

(19)



Deutsches
Patent- und Markenamt



(10) **DE 10 2009 009 127 A1** 2010.09.16

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2009 009 127.0**

(22) Anmeldetag: **17.02.2009**

(43) Offenlegungstag: **16.09.2010**

(51) Int. Cl.⁸: **F16C 32/04 (2006.01)**
H01F 6/06 (2006.01)

(71) Anmelder:

**Schaeffler Technologies GmbH & Co. KG, 91074
Herzogenaurach, DE**

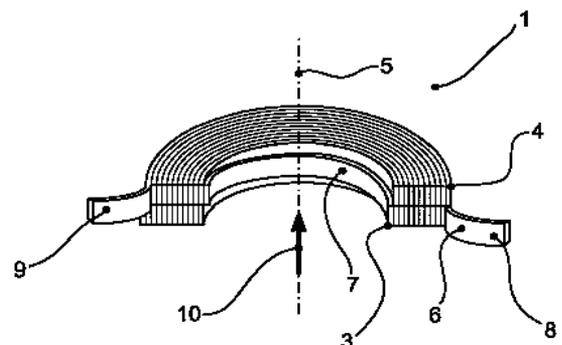
(72) Erfinder:

**Antrag auf Teilnennung; Glück, Stefan, 97424
Schweinfurt, DE; Schwarz, Sergej, Dr., 90491
Nürnberg, DE**

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Spule für ein supraleitendes Magnetlager**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Spule (1) für ein supraleitendes Magnetlager, umfassend einen stromtragenden Leiter (6) aus einem supraleitenden Material. Die Aufgabe, ein supraleitendes Magnetlager mit verbesserten Lagereigenschaften anzugeben, wird erfindungsgemäß dadurch gelöst, dass der Leiter (6) abschnittsweise als sich im Wesentlichen radial erstreckende, die Spulenachse (5) umlaufende Wicklung (2) ausgebildet ist. Die Erfindung betrifft weiter ein supraleitendes Magnetlager mit einer derartigen Spule (1).



Beschreibung

Gebiet der Erfindung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Spule nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1 für ein supraleitendes Magnetlager nach Anspruch 11.

[0002] Aus dem Stand der Technik sind supraleitende Magnetlager bekannt, die ein Korpus aus einem Material eines Typ-2-Supraleiters an einem der beiden Lagerringe umfassen, wobei im Bereich des Korpus ein Magnetfeld wirkt, das in dem Korpus Vortizes hervorruft, die von einem widerstandslos fließenden Strom umgeben sind, sofern der Typ-2-Supraleiter des Korpus in den supraleitenden Zustand überführt ist. Damit das Magnetlager gute Lagereigenschaften, insbesondere starke Rückstellkräfte in axialer und radialer Richtung, entfalten kann und gleichzeitig eine Drehung der gelagerten Welle ermöglicht, ist zu fordern, dass das Magnetfeld im Bereich des Korpus an der Welle in Umlaufrichtung der Welle homogen ist und in axialer sowie in radialer Richtung bezogen auf die Welle möglichst einen starken Gradienten aufweist.

[0003] Es ist bekannt, das Magnetfeld mittels normalleitenden Spulen bzw. mittels Permanentmagneten bereitzustellen. Die erreichbaren Magnetfelder bzw. Gradienten sind jedoch begrenzt, zudem weisen normalleitende Spulen im Dauerbetrieb einen hohen Energieverbrauch auf, während Permanentmagneten einen hohen Bauraum beanspruchen.

[0004] Es ist weiter bekannt, das Magnetfeld mittels supraleitender Spulen bereitzustellen.

[0005] JP 01141222 AA (Abstract) beschreibt ein supraleitendes Magnetlager, bei dem ein Korpus aus einem supraleitenden Material an einem Schaftabschnitt einer Welle eines Rotors angebracht ist, und wobei der Stator zwei supraleitende Spulen umfasst, die den Rotor radial lagern. Zur axialen Lagerung des Rotors sind zwei zusätzliche Spulen aus einem supraleitenden Material vorgesehen. Die supraleitenden Spulen umfassen ein stromtragendes Material, das sehr tiefe Temperaturen (weniger als ca. 10 K) erforderlich macht.

[0006] Der Aufsatz 'Force Density of Magnetic Bearings Using Superconducting Coils and Bulk Superconductors' von K. Nagashima et al., QR of RTRI, vol. 49, No. 2 (May 2008), S. 127 bis 132 beschreibt ab S. 132 unter '3.2 Configuration of the superconducting coil' mit Bezug auf **Abb. 8** und **9** eine Anordnung zur schwebenden Lagerung eines Schwungrades, bei dem eine erste und eine axial beabstandete zweite Spule vorgesehen sind, deren Magnetfelder entgegengesetzt sind, so dass axial mittig zwischen den beiden Spulen das resultierende Magnetfeld ver-

schwindet und nahe der axial mittigen Position ein starker Gradient entsteht. Beide Spulen umfassen einen stromtragenden Leiter aus einer Niob-Titan-Legierung, also einen Tieftemperatur-Supraleiter, der Temperaturen von wenigen Kelvin erforderlich macht, um in den supraleitenden Zustand überführt zu werden. Nachteilig ist weiter, dass der starke Gradient des resultierenden Magnetfeldes in einem axial nur sehr begrenzten Bereich von wenigen Millimetern auftritt. Die Lagerung eines längeren Abschnittes ist kaum möglich.

