten Zustand aufgrund der Druckdifferenzen verhindert.

[0039] Eine Detailansicht des Stators mit Abstandshalter **10** ist in **Fig. 3** dargestellt. Der Abstandshalter **10** wird zwischen HTS-Fläche und Vakuumschale **8** platziert. Unter Vakuum legen sich die Stirnseiten der Vakuumschale an die Abstandshalter an. Um ein Anlegen der Zwischenbereiche der Stirnwand an die Oberfläche des Hochtemperatursupraleiters **5** zu vermeiden, wird die Spannweite der Stirnwand zwischen den Abstandshaltern **10** bzw. deren Kontaktpunkten mit der Vakuumschale **8** so gewählt, dass eine möglicherweise auftretende Wölbung der Vakuumschale **8** ausreichend klein bleibt und ein Anlegen an den Hochtemperatursupraleiter vermieden wird.

[0040] Erfindungsgemäß kann der Abstandshalter **10** aus einem Aerogel bestehen. Aerogele haben eine hohe Porosität mit einem geringen Feststoffan-

teil und weisen damit unter Vakuum eine nur geringe thermische Leitfähigkeit auf. Gleichzeitig verfügen sie jedoch über vergleichsweise hohe mechanische Festigkeit, wodurch eine Stabilisierung der Vakuumschale gewährleistet wird.

[0041] Ein Beispiel für ein geeignetes Aerogel sind Silikat-Aerogele. Diese weisen typischerweise einen Feststoffanteil von weniger als 0,2% auf.

[0042] Aerogele wie Silikat-Aerogele sowie deren Herstellung sind an sich bekannt.

[0043] Die geometrische Ausgestaltung von Abstandshaltern auf Basis von Aerogelen unterliegt im Wesentlichen keinen besonderen Beschränkungen, solange die vorstehend genannten Rahmenbedingungen eingehalten werden, d. h. Verhinderung des Anlegens der Vakuumschale **8** an die Oberfläche des Hochtemperatursupraleiters **5** bei möglichst minimalem Wärmeeintrag. Beispielsweise können die Abstandshalter auf Basis von Aerogelen ringförmig zwischen Hochtemperatursupraleiter und Vakuumschale verlaufen. Je nach Anwendung können auch andere geometrische Ausgestaltungen zum Einsatz kommen, z. B. eine punktuelle Anordnung oder ein meanderförmiger oder sonstiger Verlauf.

[0044] Ein weiteres geeignetes Material für den erfindungsgemäßen Abstandshalter sind faserverstärkte Kunststoffe. Um den Wärmeübergang so gering wie möglich zu halten, sollten Abstandshalter aus faserverstärkten Kunststoffen einen reduzierten Querschnitt und möglichst kleinflächige und wenige Kontaktpunkte mit den Hochtemperatursupraleiter bzw. der Vakuumschale aufweisen. Im Falle von Abstandshaltern aus faserverstärkten Kunststoffen können diese ein dreidimensionales Netzwerk in dem Zwischenraum zwischen Hochtemperatursupraleiter und Vakuumschale bilden, um die Vakuumschale mechanisch zu stabilisieren.

[0045] „Reduzierter Querschnitt“ bedeutet hierbei, dass der Querschnitt der Streben, die die Struktur bilden, so gering wie möglich gewählt wird, um einen möglichst hohen Isolationseffekt zu erzielen und den Wärmeeintrag so gering wie möglich zu halten.

[0046] Aus demselben Grund wird die Kontaktfläche des Abstandshalters, d. h. die Berührungspunkte mit der Vakuumschale, so klein wie möglich gewählt.

[0047] Beispiel für geeignete faserverstärkte Kunststoffe sind glas- oder kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe.

[0048] Erfindungsgemäß ist es damit möglich, planare Hochtemperatursupraleiterlageranordnungen zu erhalten, die einerseits nur sehr dünne Kryostatwände und einen sehr geringen Abstand zwischen

Kryostatwand und Hochtemperatursupraleiter aufweisen können und trotzdem unter Vakuum eine hervorragende mechanische Stabilisierung der Kryostatwand und thermische Isolierung aufweisen.

Patentansprüche

1. Hochtemperatursupraleiterlager mit planarer Anordnung, aufweisend einen scheibenförmigen Rotor (1) auf einer Welle (2) und einen scheibenförmigen Stator (4), der den Rotor (1) umgibt, wobei die Stirnseiten des Rotors (1) jeweils eine Permanentmagnetanordnung aufweisen, die konzentrisch die Rotorwelle (2) umläuft, und wobei im Stator (4) der Permanentmagnetanordnung (3) gegenüberliegend konzentrisch verlaufende Hochtemperatursupraleiter (5) angeordnet sind, wobei die Permanentmagnetanordnung (3) und die Hochtemperatursupraleiter (5) planare Stirnflächen aufweisen, wobei eine planere Stirnfläche des Hochtemperatursupraleiters (5) einer planaren Stirnfläche der Permanentmagnetanordnung (3) gegenüberliegend angeordnet ist, und dazwischenliegend der Lagerspalt (6) ausgebildet ist, wobei die Hochtemperatursupraleiter (5) von einer Vakuumschale (8) umgeben sind, und sich zwischen der Innenwand der Vakuumschale (8) und der planaren Stirnfläche des Hochtemperatursupraleiters (5), die der Permanentmagnetanordnung gegenüberliegend angeordnet ist, mindestens ein Abstandshalter (10) befindet.

