



19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

12 Patentschrift
10 DE 198 47 347 C 2

51 Int. Cl. 7:
F 16 C 32/04
H 02 K 7/09

21 Aktenzeichen: 198 47 347.8-51
22 Anmeldetag: 14. 10. 1998
43 Offenlegungstag: 4. 5. 2000
46 Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 29. 3. 2001

DE 198 47 347 C 2

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

73 Patentinhaber:
LDT GmbH & Co. Laser-Display-Technologie KG,
07548 Gera, DE
74 Vertreter:
Dr. Werner Geyer, Klaus Fehners & Partner, 80687
München

72 Erfinder:
Werfel, Frank, Dr., 04277 Leipzig, DE; Deter,
Christhard, 07548 Gera, DE

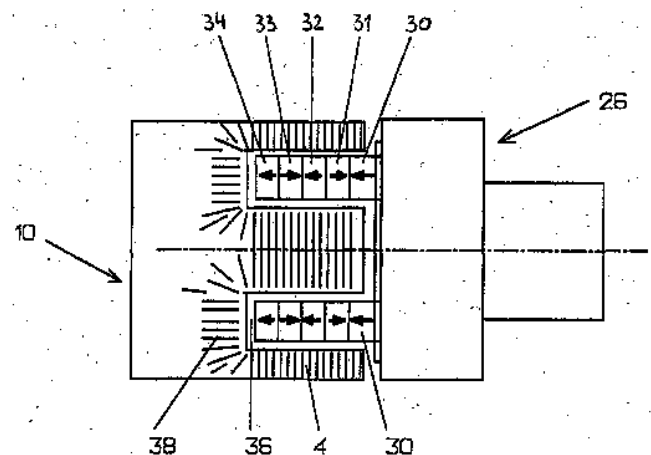
66 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

DE	44 36 831 A1
US	57 89 837
US	55 40 116
US	54 57 086
US	51 96 748
US	51 17 387
US	49 56 571
US	49 39 120
US	48 92 863

F.N. Werfel et al.: "YBaCuO Large Scale Melt
Texturing in a Temperatur Gradient", In:
Inst. Phys.Conf.Ser.No. 158 IOP Publishing Ltd.
1997, S. 821-824;

54 Magnetlager

57 Magnetlager, bei dem ein erstes Teil (1, 20) eine Magnetkonfiguration (1, 6, 7, 8; 11, 12, 14; 30, 31, 32, 34; 50, 51, 52, 53) aufweist, die zumindest in Teilbereichen permanentmagnetische Eigenschaften hat und gegenüber einem zweiten Teil (3, 10) magnetisch gelagert ist, das ein supraleitendes Material II. Art unter dessen kritischer Temperatur enthält, wobei das supraleitende Material ein schmelztexturiertes Vielkornmaterial mit kristallinen Körnern ist, deren stromtragende, kristalline a-b-Ebenen mit ihren Normalen auf das erste Teil (1, 20) weisen dadurch gekennzeichnet, daß das supraleitende Material eine Verbindung $X_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{(7-\delta)}$ mit $1 \leq x \leq 1,6$, X ein Seltenerdmetall aus der Gruppe Y, Sm, Nd, Tb und $0,01 \leq \delta \leq 0,1$ enthält oder daraus besteht.



DE 198 47 347 C 2

Die Erfindung bezieht sich auf ein Magnetlager, bei dem ein erstes Teil eine Magnetkonfiguration aufweist, die zumindest in Teilbereichen permanentmagnetische Eigenschaften hat und gegenüber einem zweiten Teil magnetisch gelagert ist, das ein supraleitendes Material II. Art unter dessen kritischer Temperatur enthält, wobei das supraleitende Material ein schmelztexturiertes Vielkornmaterial mit kristallinen Körnern ist, deren stromtragende, kristalline a-b Ebenen mit ihren Normalen auf das erste Teil weisen.

Die Projektion von Videobildern mit Hilfe von Lichtstrahlen, insbesondere Laserstrahlen, ist eine technisch anspruchsvolle Aufgabe, die bisher noch nicht in allen Details befriedigt gelöst werden konnte. So müssen einzelne Komponenten kostengünstiger werden, beispielsweise indem sie mit geringerem Aufwand als bisher gefertigt werden können.