Aufgabe der Erfindung

[0007] Es ist die Aufgabe der Erfindung, ein supraleitendes Magnetlager mit verbesserten Lagereigenschaften anzugeben.

Zusammenfassung der Erfindung

[0008] Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß für das supraleitende Magnetlager nach Anspruch 11 mit einer supraleitenden Spule nach Anspruch 1 gelöst.

[0009] Weil der stromführende Leiter abschnittsweise als sich im wesentlichen radial erstreckende, die Spulenachse umlaufende Wicklung ausgebildet ist, verstärkt sich das Magnetfeld, das den Leiter im Bereich der Wicklung umgibt, beispielsweise annähert mit der Anzahl der Wicklungen, mit denen der Leiter die gedachte Spulenachse umläuft.

[0010] Im Bereich der Wicklung erstreckt sich der Leiter im wesentlichen nur radial fortschreitend um die Spulenachse, während bei bekannten, spiralförmigen Spulen der Leiter sich im wesentlichen axial fortschreitend um die Spulenachse erstreckt und meistens einen konstanten radialen Abstand zu der Spulenachse einhält. Sind mehrere Dutzend, einige Hundert oder bis zu Tausend oder mehr Wicklungen vorgesehen, verstärkt sich das Magnetfeld des Leiters im Bereich der Wicklungen um einen Faktor von mindestens einer Größenordnung. Auf diese Weise lässt sich nicht nur ein Magnetfeld von hoher Stärke erreichen, das im wesentlichen im Umfangsrichtung der Spulenachse homogen ist, sondern ebenfalls ein starker Gradient des Magnetfeldes erzielen, beispielsweise zwischen einem ersten Abschnitt des Leiters, an dem eine Wicklung vorgesehen ist, und einem zweiten Abschnitt, an dem der Leiter sich nicht radial fortschreitend, sondern axial fortschreitend um die Spulenachse erstreckt. Auf diese Weise lässt sich durch das Vorsehen bzw. Fortlassen der Wicklungen an der Spule ein starker radialer und auch axialer Gradient des erzeugten Magnetfeldes sicherstellen, während zugleich das Magnetfeld in Umlaufrichtung um die Spulenachse im wesentlichen homogen ist.

[0011] Die Anzahl der Windungen, mit denen der Leiter im Bereich einer Wicklung die Spulenachse

umläuft, der Abstand der innersten Windung zu der Spulenachse sowie der Abstand benachbarter Wicklungen in axialer Richtung stellen zusätzliche Freiheitsgrade bei der Auslegung der Spule für das supraleitende Magnetlager dar, die eine genaue Modulation des von der Spule erzeugten Magnetfeldes ermöglicht.

[0012] Die Ausbildung des stromführenden Leiters durch einen Typ-2-Supraleiter stellt sicher, dass das Magnetlager im supraleitenden Zustand einen vernachlässigbaren elektrischen Widerstand hat und daher keine bzw. nur sehr kleine elektrische Verluste aufweist. Leiter aus einem Typ-2-supraleitenden Material, wie sie beispielsweise aus der WO 2008/036073 A2, auf deren Inhalt insoweit Bezug genommen wird, grundsätzlich bekannt sind, weisen bei hohen Wicklungszahlen eine hohe Wärmekapazität auf, was insbesondere auch für das supraleitende Magnetlager selbst gilt, das die Spule mit dem radial gewickelten Leiter aus dem Typ-2-supraleitenden Material umfasst. Fällt die Kühlung der Spule bzw. des supraleitenden Magnetlagers insgesamt aus, erwärmt sich die Spule bzw. das supraleitende Magnetlager aufgrund der hohen Wärmekapazität nur mit einer langen Zeitkonstanten, so dass geeignete Maßnahmen zur Sicherung des Lagers getroffen werden können, im Gegensatz zu dem Fall einer normalleitenden Spule bzw. einer nicht gewickelten, sondern spiralförmig fortschreitenden Leiterspule, wo bei Ausfall des Stromes die Haltekraft des Lagers kurzfristig abfällt.

