



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2007 036 603 A1** 2009.02.19

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2007 036 603.7**

(22) Anmeldetag: **02.08.2007**

(43) Offenlegungstag: **19.02.2009**

(51) Int Cl.⁸: **F16C 32/04 (2006.01)**
H02K 7/09 (2006.01)

(71) Anmelder:
NEXANS, Paris, FR

(74) Vertreter:
Einsel und Kollegen, 38102 Braunschweig

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

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

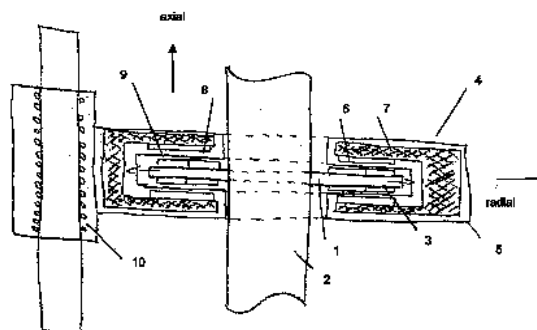
DE 198 50 421 A1
EP 17 67 798 A1
EP 08 58 691 B1
WO 200/2 06 688 A1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

(54) Bezeichnung: **Hochtemperatur-Supraleiterlager mit verbesserter Lagernachführung**

(57) Zusammenfassung: Die vorliegende Erfindung betrifft ein planares Hochtemperatursupraleiterlager, wobei der Stator 4 axial verschieblich ausgeführt ist, so dass die mit einer axialen Verschiebung der Welle 2 aufgrund thermischer Längenausdehnung verbundenen Axialkräfte eine axiale Verschiebung des Stators bewirken und damit die thermische Längenausdehnung der Welle 2 kompensiert wird.



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 magnetischen 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 der Permanentmagnetanordnung 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 Rotation unverändert bleibt und durch die Rotation selbst keine Kräfte bewirkt werden.

[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. In einer zylindrischen Anordnung sind die sich gegenüberliegenden Stirnseiten des Hochtemperatursupraleiters und der Permanentmagnetanordnung gekrümmt.

[0012] In einer planaren Anordnung ist ein Rotor mit planaren Stirnseiten konzentrisch auf einer Rotorwelle angeordnet. Die Stirnseiten des Rotors weisen Permanentmagnete auf, die konzentrisch um die Welle herum angeordnet sind. Der Stator des Lagers weist Hochtemperatursupraleiter und ein diese umgebendes Kryostatgehäuse mit Vakuummhülle auf. Die Hochtemperatursupraleiter sind den Stirnseiten des Rotors mit der Permanentmagnetanordnung gegenüberliegend angeordnet und umgeben parallel zu den Permanentmagneten konzentrisch die Rotorwelle.

[0013] Der die Lagerkräfte bestimmende Abstand, auch magnetisch wirksamer Spalt genannt, zwischen dem Erregersystem und dem Hochtemperatursupraleiter setzt sich damit aus dem Isolierspalt im Kryostaten zwischen Innenwandung des Kryostaten und Stirnseite des Hochtemperatursupraleiters, der Wanddicke des Kryostaten sowie dem Luftspalt zwischen Außenwandung des Kryostaten und Stirnseite des Erregersystems zusammen. In heutigen Anordnungen beträgt die Dimension des magnetisch wirksamen Spaltes einer solchen Lageranordnung ca. 3 mm, wobei die Dimension der vorstehend genannten Teilabstände jeweils ca. 1 mm beträgt.

[0014] In einem planaren Lager der vorstehend ge-

nannten Anordnung rotiert der Rotor radial um die Welle, wobei einer radialen Ablenkung des Rotors durch entsprechend radiale Magnetisierung der Permanentmagnete entgegen gewirkt wird.

[0015] Generell kommt es in Lagern mit einem auf einer Rotorwelle montierten Rotors im Betrieb zu einer thermischen Längenausdehnung der Rotorwelle. Das Ausmaß der Längenausdehnung hängt dabei unter anderem von der Wellentemperatur ab.