Zur Projektion wird ein paralleles Lichtbündel, ein Lichtstrahl oder Laserstrahl jeweils mit der Bild- und Farbinformation von verschiedenen Bildpunkten eines Videobildes beaufschlagt. Diese Bildpunkte werden mit Hilfe des Lichtbündels sequentiell, analog zur üblichen Erzeugung von Videobildern mit Elektronenröhren, auf einem Schirm dargestellt. Die erforderliche Ablenkgeschwindigkeit für das Lichtbündel ist aufgrund der großen Anzahl von Bildpunkten, die bei zukünftigen Fernsehnormen noch weiter steigen wird, außerordentlich hoch.

Für die Zeilenablenkung verwendet man häufig einen sich schnell drehenden Polygonspiegel, dessen Drehzahl multipliziert mit der Anzahl der Polygonseiten die Anzahl der Bildpunkte ergibt, die pro Zeiteinheit dargestellt werden kann. Für übliche Fernsehnormen benötigt man deshalb Drehzahlen von weit über 100.000 Umdrehungen pro Minute.

Bei derart hohen Drehzahlen ist es günstig, wenn der Polygonspiegel möglichst reibungsfrei gelagert ist. Dazu sind aus dem Stand der Technik Gaslager oder Magnetlager bekannt.

Unter den verschiedenen Arten bekannter Magnetlager sind insbesondere supraleitende Magnetlager interessant, in denen magnetische Felder ohne elektrische Leistung aufrecht erhalten werden können. Insbesondere läßt die Verankerung des Magnetfeldes, nämlich das Schweben eines Magneten über einem Supraleiter, ähnlich dem bekannten Meißner-Ochsenfeld-Effekt, eine überraschend einfache Konstruktion von Magnetlagern zu.

Durch die Entwicklung von hochtemperatur-supraleitenden Materialien ist der Betrieb von derartigen Magnetlagern bei Temperaturen des flüssigen Stickstoffes möglich geworden, wodurch der Aufwand gegenüber den herkömmlichen Supraleitern, die eine Kühlung mit flüssigem Helium erforderten, wesentlich verringert wurde. Im folgenden wird für den Ausdruck "hochtemperatur-supraleitend" nur noch "supraleitend" verwendet.

Aus der US 4 956 571 ist ein supraleitendes Magnetlager in Konusform bekannt. Ein supraleitendes Material, das $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ aufweist, bildet ein konusförmiges Statorteil, mit dem ein ebenfalls konusförmiges, Dauermagnete aufweisendes Rotorteil korrespondiert. Das Statorteil erhält einen Flüssigkeitsbehälter für den als Kühlmedium verwendeten flüssigen Stickstoff.

Die US 5 540 116 zeigt und beschreibt ein supraleitendes Lager, bei dem ein Ring, eine Kappe oder eine Scheibe den magnetischen Widerstand zur Erhöhung der Kräfte beim freien Schweben reduziert. Zur Wahl des Supraleitermaterials wird keine Angabe gemacht.

In der US 5 177 387 ist ein supraleitendes Magnetlager

offenbart, das radial verteilt angeordnete Permanentmagnete aufweist. Jeweils zusammengehörige Permanentmagnete einer Lagerstelle sind gegenpolig angeordnet und korrespondieren mit $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ aufweisenden supraleitenden Materialteilen. Die Polung der Permanentmagnete ist dabei axial ausgerichtet.

Aus der US 4 939 120 ist ein supraleitendes Magnetlager bekannt, dessen Permanentmagnetpole an den Enden eines Stabes liegen. Nahe dessen Enden ist jeweils ein Teil aus supraleitendem Material vorgesehen. Zum Antrieb werden zusätzliche Magnete eingesetzt, die mit feststehenden Antriebspulen zusammenwirken. Das Supraleitermaterial weist $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ auf.

In der US 5 196 748 ist ein supraleitendes Magnetlager beschrieben, bei dem ringförmige permanentmagnetische Scheiben auf einer Welle gleichpolig geschichtet angeordnet sind. Dabei ist die Welle die Lagerachse und die permanentmagnetischen Scheiben sind in axialer Richtung magnetisiert. Zwischen den Permanentmagnetringen sind Lagen aus einem hochpermeablen Metall angeordnet, z. B. aus bekanntem Mu-Metall, durch welches die magnetischen Feldlinien geführt werden. Mit Hilfe dieses Metalls kann die Steifigkeit des Lagers gegenüber den vorgenannten Lösungen etwas erhöht werden. Ferner ist in dieser Druckschrift auch ein Lager beschrieben, welches die Anordnung der Permanentmagnete und der hochpermeablen Lagen in radialer Ausrichtung zeigt. Für das Supraleitermaterial wird $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7x}$ erwähnt.