[0013] Aufgrund des hohen Magnetfeldes der Spule im Bereich der Wicklung lässt sich das Lager kurzfristig ansteuern und erreicht mit einem nur geringen Steuerstrom hohe Halte- bzw. Rückstellkräfte. Damit lässt sich die Steifigkeit des supraleitenden Magnetlagers mit einem nur geringen Steuerstrom sehr schnell auf einen hohen Wert einstellen bzw. nachführen. Weiter kann die Position des Rotors, an dem das Korpus mit dem Typ-2-Supraleiter, in dessen Magnetfeld die Vortizes ausgebildet sind, relativ zu dem Stator, an dem die Spule mit der abschnittsweise vorgesehenen Wicklung angeordnet ist, genau einstellen, was insbesondere bei der Inbetriebnahme des supraleitenden Magnetlagers vorteilhaft ist. Die Spule mit der abschnittsweise vorgesehenen Wicklung des stromführenden Leiters bietet weiter die Möglichkeit einer Notabschaltung des Magnetlagers durch ein einfaches Abschalten der Spule.

[0014] Vorzugsweise ist vorgesehen, dass die Wicklung eine erste Teilwicklung und eine zweite, mit der ersten Teilwicklung elektrisch leitend verbundene und axial beabstandete Teilwicklung umfasst. Die beiden Teilwicklungen können gleichsinnig gewickelt sein, so dass die resultierenden Magnetfelder in die gleiche Richtung weisen, oder gegensinnig gewickelt sein, so dass die resultierenden Magnetfelder in ent-

gegengesetzte Richtungen weisen, insbesondere antiparallel orientiert sind. In letzterem Fall entsteht ein starker Gradient in axialer und radialer Richtung, speziell dann, wenn die erste Teilwicklung und die zweite Teilwicklung axial unmittelbar benachbart sind. Unabhängig von Wicklungssinn bietet sich der Vorteil, die Zuleitung des Stromes in die erste Teilwicklung und die Ableitung des Stromes aus der zweiten Teilwicklung an der gleichen Seite, bezogen auf die Spulenachse, ausbilden zu können, so dass eine Durchführung der Stromzuleitung durch die Wicklungen der Spule hindurch vermeidbar wird.

[0015] Vorzugsweise ist vorgesehen, dass Flussleitelemente vorgesehen sind. Flussleitelemente umfassen dabei ringförmige Teile aus einem metallischen, magnetisierbaren Material, wobei die ringförmigen Teile konzentrisch zu der Spulenachse entweder zwischen axial benachbarten Wicklungen bzw. Teilwicklungen angeordnet sind, oder Abschnitte begrenzen, in denen mehrere Wicklungen bzw. Teilwicklungen unmittelbar axial benachbart sind. Die Flussleitelemente führen das von der Spule erzeugte Magnetfeld in insbesondere radialer Richtung und ermöglichen der Spule insbesondere im Bereich der bezogen auf die Spulenachse innersten Wicklung einen Abstand zu dem Korpus mit dem Typ-2-Supraleitermaterial einzuhalten. Eine Ausgestaltung der Spule mit Wicklungen, ohne Flussleitelemente, ermöglicht zwar die Ausbildung eines starken Magnetfeldes, das allerdings in radialer Richtung stark abfällt, so dass in diesem Fall die Spule mit der bezogen auf die Spulenachse innersten Wicklung nahe an das Korpus mit dem Typ-2-Supraleitermaterial heranreichen muss. Als Material für die Flussleitelemente, die auch als Abstandhalter für die Wicklungen bzw. Teilwicklungen der Spule in radialer bzw. axialer Richtung vorgesehen sind, kommt Eisen, eine Eisen-Kobalt-Legierung oder ein anderes ferromagnetisches, also magnetisierbares Material, in Frage. Die axiale und/oder radiale Erstreckung eines Flussleitelementes kann so gestaltet werden, dass die Ausbildung eines Gradienten des Magnetfeldes der Spule in axialer und/oder radialen Richtung verstärkt wird.

[0016] Vorzugsweise ist vorgesehen, dass der Leiter als Band ausgebildet ist. Bei der Wicklung liegen die flachen Seiten des Bandes aneinander an, so dass die Ausbildung einer hohen Anzahl von Wicklungen auf einem radial begrenzten Raum leicht möglich ist.

[0017] Vorzugsweise ist vorgesehen, dass die Spule zu einer axialen Mittelebene symmetrisch ist. Hierbei entsteht ein nur geringes Streufeld, das die Spule in axialer Richtung verlässt, wobei sich das Magnetfeld im wesentlichen in dem von der Spule umschlossenen Bereich konzentriert. Eine bezogen auf die axiale Mittelebene symmetrisch ausgebildete Spule lässt sich beispielsweise dadurch erreichen, dass

eine gerade Anzahl von vorgesehen ist, die in einem gleichen axialen Abstand so angeordnet sind, dass die Magnetfelder zweier axial benachbarter Wicklungen entgegengerichtet sind. Ist dagegen ein starker Gradient des Magnetfeldes erforderlich, kann alternativ hierzu vorzugsweise vorgesehen sein, dass die Spule zu der axialen Mittelebene im wesentlichen asymmetrisch ausgebildet ist.

[0018] Vorzugsweise ist vorgesehen, dass die Spule bei der Sprungtemperatur des Typ-2-Supraleiters normaleitende Anschlüsse aufweist. Die Anschlüsse können mit einer nur gering wärmeleitenden Stromdurchführung zu einer außerhalb eines Kühlmantels der Spule angeordneten Stromversorgung in Verbindung stehen, so dass nur ein geringer Wärmeeintrag in die Spule resultiert.