[0016] In einer 3 Meter langen Welle mit einer Wellentemperatur von 100 bis 150°C beträgt die thermische Längenausdehnung typischerweise 5 bis 10 mm.

[0017] Dies hat zur Folge, dass in einem feststehenden Lager der magnetisch wirksame Spalt entsprechend vergrößert werden muss, um einen Kontakt der Permanentmagnetanordnung mit der Außenwand des Kryostatgehäuses zu vermeiden. Eine derartig drastische Vergrößerung des magnetisch wirksamen Spaltes würde zu einer erhebliche Reduktion der spezifischen Tragkraft des Lagers bzw. zu einer Erhöhung des Einsatzes an supraleitenden Material für die Beibehaltung der Tragkraft führen.

[0018] Es war daher Aufgabe der vorliegenden Erfindung ein planares Hochtemperatursupraleiterlager zur Verfügung zu stellen, das eine einfache Kompensation der Längenausdehnung der Rotorwelle erlaubt, ohne dass eine Vergrößerung des magnetisch wirksamen Spaltes erforderlich ist.

[0019] Erfindungsgemäß wird diese Aufgabe gelöst, indem in einem planaren HTS-Lager der Stator axial verschieblich auf einer Führung aufgesetzt ist, und der Stator durch die Axialkräfte, die aufgrund der axialen Verschiebung der Welle auftreten, axial nachgeführt wird.

[0020] Nachfolgend wird die vorliegende Erfindung anhand der anliegenden Figuren, die Ausführungsformen der Erfindung zeigen, näher verdeutlicht.

[0021] Es zeigt

[0022] Fig. 1 schematisch ein erfindungsgemäßes planares HTS-Lager im Längsschnitt;

[0023] Fig. 2 schematisch eine erfindungsgemäße Ausführungsform mit Festlager/Loslager-Anordnung.

[0024] Das in Fig. 1 gezeigte HTS-Lager mit planarem Aufbau weist einen Rotor 1 mit planaren Stirnseiten auf, der konzentrisch auf eine Welle 2 aufgesetzt ist. Die Stirnseiten weisen Permanentmagnete 3 auf, die konzentrisch um den Rotor 1 herum angeordnet sind, und wobei die Permanentmagnete 3 radial hintereinander angeordnet sind.

[0025] Erfindungsgemäß bevorzugt ist die Permanentmagnetanordnung als Sammleranordnung ausgebildet.

[0026] Die Permanentmagnete können die Form von Ringen haben, die um die Welle 2 herum laufen. Die Ringe können einstückig sein. Im Allgemeinen können sie aber aus gebogenen Segmentstücken zusammengesetzt sein.

[0027] In der hier gezeigten Ausführungsform sind die Permanentmagnete 3 entgegengesetzt magnetisiert, wobei N für den Nordpol und S für den Südpol steht.

[0028] Der Rotor 1 mit den Permanentmagneten 3 ist von einem Stator 4 umgeben, der gleichfalls um die Welle 2 angeordnet ist.

[0029] Der Stator 4 weist eine Vakuumschale 5 auf. Innerhalb der Vakuumschale 5 befinden sich Hochtemperatursupraleiter 6, deren planare Stirnseiten den planaren Stirnseiten der Permanentmagnetanordnung 3 gegenüberliegend angeordnet sind. Die Hochtemperatursupraleiter 6 sind auf einer Trägerkonstruktion 7 aufgebracht.

[0030] Der Abstand zwischen der Stirnseite des Hochtemperatursupraleiters 6 und der Stirnseite der jeweils gegenüberliegenden Permanentmagnetanordnung 3 bildet den die Lagerkräfte bestimmenden magnetisch wirksamen Spalt 8.

[0031] In dem hier gezeigten Lager ist die Magnetisierung der Permanentmagnete derart gewählt, dass das Lager eine hohe radiale Steifigkeit aufweist. Eine mögliche Positionsänderung des Rotors 1 in radialer Richtung erzeugt damit eine entsprechende rückstellende Kraft in entgegen gesetzter Richtung, so dass der Rotor 1 sicher in seiner radialen Position gehalten wird. Die Rotation des Rotors 1 um die Welle 2 herum führt zu keiner Veränderung des magnetischen Flusses, so dass durch die Rotation selbst keine Kräfte erzeugt werden, die der Rotation entgegenwirken würden.