Aus der US 5 789 837 ist ein Magnetlager bekannt, bei dem ein Rotor durch mehrere Spulen mit jeweils einer Windung aus einem supraleitenden Material gehalten wird. Jede Windung des supraleitenden Materials besteht aus einem schmelztexturierten Vollmaterial, bei dem die stromtragenden a-b-Ebenen jedes kristallinen Ringes mit der Ringfläche identisch sind, so daß der Strom im supraleitenden Ring in einem kurzgeschlossenen Kreis fließt und das durch diesen Strom induzierte magnetische Feld entlang der Ringachse ausgerichtet ist.

US 4 892 863 beschreibt einen magnetgelagerten Gleichspannungsmotor mit Steuerung. Im Magnetlager ist ein $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ Sintermaterial eingesetzt, das schmelztexturiert ist.

US 5 457 089 beschreibt ein supraleitendes Material, das als Verbundwerkstoff aus schmelztexturierten $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ -Teilchen und Permanentmagnetgranulat in einem Magnetfeld unter Druck geformt wird. Aus dieser Druckschrift ist weiter bekannt, dieses Supraleitermaterial für ein Magnetlager einzusetzen, bei dem ein axial polarisierter, scheibenförmiger Magnet auf einer zu lagernden Welle sitzt und zwischen dem Supraleitermaterial angeordnet ist.

In dem Artikel "YBaCuO Large Scale Melt Texturing in a Temperature Gradient" von F. N. Werfel, U. Flögel-Delor, D. Wippich, Inst. Phys. Conf. Ser. No. 158 IOP Publishing Ltd, 1997, Seiten 821 bis 824, wird ein kristallines $\text{Y}_{1,4-1,6}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-8}$ enthaltendes Material beschrieben, dessen Kristallorientierung aufgrund seines anisotropen physikalischen Verhaltens sich bei der Herstellung mit einem speziellen Temperaturverfahren ausrichten läßt. Dieses Material ist in seinen supraleitenden und kryomagnetischen Eigenschaften anisotrop, wobei die supraleitenden Ströme vorwiegend in parallelen CuO-Ebenen fließen. In dieser Publikation ist weiter angegeben, daß mit Hilfe dieses Materials versuchsweise ein Magnetlager aufgebaut wurde. Details über dieses Magnetlager sind allerdings nicht aufgeführt.

In der DE-OS 44 36 831, von der im Oberbegriff des Anspruchs 1 ausgegangen wurde, ist ein Radial-Magnetlager beschrieben, bei dem auf der zu lagernden Welle gegenpolig Permanentmagnetringe gestapelt sind. Dazwischen liegen

ferromagnetische Zwischenringe. Diesen Rotorkörper umgibt eine supraleitende Struktur, die aus einem $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ enthaltenden polykristallinen Hochtemperatur-Supraleiter aufgebaut ist. Die Kristallkörner liegen dabei mit ihren kristallinen a-b-Ebenen im wesentlichen parallel zur Außenfläche des Rotorkörpers. Der supraleitende Stator ist aus Einzelementen zusammengeklebt.

Wie aus den obigen Beispielen deutlich wird, gibt es für Magnetlager die verschiedensten Magnetfeldkonfigurationen mit Permanentmagneten. Als Größen für eine Lageroptimierung, beispielsweise zum Ansteuern von Polygonspiegeln, werden erstens die Tragfähigkeit, also im wesentlichen die Kraft zur Halterung, beispielsweise eines Rotors in einem Motor über einem Stator aus supraleitendem Material, zweitens die erreichbare Steifigkeit, d. h. das Maß der auf den Rotor wirkenden Rückstellkräfte, wenn die Rotationsachse aus ihrer Ruhelage gerät, und drittens die Lagerdämpfung, die im wesentlichen die Rückstellzeit bei Ausweichung aus der optimal rotationssymmetrischer Konfigurationen bestimmt und die genügend groß sein sollte, um beim Rückstellen ein Schwingen um die Rotationsachse zu vermeiden, angesehen.

Aufgabe der Erfindung ist es, ein Magnetlager zu schaffen, das einfach herstellbar ist und eine hohe Tragfähigkeit besitzt, die insbesondere auch so hoch ist, daß sich Steifigkeit und Lagerdämpfungen in einfacher Weise optimieren lassen.

Die Aufgabe wird ausgehend vom eingangs genannten Stand der Technik dadurch gelöst, daß das supraleitende Material eine Verbindung $\text{X}_x\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{(7-\delta)}$ mit $1 \leq x \leq 1,6$, X ein Seltenerdmetall aus der Gruppe Y, Sm, Nd, Tb und $0,01 \leq \delta \leq 0,1$ enthält oder daraus besteht.