[0019] Vorzugsweise ist vorgesehen, dass die Spule bei der Sprungtemperatur des Typ-2-Supraleiters supraleitende Anschlüsse aufweist. Die supraleitenden Anschlüsse können mit einer Stromdurchführung in Verbindung stehen, die ebenfalls supraleitend ist, so dass die Stromversorgung nur einen minimalen Verbrauch an elektrischer Energie erforderlich macht.

[0020] Vorzugsweise ist vorgesehen, dass die Spule als in sich geschlossene, anschlusslose Schleife ausgebildet ist. Die Spule wird, ggf. durch einen die Spule umgebenden Kühlmantel hindurch, berührungslos mit Strom versorgt, beispielsweise derart, dass in der supraleitenden Spule ein Strom induziert bzw. influenziert wird. Das ist insbesondere dann günstig, wenn die Spule mittels einer supraleitenden Brücke kurzgeschlossen und als im wesentlichen anschlusslose, in sich geschlossene Schleife ausgebildet ist. Hierbei treten nur sehr geringe Kühlverluste im Bereich der Stromdurchführungen auf.

[0021] Unabhängig von der Ausgestaltung der Anschlüsse der Spule als normaleitende oder supraleitende Anschlüsse bzw. der Spule als in sich geschlossene, anschlusslose supraleitende Leiterschleife ist vorzugsweise vorgesehen, dass die Spule eine bei der Sprungtemperatur des Typ-2-Supraleiters supraleitende Brücke aufweist. Mittels dieser supraleitenden Brücke ist ein Kurzschließen der supraleitenden, bestromten Spule möglich. Der in der Spule gespeicherte Strom bleibt dann in der aus supraleitender Spule und supraleitender Brücke gebildete geschlossene Leiterschleife erhalten, ohne dass eine Stromversorgung von außen notwendig ist. Dazu ist die supraleitende Brücke so auszulegen, daß sie von außen, z. B. mittels einer Heizwendel, gezielt über die kritische Temperatur des Supraleiters gebracht werden kann. So ist ein Ein- und Ausschalten der Brücke möglich, um die Spule von außen mit Strom zu beschicken und/oder den Strom in der Spule zu unterbinden.

[0022] Die mittels der supraleitenden Brücke kurzgeschlossene Spule verbraucht im supraleitenden Zustand einen allenfalls sehr geringen Anteil an elektrischer Energie. Die supraleitende Brücke verkürzt dabei die Länge der Spule und schließt dabei einen Bereich der Spule aus, in dem dann eine zusätzliche Kühlung nicht mehr erforderlich ist.

[0023] Weitere Vorteile und Merkmale der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen sowie aus der Beschreibung eines Ausführungsbeispiels.

[0024] Die Erfindung wird im folgenden unter Bezugnahme auf die anliegenden Zeichnungen näher beschrieben und erläutert.

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

[0025] **Fig. 1** zeigt ausschnittsweise eine geschnittene perspektivische Ansicht eines Ausführungsbeispiels einer erfindungsgemäßen Spule, und

[0026] **Fig. 2** zeigt ausschnittsweise eine geschnittene perspektivische Ansicht eines Ausführungsbeispiels eines supraleitenden Magnetlagers mit der Spule aus **Fig. 1**.

Detaillierte Beschreibung der Zeichnung

[0027] **Fig. 1** zeigt abschnittsweise eine Spule für ein supraleitendes Magnetlager. Der dargestellte Abschnitt der Spule **1** weist eine Wicklung **2** auf, die eine erste Teilwicklung **3** und eine zweite, der ersten Teilwicklung **3** in axialer Richtung, also in Richtung der Spulenachse **5**, benachbarte Teilwicklung **4** umfasst.

[0028] Die Spule **1** umfasst einen elektrischen, stromtragenden Leiter **6**, der im Bereich der Wicklung **2**, insbesondere im Bereich der beiden Teilwicklungen **3**, **4** derart um die Spulenachse **5** gewunden ist, dass der Leiter **6** sich radial von der Spulenachse **5** bewegt, allerdings in Richtung der Spulenachse **5**, also in axialer Richtung, nicht fortschreitet.

[0029] Der Leiter **6** umfasst ein bandförmiges Material aus einem Typ-2-Supraleiter, der in einer nicht dargestellten Umhüllung aufgenommen ist. Alternativ kann das Band ein Trägermaterial mit einer Beschichtung aus einem Typ-2-Supraleiter umfassen. Das Band des Leiters weist einen im wesentlichen rechteckigen Querschnitt auf, wobei die lange Seite des Bandes auf die Spulenachse **5** und damit auf die benachbarte Lage der Wicklung **2** weist.