[0032] Im Betrieb kommt es zu einer thermischen Längenausdehnung des Rotors 2 in axialer Richtung und in Folge dieser thermischen Längenausdehnung der Welle 2 zu einer axialen Verschiebung des Rotors 1 und damit zu einer Annäherung der Stirnseite der Permanentmagnetanordnung 3 an die Außenwand der Vakuumschale 5 des Stators 4.

[0033] Da der Betrag der thermischen Längenausdehnung im Allgemeinen größer ist als der Luftspalt 9 zwischen Stirnseite der Permanentmagnetanordnung 3 und Außenwand der Vakuumschale 5, kommt es zu einem Kontakt zwischen Permanentmagnet 3 und Vakuumschale 5 und damit zur Störung des La-

gers.

[0034] Eine Vergrößerung des Luftspaltes **9** ist unter praktischen Gesichtspunkten unerwünscht, da dadurch die Lagerkräfte erheblich beeinträchtigt werden würden. Um dennoch ausreichende Lagerkräfte bei einem vergrößerten Luftspalt **9** erhalten zu können, müsste entsprechend mehr Supraleitermaterial eingesetzt werden, was zu einer erheblichen Kostensteigerung führen würde.

[0035] Die Magnetisierung der Permanentmagnetanordnung führt jedoch nicht nur bei radialer Positionsänderung, sondern auch bei axialer Positionsänderung zu einer Änderung des magnetischen Feldes und damit zur Erzeugung entsprechender Rückstellkräfte, die der jeweiligen Positionsänderung entgegen wirken.

[0036] Eine axiale Verschiebung des Rotors **1** in Folge einer thermischen Längenausdehnung der Welle **2** bewirkt damit die Ausbildung einer entsprechenden axialen Rückstellkraft.

[0037] Die vorliegende Erfindung macht sich die Tatsache zu Nutze, dass auch die axiale Verschiebung des rotierenden Teiles zu einer Kraftübertragung auf den Stator **4** mit den Hochtemperatursupraleitern führt. Hierzu wird der Stator **4** axial verschieblich mit einer Führung **10** verbunden. Aufgrund der axialen Verschiebbarkeit des Stators **4** führen die Axialkräfte, die mit einer Verschiebung der Welle verbunden sind, zu einer axialen Verschiebung des Stators **4** bis zum Ausgleich. Der Luftspalt **9** kann damit auf das für Fertigungstoleranzen notwendige Minimum beschränkt bleiben, ohne dass eine möglicherweise auftretende axiale Verschiebung des Rotors **1** berücksichtigt werden muss.

[0038] Die Führung **10** kann wie in der Figur schematisch dargestellt, als Linearführung mit Kugelbüchse ausgebildet sein.

[0039] Fig. 2 zeigt eine Anwendungsform einer erfindungsgemäßen Hochtemperatursupraleiterlageranordnung.

[0040] Die in Fig. 2 gezeigte Anwendungsform weist zwei Hochtemperatursupraleiterlager **14**, **15** auf, die im Bereich der gegenüberliegenden Enden der Welle **2** angeordnet sind. In der hier gezeigten Ausführungsform sind die Hochtemperatursupraleiterlager aus axial auf der Welle **2** abwechselnd hintereinander angeordneten Rotoren **2** mit Permanentmagnetanordnung **3** und Statoren **4** mit Kryostatbehälter und Hochtemperatursupraleiter ausgebildet.

[0041] Die Rotoren **1** in der hier gezeigten Ausführungsform sind Magnetrotoren, die aus der Permanentmagnetanordnung beziehungsweise der Samm-

leranordnung gebildet sind.

[0042] Das in der Fig. 2 links gezeigte Hochtemperatursupraleiterlager **14** ist als Festlager ausgebildet und ist damit axial nicht verschieblich.

[0043] Im Gegensatz hierzu ist das in Fig. 2 rechts abgebildete Hochtemperatursupraleiter **15** als Loslager ausgebildet und ist axial verschieblich.