Diese Materialauswahl, bei der der Strom vorwiegend in bestimmten Raumrichtungen fließt, ist nicht selbstverständlich. Daß sich eine höhere Tragfähigkeit ergibt, war a priori völlig unerwartet, da bei derartigen Materialien ein Freiheitsgrad, nämlich die Normalenrichtung auf den stromtragenden Ebenen, gegenüber anderen isotropen Materialien mit drei Freiheitsgraden für den Stromtransport nicht zur Verfügung steht. Das verwendete Material ist bei der Fertigung der eingesetzten supraleitenden Komponenten bezüglich der Ausrichtungen der Kristalle gemäß der gewünschten Richtung außerordentlich vorteilhaft, da das aus dem Werfel-Artikel bekannte Temperaturverfahren zur Ausrichtung in einfacher Weise anwendbar ist, so daß die erforderliche Ausrichtung der Kristalle unproblematisch ist.

Kornmaterial läßt sich industriell und wirtschaftlich herstellen. Selbst komplizierte geometrische Körper, wie die Ringe und Zylinder für die Magnetlager, können in einem Stück gezüchtet werden. Die Kornstruktur hat weiter den Vorteil, daß man die Lagerdämpfung über das Verhältnis Korngröße zur Anzahl der Korngrenzen gezielt einstellen kann.

Die erfindungsgemäße chemische Zusammensetzung $\text{X}_{1-1,6}\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6,90-6,99}$ erzeugt direkt die bevorzugten hohen, für die Praxis so vorteilhaften Verankerungskräfte für einen magnetischen Fluß. Der angegebene Sauerstoffwert zwischen 6,90 und 6,99 führt weiter zu einer überraschenden Eigenschaft des Supraleiters. Es zeigt sich, daß die supraleitende Sprungtemperatur unterhalb der spezifizierten Grenze von 6,90 deutlich abfällt. Ein Wert von 7 ist dagegen nur mit sehr großem technischen Aufwand zu erreichen.

Ein weiterer überraschender Vorteil der Formulierung des Supraleitermaterials liegt im Phasengefüge. Das erfindungsgemäße Material hat nun überraschenderweise 3 Phasen, nämlich zusätzlich zur Y123- und Y211- auch noch eine CuO-Phase. Im beanspruchten Material findet sich also eine Nebenphase, die erst durch die Spezifikation des Y-Gehaltes

in Kombination mit dem O-Gehalt erreicht wird. Diese überraschende Nebenphase führt zu einem stärkeren Magnetfeld-Pinning und damit zu einer höheren Lagerdämpfung, trägt also bedeutend zur Lösung der Aufgabe bei.

Zusätzlich zeigte sich weiter, daß das hier spezifizierte Material auch besser herstellbar ist, da es mittels einer anderen Züchtungsroute gewonnen werden kann, die erstaunlicherweise stabiler gegenüber Züchtungsparameterschwankungen und Verlusten der Flüssigphase ist. Das beanspruchte Material ist somit überraschenderweise vorteilhaft durch eine stabile Prozeßroute und durch einen sehr viel größeren Arbeitsbereich des Prozesses (Temperatur, Zusammensetzung, Schmelzverluste), wodurch eine industrielle Herstellung des beanspruchten Materials ermöglicht wird.

Dieses Material erlaubt es, daß ein Polygonspiegel zum Rastern von Lichtbündeln zur Darstellung von Videobildern mit hoher Drehzahl und großer Stabilität betrieben werden können.

Die Tragfähigkeit ist insbesondere bei einer bevorzugten Ausbildung als Drehlager erhöht, die dadurch gekennzeichnet ist, daß die Konfiguration mehrere längs einer die Drehachse darstellenden Achse aufgereichte Magnete aufweist, bei der jeweils ein Magnet bezüglich des in der Reihe nachfolgenden Magneten gegengepolt ist, und daß die Normalen der stromtragenden Ebenen zu dieser Achse weisen, wobei zwischen dem ersten und dem zweiten Teil ein Abstand größer als 0,1 mm vorgesehen ist.

Bekanntlich ist Supraleitung nur unterhalb einer kritischen Magnetfeldstärke möglich. Die Gegenpolung zweier Magnete erhöht das gesamte auf den Supraleiter wirkende Magnetfeld um nahezu den Faktor 2, mit der weiteren Konsequenz, daß der aus den Stoßstellen der Magnete radial austretende Magnetfluß im wesentlichen in Richtung der Normalen der stromtragenden Ebenen verläuft.