[0030] Die beiden Teilwicklungen **3**, **4** sind an der innersten, der Spulenachse **5** zugewandten Lage mittels einer Verbindung **7** elektrisch leitend verbunden, wobei die Verbindung **7** als Bandabschnitt des Leiters **6** ausgestaltet ist, der sich axial, also in Richtung der Spulenachse **5**, um ca. einen halben Umlauf um die

Spulenachse 5 erstreckt.

[0031] Die erste Teilwicklung 3 umfasst eine erste Stromzuführung 8, an der der Strom in der Spule 5 in den Bereich der Wicklung 2 eintritt, und eine zweite Stromzuführung 9, an der der in der Wicklung 2 geführte Strom die Wicklung 2 verlässt. Die beiden Stromzuführungen 8, 9 stellen die elektrische leitende Verbindung mit den übrigen Abschnitten der Spule 5 her.

[0032] Die beiden Stromzuführungen 8, 9 sind an der bezogen auf die Spulenachse 5 radial äußeren Lage der beiden Teilwicklungen 3, 4 angeordnet, während die die beiden Teilwicklungen 3, 4 verbindende Verbindung 7 an der bezogen auf die Spulenachse 5 inneren Lage der Wicklung 2 angeordnet ist. Es ist damit möglich, die Kontaktierung für den Strom bezogen auf die Spulenachse 5 radial außen an die Wicklung 2 auszugestalten, so dass ein Hindurchführen einer Kontaktierung durch den Bereich der beiden Teilwicklungen 3, 4 vermeidbar ist.

[0033] Der Wickelsinn beider Teilwicklungen 3, 4 ist so gewählt, dass beide Teilwicklungen 3, 4 ein Magnetfeld von gleicher Orientierung, etwa in Richtung des Pfeils 10 auf der Spulenachse 5 für den Fall der ersten Teilwicklung 3, bereitstellen. In einer Blickrichtung entlang der Spulenachse 5 ist hierzu der Leiter 6 im Bereich beider Teilwicklungen 3, 4 jeweils im Uhrzeigersinn um die Spulenachse 5 gewickelt.

[0034] Es versteht sich, dass der Wickelsinn beider Teilwicklungen 3, 4 auf gegenläufig gewählt sein kann, so dass die erste Teilwicklung 3 ein Magnetfeld liefert, das antiparallel zu dem von der zweiten Teilwicklung 4 gelieferten Magnetfeld orientiert ist. In diesem Fall ist der Leiter 6 im Bereich der ersten Teilwicklung 3 im Uhrzeigersinn und im Bereich der zweiten Teilwicklung 4 im Gegenuhrzeigersinn um die Spulenachse 5 gewickelt.

[0035] Fig. 1 stellt den Abschnitt der Spule 1 dar, der im Bereich der Wicklung 2 ca. elfmal um die Spulenachse 5 gewunden ist. In der Praxis ist eine höhere Anzahl von Windungen um die Spulenachse 5 vorgesehen, beispielsweise umläuft der Leiter 6 die Spulenachse 5 im Bereich der beiden Teilwicklungen 3, 4 ca. 280-mal.

[0036] Fig. 2 zeigt ein supraleitendes Magnetlager mit der Spule 1, die an einem Stator 11 des Magnetlagers befestigt ist. Die Spule 1 umfasst sechs axial, also in Richtung der Spulenachse 5, beabstandete Wicklungen 2, deren erste in Fig. 1 näher dargestellt ist. Der ersten Wicklung 2 folgt in axialer Richtung eine zweite Wicklung 12 und eine dritte Wicklung 13. Die Spule 1 ist bezogen auf eine axiale Mittelebene 14 symmetrisch ausgebildet. Das von der ersten Wicklung 2 und der dritten Wicklung 13 bereitgestell-

te Magnetfeld ist parallel, das von der zweiten Wicklung 12 bereitgestellte Magnetfeld hierzu antiparallel ausgerichtet. Jede der sechs dargestellten Wicklungen 2, 12, 13 umfasst zwei Teilwicklungen, wie sie für die erste Wicklung 2 in Fig. 1 beispielhaft dargestellt und erläutert wurde. Was die Anzahl der Windungen um die Spulenachse 5 jeder Wicklung, die Breite des bandförmigen Leiters 6 sowie der Abstand der inneren bzw. äußeren Lager einer jeden Wicklung betrifft, sind die sechs Wicklungen 2, 12, 13 vergleichbar ausgebildet.

[0037] Zwischen je zwei benachbarten Wicklungen 2, 12 bzw. 12, 13 ist ein Flussleitelement 15 angeordnet, das als im wesentlichen ringförmige Scheibe aus einem magnetisierbaren, insbesondere ferromagnetischen Metall wie Eisen oder einer Eisen-Kobalt-Legierung, ausgebildet ist, wobei nur eines der sieben im wesentlichen gleichartigen Flussleitelemente mit dem Bezugszeichen ausgewiesen ist.