[0044] Das Loslager **15** ist fest mit einer Führung **10** verbunden. Die Führung **10** ist in der hier gezeigten Ausführungsform als Linearführung ausgeführt und weist einen Lagerbock **11**, eine Welle **12** sowie eine Schiebhülse **13** auf. Die Schiebhülse **13** wiederum ist mit dem Kryostatgehäuse der Statoren **4** verbunden.

[0045] Dehnt sich nun die Welle **2** im Betrieb in axialer Richtung kann die Längenausdehnung durch automatische Nachführung des Loslagers **15** kompensiert werden.

[0046] Neben einer Festlager/Loslageranordnung ist die vorliegende Erfindung für Loslager/Loslageranordnungen gleichermaßen geeignet.

[0047] Die vorliegende Erfindung eignet sich z. B. zur Anwendung in schnell laufenden Elektromotoren, Verdichtern, etc.

[0048] Gemäß einer weiteren Ausführungsform können in dem Zwischenraum zwischen Innenwand der Vakuumhülle **5** und Oberfläche des Hochtemperatursupraleiters **6** ein oder mehrere Abstandshalter vorgesehen sein, die eine mögliche Verbiegung der Vakuumhülle **5** in Folge der Druckdifferenzen, die beim Evakuieren des Kryostaten entstehen, verhindern.

[0049] Der Abstandshalter kann beispielsweise aus einem Aerogel wie einem Silikat-Aerogel oder einer Struktur aus faserverstärktem Kunststoff, wie glas- oder kohlenstoffverstärktem Kunststoff gebildet sein.

[0050] Die vorliegende Erfindung basiert auf dem Umstand, dass ein HTS-Lager eine sich selbst justierende Anordnung darstellt, wobei das Lager versucht, den während des Einkühlvorganges eingestellten magnetisch wirksamen Spalt **8** beizubehalten. D. h. bei einem auf der Motorwelle **2** fixierten Rotor **1**, welcher dem Stator **4** mit den Supraleitern **6** im eingekühlten Zustand gegenüber steht, hält das erfindungsgemäße HTS-Lager mit beweglich aufgebautem Stator diesen Spalt **8** bei. Durch die Ausbildung von zumindest einem HTS-Wellenlager als Loslager, so dass sich der Stator **4** bei fixiertem Rotor selbst ausrichten kann, kompensiert die Lageranordnung die in der Welle **2** generierte Längenausdehnung selbst.

Bezugszeichenliste

1	Rotor
2	Welle
3	Permanentmagnetanordnung
4	Stator
5	Vakuumhülle
6	Hochtemperatursupraleiter
7	Trägerkonstruktion
8	Lagerspalt
9	Luftspalt
10	Führung
11	Lagerbock der Linearführung
12	Welle der Linearführung
13	Schiebehülse
14	Festlager
15	Loslager

ZITATE ENthalTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- EP 1767798 A1 **[0009]**
- WO 02/06688 A1 **[0009]**