Mit der Untergrenze von 0,1 mm werden die Magnetanordnung und das supraleitende Material sicher entkoppelt. Unerwarteterweise tritt bei Abständen größer als 0,1 mm noch ein ausgeprägter Schwebeeffekt auf. Ein deutlicher Schwebeeffekt ließ sich bei Versuchen sogar bis zu Abständen von 4 cm beobachten.

Eine andere vorteilhafte Ausbildung der Erfindung ist dadurch gekennzeichnet, daß die Magnetkonfiguration ein scheibenförmiger Permanentmagnet mit axialer Polarisierung ist und zwei Scheiben aus supraleitendem Material spiegelbildlich zum Permanentmagneten angeordnet sind.

Ein guter Kompromiß zwischen der erreichbaren Tragfähigkeit, Steifigkeit und Dämpfung ergibt sich gemäß einer bevorzugten Weiterbildung der Erfindung dadurch, daß der minimale Abstand zwischen erstem und zweiten Teil einen Wert zwischen 1 mm und 10 mm und insbesondere zwischen 2 mm und 7 mm hat. Unerwarteterweise hat sich herausgestellt, daß die angegebenen Grenzen praktisch unabhängig von den gewählten Materialien und sonstigen Abmessungen eines Lagers, insbesondere mit solchen Abmessungen, wie sie zum Antrieb rotierender Polygonspiegel besonders günstig sind, gelten.

Zum Antrieb des genannten Polygonspiegels ist es gemäß einer bevorzugten Weiterbildung günstig, das erste Teil als Rotor und das zweite Teil als Stator eines elektrischen Motors auszubilden.

Die Dämpfung und die Steifigkeit sind im wesentlichen auch davon abhängig, ob die Kristalle Einkristalle sind oder eine körnige Struktur haben. Bei Einkristallen sind die Steifigkeit und Levitationskraft sehr groß, jedoch die Dämpfung klein. Bei sehr kleinen Korngrenzen ergibt sich genau der umgekehrte Fall, die Levitationskraft und die Steifigkeit werden dann, wegen der kleineren Ausdehnung von Strombahnen aufgrund der Begrenzungen an den Korngrößen sehr

gering und die Dämpfung steigt. Für die Lagereigenschaften hat es sich als äußerst zweckmäßig erwiesen, daß ein permanenter Zustand eingestellt wird, d. h. eine möglichst gute Verankerung des eingefrorenen Magnetflusses erreicht wird. Komgrenzen oder innere Grenzflächen können überraschenderweise sowohl für eine starke Verankerung als auch eine hohe Dämpfung sorgen.

Für praktische Anwendungen sollte die Korngröße daher für erforderliche Dämpfung und Steifigkeit geeignet ausgewählt werden. Insbesondere bei Versuchen zum Antrieb von Polygonspiegeln hat sich herausgestellt, daß die Körner gemäß einer bevorzugten Weiterbildung der Erfindung eine Korngröße zwischen 2 mm und 20 mm aufweisen sollten. Unerwarteterweise gelten diese Werte ebenfalls für die verschiedensten Materialien, so daß aufgrund der Versuchsergebnisse angenommen wird, daß die durch die Korngröße gegebene Lehre bei allen supraleitenden Materialien anwendbar ist, die sich durch stromtragende Ebenen und ein Mischkorngefüge auszeichnen.

Bekanntlicherweise entsteht der supraleitende Effekt erst bei tiefen Temperaturen. Diese werden üblicherweise durch Kühlen mit flüssigem Stickstoff erreicht, der verbrauchsabhängig nachgefüllt werden muß. Hier wird aber bevorzugt ein völlig anders gearteter Weg beschritten. Gemäß einer Weiterbildung der Erfindung ist eine Kleinkühlmaschine vorgesehen, die das zweite Teil kühlt. Für diese Kleinkühlmaschine wird in einer bevorzugten Weiterbildung eine Stirlingmaschine, die wegen ihres hohen Wirkungsgrades besonders vorteilhaft ist, ausgewählt.