[0038] Die Spule 1 ist an dem Stator 11 innerhalb eines Gehäuses 16 aufgenommen, innerhalb dessen sich ein Kühlmantel 17 aus Aluminium oder Kupfer zur gleichmäßigen Wärmeverteilung befindet, innerhalb derer die Spule 1 angeordnet ist. Die Spule 1 ist mittels eines inneren Isoliermantels 24 radial nach innen, bezogen auf die Spulenachse 5, thermisch isoliert.

[0039] Das supraleitende Magnetlager umfasst neben dem Stator 11 einen Rotor 18, der eine Hohlwelle 19 umfasst, an deren äußerer Mantelfläche ein Korpus 20 aus einem Typ-2-Supraleiter, insbesondere aus einem Seltenerd-Barium-Kupferoxid (REBCO, Rare Earth Barium Copper Oxide) angeordnet ist. Zur thermischen Abschirmung ist radial unmittelbar über dem Korpus 20 ein äußerer Isoliermantel 23 angeordnet.

[0040] Die Hohlwelle 19 ist an der zu lagernden, nicht dargestellten Welle drehfest verbunden, ebenso wie das Gehäuse 16, das den Stator 11 mit der Spule 1 umgibt, an der nicht dargestellten Lageraufnahme für die Welle drehfest angeordnet ist. Der Stator 11 und der Rotor 18 sind derart aufeinander bezogen ausgerichtet, dass das Korpus 20 im Bereich des von der Spule 1 erzeugten Magnetfeldes angeordnet ist.

[0041] Die Hohlwelle 19 weist eine Zuleitung 21 auf, in der ein Kühlmedium, insbesondere flüssiger Stickstoff, vorzugsweise unterkühlter flüssiger Stickstoff, eingeführt werden kann, um das Typ-2-supraleitende Material des Korpus 20 unter dessen Sprungtemperatur kühlen und damit in den supraleitenden Zustand verbringen zu können. Die Spule 1 in dem Stator 11 wird mittels eines Kaltkopfes 22 eines nicht näher dargestellten Kryokühlers gekühlt, wobei der Kaltkopf 22 außen an einem Kühlmantel 17 thermisch leitend

anliegt.

[0042] Der Rotor **18** und der Stator **11** weisen damit jeder für sich ein eigenes Kühlungssystem auf, wobei der Rotor **18** und der Stator **11** in einem eigenen Kühlgefäß angeordnet sind.

[0043] Es versteht sich, dass der Stator **11** mit der Spule **1** auch in einer Badkühlung mit beispielsweise flüssigen Stickstoff, insbesondere mit unterkühlten flüssigen Stickstoff, angeordnet sein kann. Es versteht sich weiter, dass für den Rotor **18** eine weitere, außerhalb des supraleitenden Magnetlagers angeordnete Vorkühlstufe vorgesehen sein kann, beispielsweise mit flüssigen Stickstoff bzw. mit Trockeneis als Kühlmedium.

[0044] Anstelle der dargestellten Kühlung des Rotors **18** mit einem flüssigen Kühlmedium wie Stickstoff, das in die Hohlwelle **19** eingeführt wird, kann die Kühlung mittels eines Maschinenkühlers erfolgen; speziell kann ein von einer Kältemaschine verflüssigtes Medium über eine Drehverbindung durch eine Siphonanordnung in den Rotor **18** eingeführt werden, oder als Alternative hierzu, kann die Kältemaschine in den Rotor **18** baulich aufgenommen sein.

[0045] Alternativ oder ergänzend zu den vorgenannten Varianten der Kühlung des Rotors **18** kann eine Strahlungskühlung erfolgen, bei der der Rotor **18** in der Montagestellung in der zuvor abgekühlten Anordnung des Stators **11** gehalten wird, bis sich ein thermisches Strahlungsgleichgewicht zwischen dem Kühlmantel **17** des Stators **11** und dem Rotor **18** eingestellt hat. In diesem Falle entfallen der innere Isoliermantel **24** der Spule **1** sowie der äußere Isoliermantel **23** des Korpus **20** an dem Rotor **18**, um eine Wärmeübertragung zwischen dem Rotor **18** und dem Stator **11** zu ermöglichen.

[0046] Um eine Kondensation von Luft, insbesondere Luftfeuchtigkeit, zwischen dem Stator **11** und dem Rotor **18** zu verhindern, ist der Spalt mit einem Inertgas zu füllen bzw. alternativ oder ergänzend hierzu eine Dichtung vorzusehen, die als Vakuum-Dichtung oder Ferrofluid-Dichtung ausgestaltet sein kann. Das Inertgas verdrängt die Luft zwischen dem Stator **11** und dem Rotor **18** durch ein Medium, dessen Taupunkt geringer ist als der von Wasserdampf.

[0047] Bei dem vorstehend beschriebenen Ausführungsbeispiel war das Korpus **20** mit dem Typ-2-supraleitenden Material an dem aus Kupfer ausgebildeten Rotor **18** als zusätzliches Bauteil in einer Haltevorrichtung befestigt. Es versteht sich, dass das Typ-2-supraleitende Material an der äußeren Mantelfläche des Rotors **18** auch als Beschichtung ausgebildet sein kann, die unmittelbar auf die Mantelfläche des Rotors **18** aufgebracht ist.