Patentansprüche

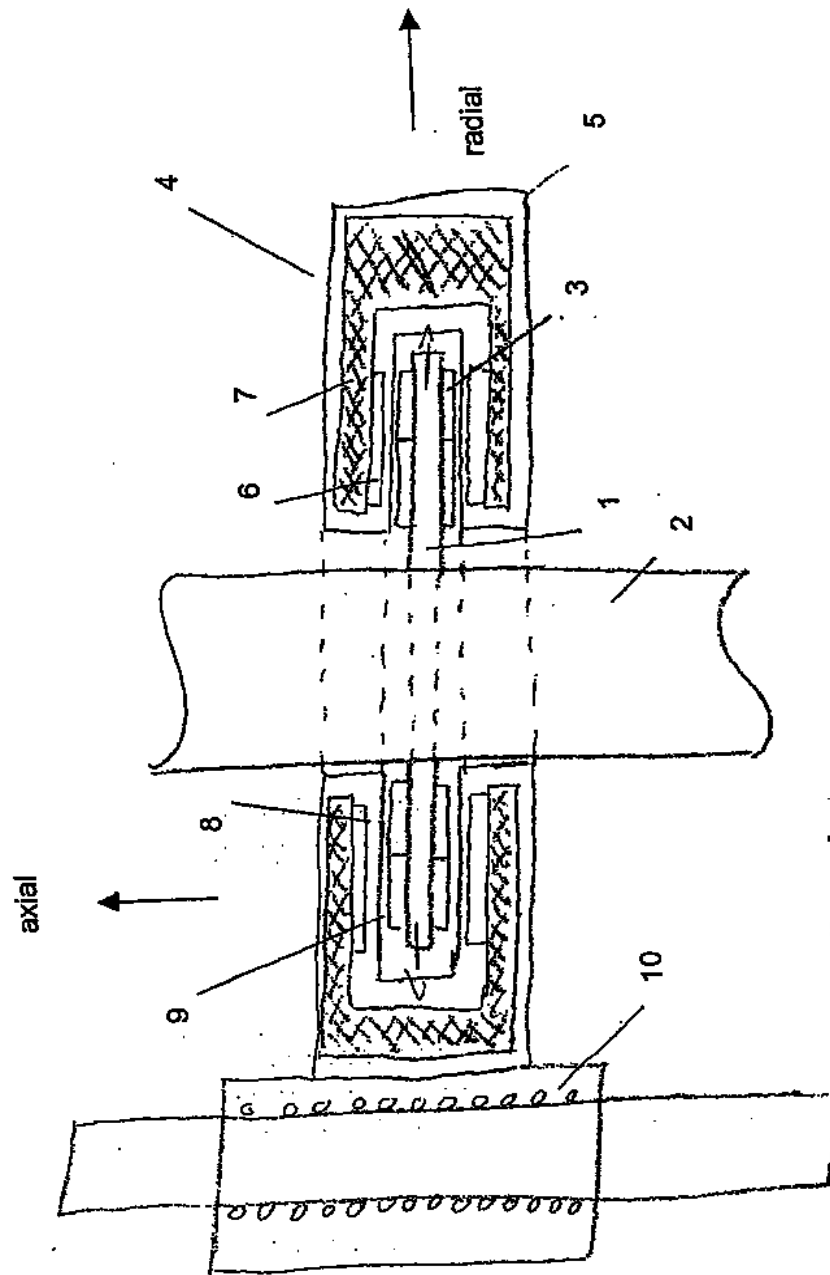
1. Hochtemperatursupraleiterlager mit planarer Anordnung, aufweisend eine Rotor (1), der auf einer Welle (2) montiert ist und einen Stator (4), wobei die Stirnseiten des Rotors (1) jeweils eine Permanentmagnetanordnung (3) aufweisen, die konzentrisch die Rotorwelle (2) umgibt, und wobei im Stator (4), der Permanentmagnetanordnung (3) gegenüberliegend, Hochtemperatursupraleiter (6) angeordnet sind, wobei sich die planaren Stirnflächen der Hochtemperatursupraleiter (6) und der Permanentmagnetanordnung (3) gegenüberstehen, und der Abstand zwischen Hochtemperatursupraleiter (6) und Permanentmagnetanordnung (3) den magnetisch wirksamen Lagerspalt (8) bildet, wobei der Stator (4) axial verschieblich ausgebildet und mit einer Führung (10) verbunden ist.

2. Hochtemperatursupraleiterlager nach Anspruch 1, wobei die Führung (10) als Linearführung ausgebildet ist.

3. Verfahren zur Kompensation der thermischen Längenausdehnung einer Rotorwelle (2) in einem planaren Hochtemperatursupraleiterlager, wobei bei axialer Verschiebung der Welle (2) aufgrund thermischer Längenausdehnung ein axial verschieblich ausgestalteter Stator (4) durch die mit der thermischen Längenausdehnung der Welle (2) verbundenen Axialkräfte bis zum Ausgleich verschoben wird, und der Luftspalt (9) zwischen Vakuumhülle (5) des Stators (4) und Permanentmagnetanordnung (3) beibehalten wird.

4. Verwendung eines planaren Hochtemperatursupraleiterlagers nach Anspruch 1 oder 2 in Elektromotoren und Verdichtern.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen



Figur 1