Eine versuchsweise eingesetzte Stirlingmaschine mit einer Nenn-Kälteleistung von 2,5 W bei einer Temperatur von 80°K genügt zur Kühlung des zweiten Teils. Sie hatte eine elektrische Leistungsaufnahme von etwa 40 W und war für den Betrieb eines Lagers zum Antrieb eines Polygonspiegels völlig ausreichend. Mit einer Kleinkühlmaschine wird ein kontinuierlicher Betrieb dieses Motors möglich, ohne daß Stickstoff nachgefüllt werden muß. Für die Videoprojektion bildet dies einen nicht zu vernachlässigenden Vorteil. Außerdem erlaubt eine Kältemaschine einen Betrieb des Stators bei geringeren Temperaturen verglichen mit den 77°K von flüssigem Stickstoff. Deshalb waren bei den erreichten 80°K auch die Tragkraft und Steifigkeit verbessert.

Insbesondere zur Erhöhung der Stabilität hat es sich als besonders vorteilhaft herausgestellt, wenn das erste und das zweite Teil gemäß einer bevorzugten Weiterbildung von einem luftdichten Gehäuse umgeben sind. Die Reibung in der Umgebungsluft wird besonders gut reduziert, wenn dieses Gehäuse nach einer weitgehenden vorzugsweisen Weiterbildung der Erfindung bis zu einem Druck kleiner als 10^{-4} Pa evakuiert wird.

Die molekulare Reibung kann auch dadurch weiter verringert werden, daß die Gaszusammensetzung des den beispielhaft genannten Polygonspiegel umgebenden Gases verändert wird. Dazu ist gemäß einer bevorzugten Weiterbildung der Erfindung vorgesehen, daß das Gehäuse mit einem Gas kleineren Molekulargewichts als 28, insbesondere mit Helium, gefüllt ist.

Bisher wurde über die Magnete im ersten Teil noch nichts ausgesagt. Man könnte hier zur Erhöhung der Steifigkeit wegen der dadurch erhöhten Tragkraft auch Elektromagnete einsetzen, was aber möglicherweise Schwierigkeiten bei der Stromzuführung verursacht. Von wesentlich größerem Nachteil wäre jedoch eine Erwärmung, die sich beim Einsatz von Elektromagneten ergäbe und die eine größere Kühlleistung der beispielhaft genannten Kleinkühlmaschine erfordert. Gemäß einer vorzugsweisen Weiterbildung der Erfindung ist dagegen vorgesehen, daß die Magnete im ersten Teil Permanentmagnete sind, mit denen in vorteilhafter

Weise alle diese Nachteile auf einfache Weise überwunden werden. Die verringerte Tragkraft von Permanentmagneten gegenüber geeignet ausgelegten Elektromagneten wird durch die erfindungsgemäße Materialauswahl und Ausrichtung weitgehend kompensiert. Die magnetisch wirksamen Domänen des Vielkornmaterials erzeugen in Wechselwirkung mit dem permanentmagnetischen Material des zweiten Elementes ein bisher nicht bekanntes hohes Dämpfungsverhalten bei gleichzeitig ausreichender Tragfähigkeit des Magnetlagers was für die technische Anwendbarkeit eines supraleitenden Magnetlagers, insbesondere unwuchtige Rotoren, äußerst vorteilhaft ist.

Bei Einsatz eines erfindungsgemäßen Magnetlagers für einen Motor wird bevorzugt das supraleitende Material auf dem Stator und die Magnetkonfiguration auf dem Rotor des Motors angeordnet. Ein Magnetlager mit einem solchen Motor ist vor allen Dingen auch als Antrieb für einen Polygonspiegel geeignet, der auf der Drehachse des Motors befestigt ist. Dabei ist es besonders vorteilhaft, wenn ein Gehäuse vorgesehen und der Polygonspiegel in einem Videosystem eingesetzt ist, mit dem zeitlich periodisch ein zur Darstellung von Bildpunkten des Videosystems vorgesehenes Lichtbündel abgelenkt wird, wobei das Gehäuse sowohl das Lager als auch den Polygonspiegel umgibt und in dem Gehäuse ein oder zwei Fenster zum Ein- und Auslassen des abzulenkenden Lichts vorgesehen ist oder sind.

Eigentlich würde man vermeiden wollen, daß das Gehäuse sowohl das Lager als auch den Polygonspiegel umgibt, da dies einen größeren Aufwand zumindest bezüglich der beiden Fenster erforderlich macht. Aufgrund des umhüllenden Gehäuses, insbesondere wenn dieses evakuiert oder mit geeigneten Gasen gefüllt ist, wird jedoch auch der Einfluß von Luftbewegungen und die dadurch auf den Polygonspiegel möglicherweise ausgeübten Kräfte geringer. Die erforderlichen Rückstellkräfte sind dann ebenfalls verringert, was sich auf die Auslegung der Dämpfungs- und Steifigkeitswerte besonders günstig auswirkt. Für Drehzahlen des Polygonspiegels größer 100.000 1/min steigen die Reibungskräfte in Luft überproportional. Dieser Betrieb erfordert Vakuumbedingungen.