[0048] Bei dem vorstehend beschriebenen Ausführungsbeispiel war die Hohlwelle **19** des Rotors **18** aus Kupfer. Es versteht sich, dass die Hohlwelle **19** aus einem anderen Material ausgebildet sein kann, beispielsweise aus einem glasfaserverstärkten Kunststoff oder einem kohlefaserverstärkten Kunststoff, auf dem ein Zwischenelement aus einem thermisch gut leitfähigen Material wie Kupfer angeordnet ist, wobei in dem Zwischenelement das Korpus **20** aus dem Typ-2-Supraleiter aufgenommen ist.

[0049] Bei dem vorstehend beschriebenen Ausführungsbeispiel war die Spule **1** an dem Stator **11** angeordnet. Es versteht sich, dass die Spule **1** auch an dem Rotor **18** angeordnet sein kann, wobei dann das Korpus **20** mit dem Typ-2-supraleitenden Material an dem Stator **11** angeordnet ist.

[0050] Die Erfindung wurde vorstehend anhand eines Ausführungsbeispiels beschrieben, bei dem Flussleitelemente **15** vorgesehen waren, die als metallische, insbesondere magnetische Ringe ausgebildet waren, um das von der Spule **1** erzeugte Magnetfeld zu modulieren. Es versteht sich, dass anstelle oder ergänzend zu den Flussleitelementen **15** auch eine Zusatzspule vorgesehen sein kann, deren stromtragender Leiter normalleitend oder supraleitend sein kann, wobei die Zusatzspule ein zusätzliches Magnetfeld erzeugt, das sich mit dem von der Spule **1** erzeugten Magnetfeld überlagert, so dass das resultierende Magnetfeld in Umfangsrichtung homogen und in axialer sowie in radialer Richtung den erforderlichen Gradienten aufweist.

Bezugszeichenliste

1	Spule
2	Wicklung
3	erste Teilwicklung
4	zweite Teilwicklung
5	Spulenachse
6	Leiter
7	Verbindung
8	erste Stromzuführung
9	zweite Stromzuführung
10	Pfeil Magnetfeld
11	Stator
12	zweite Wicklung
13	dritte Wicklung
14	axiale Mittenebene
15	Flussleitelement
16	Gehäuse
17	Kühlmantel
18	Rotor
19	Hohlwelle
20	Korpus
21	Zuleitung
22	Kaltkopf
23	äußerer Isoliermantel
24	innerer Isoliermantel

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

- JP 01141222 AA **[0005]**
- WO 2008/036073 A2 **[0012]**

Zitierte Nicht-Patentliteratur

- ‚Force Density of Magnetic Bearings Using Superconducting Coils and Bulk Superconductors‘ von K. Nagashima et al., QR of RTRI, vol. 49, No. 2 (May 2008), S. 127 bis 132 **[0006]**
- ab S. 132 unter ‚3.2 Configuration of the superconducting coil‘ **[0006]**

Patentansprüche

1. Spule (1) für ein supraleitendes Magnetlager, umfassend einen stromtragenden Leiter (6) aus einem supraleitenden Material, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Leiter (6) abschnittsweise als sich im wesentlichen radial erstreckende, die Spulenachse (5) umlaufende Wicklung (2) ausgebildet ist.

2. Spule nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Wicklung (2) eine erste Teilwicklung (3) und eine zweite, mit der ersten Teilwicklung (3) elektrisch leitend verbundene und axial beabstandete Teilwicklung (4) umfasst.

3. Spule nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die erste Teilwicklung (3) und die zweite Teilwicklung (4) axial unmittelbar benachbart sind.

4. Spule nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass Flussleitelemente (15) vorgesehen sind.

5. Spule nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass der Leiter (6) als Band ausgebildet ist.

6. Spule nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Spule zu einer axialen Mittelebene (14) symmetrisch ist.

7. Spule nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Spule bei der Sprungtemperatur des Typ-2-Supraleiters normalleitende Anschlüsse aufweist.

8. Spule nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Spule bei der Sprungtemperatur des Typ-2-Supraleiters supraleitende Anschlüsse aufweist.

9. Spule nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Spule als in sich geschlossene, anschlusslose Schleife ausgebildet ist.

10. Spule nach Anspruch 7, 8 oder 9, dadurch gekennzeichnet, dass die Spule eine bei der Sprungtemperatur des Typ-2-Supraleiters supraleitende Brücke aufweist.