2. Hochtemperatursupraleiterlager mit planarer Anordnung nach Anspruch 1, wobei der Abstandshalter aus einem Material ist, das ausgewählt ist unter einem Aerogel und einem faserverstärktem Kunststoff.

3. Hochtemperatursupraleiterlager mit planarer Anordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der mindestens eine Abstandshalter (10) aus Aerogel besteht und ringförmig auf den Hochtemperatursupraleiter (5) aufgesetzt ist.

4. Hochtemperatursupraleiterlager mit planarer Anordnung nach Anspruch 2 oder 3, wobei das Aerogel ein Silikat-Aerogel ist.

5. Hochtemperatursupraleiterlager mit planarer Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 2, wobei der mindestens eine Abstandshalter (10) aus faserverstärktem Kunststoff besteht und eine dreidimensionale Struktur ausbildet, wobei der Wärmeübergang durch die Größe des Wärmeleiterquerschnitts der Struktur und der Anzahl der Kontaktpunkte mit dem Hochtemperatursupraleiter (5) und der Vakuumschale (8) reguliert ist.

6. Hochtemperatursupraleiterlager mit planarer Anordnung nach Anspruch 4, wobei der faserver-

stärkte Kunststoff ausgewählt ist unter einem glasfaserverstärktem Kunststoff und einem Kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff.

7. Verwendung von Aerogel zur Ausbildung von Abstandshaltern (10) zwischen der inneren Wandfläche einer Vakuumschale (8) und einem Hochtemperatursupraleiter (5) in einem Hochtemperatursupraleiterlager.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

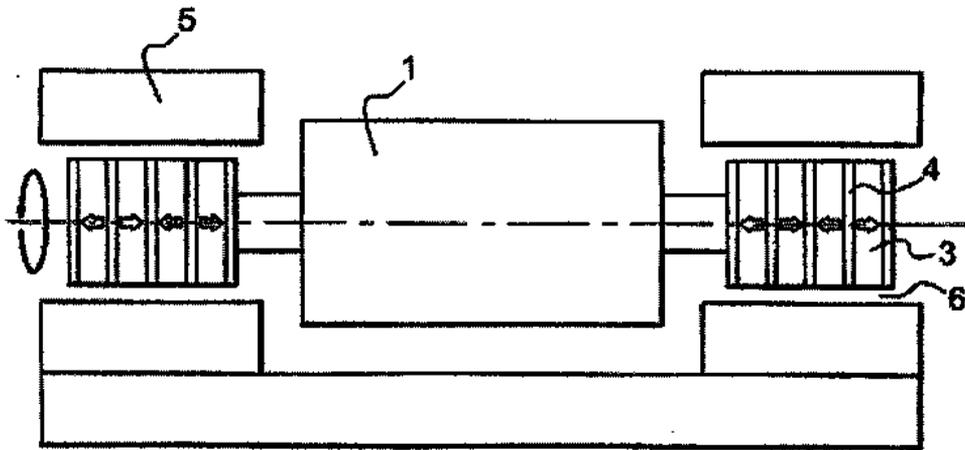


Fig. 1a

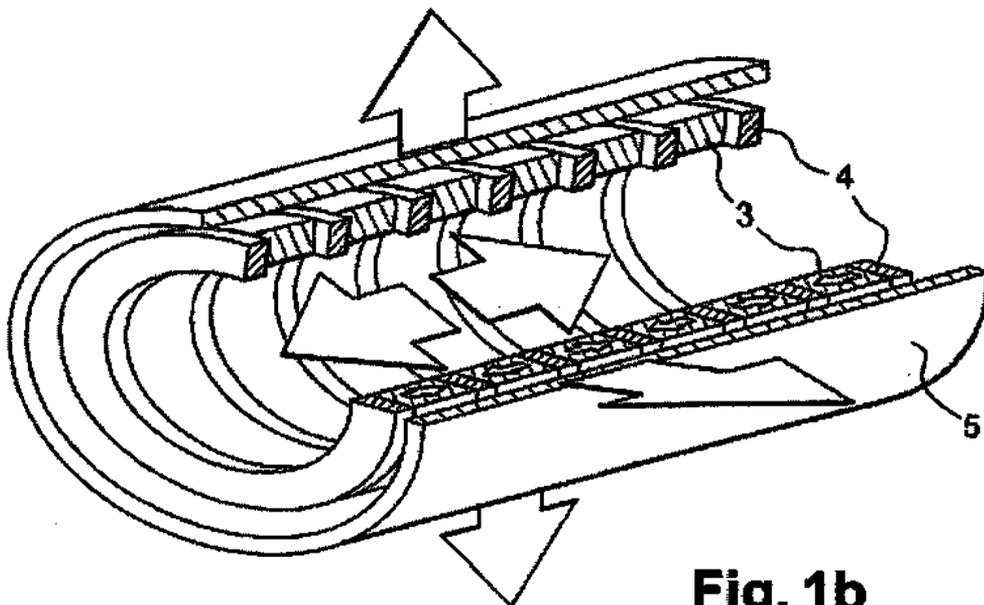


Fig. 1b