Insbesondere läßt sich mit Hilfe der Erfindung sowie ihrer Weiterbildungen ein supraleitendes Magnetlager ausbilden, das sowohl als translatorisches Lager als auch als rotatorisches Radial- oder Achsiallager besonders vorteilhaft einsetzbar ist und das folgende Elemente aufweist:

- ein erstes Element, das vorhergenannte zweite Teil, aus einem supraleitenden Material, das mit einem angeschlossenen Kühlsystem deutlich unter die kritische Temperatur abgekühlt werden kann.
- ein zweites Element, das vorhergenannte erste Teil, mit zumindest in Teilbereichen permanentmagnetischen Eigenschaften, wobei das supraleitende Material des ersten Elements mit mindestens einer Fläche des zweiten Elements im Bereich mit permanentmagnetischen Eigenschaften in magnetischer Wechselwirkung steht.

Dabei ist der Supraleiter ein schmelztexturiertes Material, vorzugsweise ein schmelztexturiertes Vielkornmaterial, mit hoher kritischer Stromdichte, das bezogen auf sein Gefüge ein Vielkornmaterial und vorzugsweise bezogen auf seine magnetischen Eigenschaften ein Vieldomänenmaterial mit Korngrößen im Bereich von 2 mm bis 20 mm ist, wobei eine Ausrichtung der Domänen nach stromtragenden a-b-Ebenen an dem anisotropen supraleitenden Material erfolgt und eine Vorzugsausrichtung so eingestellt wird, daß die Magnetflußlinien des permanentmagnetischen Materials parallel zur

Normalen auf den stromtragenden a-b-Ebenen stehen.

Durch die kristalline Struktur des hier angesprochenen supraleitenden Materials und seine anisotropen elektromagnetischen und mechanischen Eigenschaften ergeben sich wesentliche Vorteile. Insbesondere ist dafür das spezielle Herstellungsverfahren, das in dem Artikel von Werfel et al. geschildert wurde, anwendbar, bei dem den Kristallen im supraleitenden Material durch Anlegen lokaler Temperaturgradienten eine Vorzugsrichtung gegeben wird. Diese Vorzugsrichtung ist an den stromtragenden a-b-Ebenen des Kristallgitters orientiert und vorzugsweise liegt die Normale der stromtragenden a-b-Ebenen, die sogenannte c-Achse, möglichst weitestgehend parallel zur äußeren Magnetflußrichtung des zweiten Elements. In der Praxis konnte gezeigt werden, daß nahezu 90% der Kristallite eines supraleitenden Materials mit einer Abweichung von ± 10 Grad bezüglich der c-Achse ausgerichtet werden können. Möglich wäre auch ein Zusammenfügen von individuell gezüchteten Einzelkristallen gemäß ihrer Orientierung oder ein Ätzen von Strukturen in einen auf einem Substrat befindlichen Einkristall.

Bei rotatorischen Lagern hat sich in Verbindung mit vorzugsweise axial polarisierten Permanentmagneten eine gegenüber den im Stand der Technik beschriebenen Lagern sehr viel höhere Magnetflußverankerung ergeben, mit der die Steifigkeit eines Magnetlagers erheblich, etwa um den Faktor 3, gemessen bei einem speziellen Aufbau, erhöht werden konnte. Unerwarteterweise war bei diesem Lager auch eine vergleichsweise hohe Dämpfung beobachtbar. Diese Eigenschaften ließen sich vor allen Dingen auf die entsprechende Gefügebildung des Materials bezüglich der Kristall- bzw. Domängengrenzen in dem schon vorher angegebenen Wertebereich zurückführen und es wurde dadurch ein ausgezeichnetes und für das Betreiben von Polygonspiegeln geeignetes Dämpfungsverhalten des supraleitenden Magnetlagers eingestellt. Für ein rotatorisches Lager kann das erste Element beispielsweise zylinderförmig oder hohlzylinderförmig sein oder eine hohlzylinderförmige Ausfräsung, beispielsweise tulpenförmig, haben. Dabei ist das zweite Element auf das erste Element bezüglich seiner Abmessungen bezüglich des gewünschten Abstandes angepaßt.