11. Supraleitendes Magnetlager, umfassend eine Spule (1) nach einem der Ansprüche 1 bis 10.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

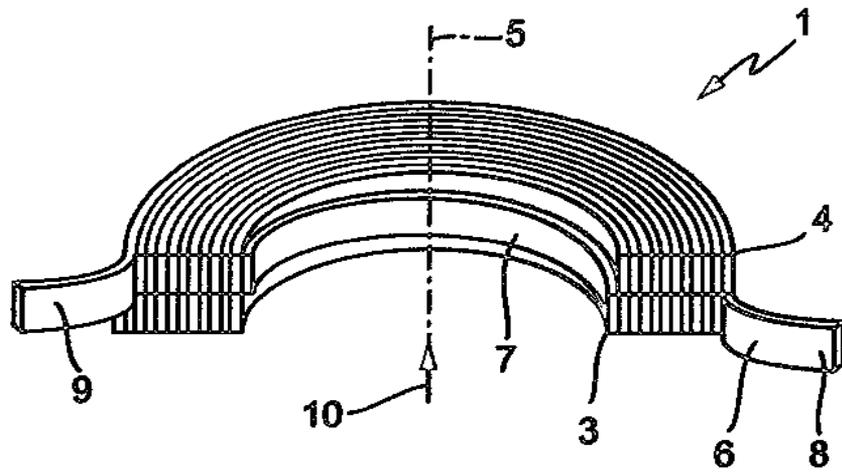


Fig. 1

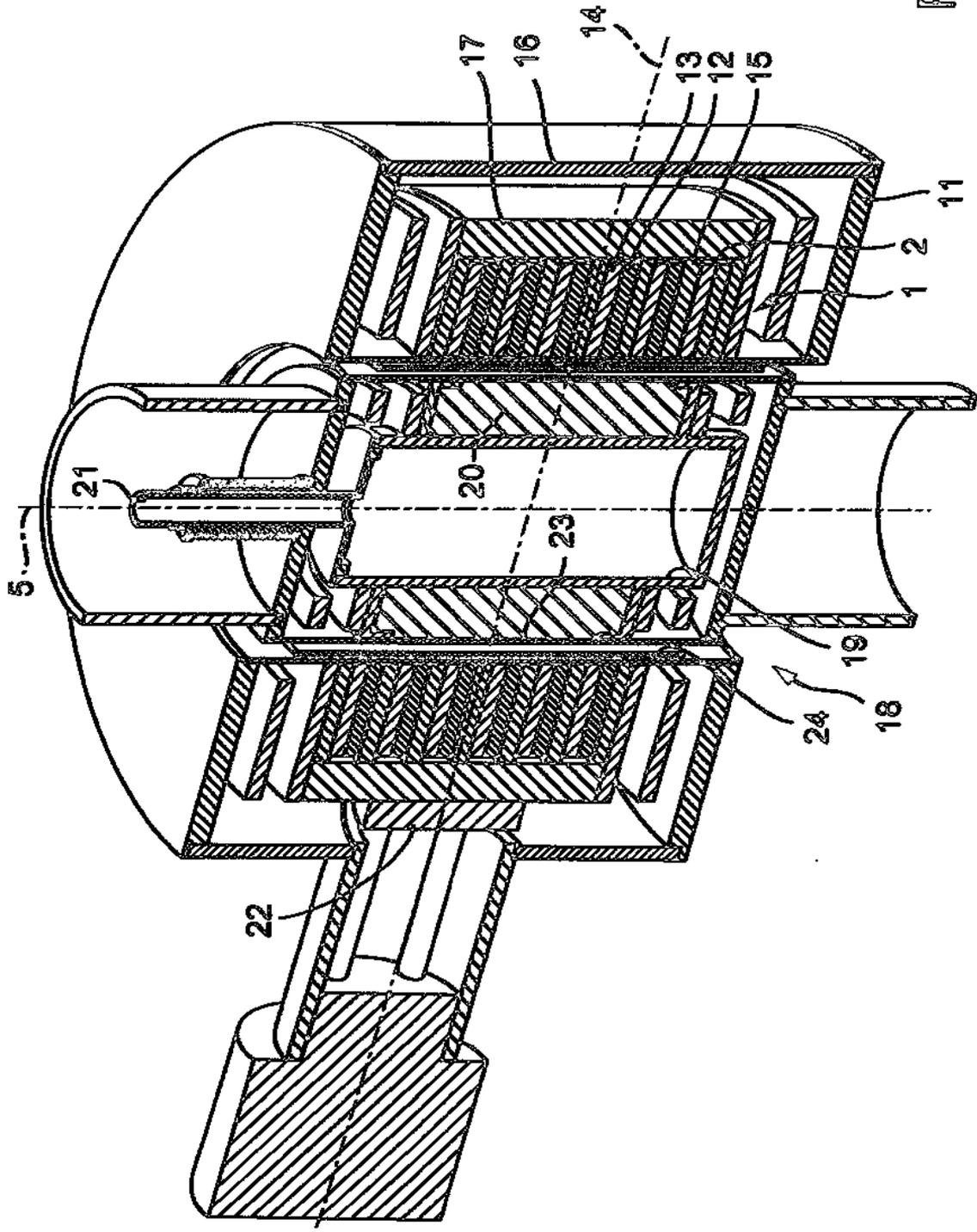


Fig. 2