Für das zweite Element wird ein permanentmagnetischer Teil in einer scheibenförmigen Ausgestaltung bevorzugt. Dabei kann es axial polarisiert oder auch alternativ radial polarisiert sein. Hier wird die axiale Magnetisierung bevorzugt, bei der sich scheibenförmig und ringförmige Permanentmagnete einfacher und/oder wirtschaftlicher herstellen und magnetisieren lassen.

Dabei sind die folgenden Ausbildungen besonders zweckmäßig:

- der Permanentmagnet ist ein permanentmagnetischer Ring;
- mehrere axial polarisierte radialsymmetrische permanentmagnetische Ringe sind in axialer Richtung aneinander geschichtet;
- mehrere axial polarisierte radialsymmetrische permanentmagnetische Ringe sind in Achsenrichtung gegenüberliegend aneinander liegend geschichtet.

Weiter können zur Verbesserung der Steifigkeit des Lagers zwischen den geschichteten permanentmagnetischen Ringen permeable Ringscheiben angeordnet sein, die der Homogenisierung und Führung des magnetischen Flusses dienen. Dazu eignet sich zum Beispiel Mu-Metall, das sich auch als besonders günstig für die Rundlaufeigenschaften eines rotatorischen Lagers erwiesen hat. Derartige perme-

able Ringscheiben sollten eine Dicke im Bereich von 0,5 bis 5 mm haben, wobei die Dicke mit der Größe des Spalties zwischen Statorteil und Rotorteil zunimmt.

Wegen der hohen geforderten Drehgeschwindigkeit ist es zweckmäßig, das Rotorteil aus einem Material mit hoher materialspezifischen Zugfestigkeit bei geringer Dichte herzustellen. Dazu eignet sich beispielsweise Aluminium, Titan oder deren Legierungen.

Es sind folgende Ausgestaltungen möglich:

Das zweite Element mit dem Permanentmagnet kann als Rotorteil aus einem nichtmagnetischen Zentralbereich und darauf befestigten permanentmagnetischen Ringen bestehen. Dabei sollte der Zentralbereich aus einem sehr festen Material bestehen, welches nicht magnetisierbar ist, wie beispielsweise Titan. Es können aber auch magnetisierbare Materialien eingesetzt werden, wie beispielsweise Stahlliegierungen. Für eine erhöhte Zerreißfestigkeit ist es dann auch besonders günstig, wenn die permanentmagnetischen Ringe aus einem mit Kohlefasern armierten hartmagnetischen Material bestehen. Insbesondere wird als hartmagnetisches Material SmCo, NdFeB empfohlen.

Alle diese Ausbildungen lassen sich auch vorteilhaft bei dem schon genannten Motor einsetzen. Ein Antriebsspulensystem eines derartigen Motors wird bezüglich des für die Lagerung des Rotors erforderlichen permanentmagnetischen Bereichs so angeordnet, daß eine Wechselwirkung mit den Spulen entsteht, wobei vorgesehene, geringste vorhandene oder in Teilbereichen erzeugten Asymmetrien des permanentmagnetischen Feldes und/oder Wirbelströme im Rotorteil zur Drehmomenterzeugung eingesetzt werden. Dabei kann das Antriebsspulensystem des Statorteils mit den permanentmagnetischen Feldern des Rotorteils einen kommutatorlosen Gleichstromantrieb oder einen Wechselstromantrieb, beispielsweise als Kurzschlußläufer oder Hystereseantrieb, bilden.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand der Zeichnung im Prinzip beispielshalber noch näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 eine schematische Darstellung zur Erläuterung der Wechselwirkung eines Permanentmagneten mit einem Supraleiter in Axialgeometrie;

Fig. 2 die Prinzipdarstellung für die Axialgeometrie eines supraleitenden Magnetlagers mit texturiertem supraleitendem Material;

Fig. 3 ein Ausführungsbeispiel für ein radiales Magnetlager mit supraleitendem Statorteil gemäß Stand der Technik;

Fig. 4 ein Ausführungsbeispiel wie in Fig. 3 jedoch mit optimierter Tragfähigkeit, Lagersteifigkeit und Dämpfung;

Fig. 5 eine Darstellung für die anisotrope Magnetisierungskurve für schmelztexturierte YBaCuO Supraleiter;

Fig. 6 eine Darstellung für die Einstellung der Kristallrichtung bei einem Zylinder aus supraleitendem Material mit einer radialen Kristall- bzw. Kornstruktur;

Fig. 7 eine Kombination eines supraleitenden Radial- und Axiallagers mit besonders hoher Lagersteifigkeit;

Fig. 8 ein supraleitendes Lager in einem Motor zum Antrieb eines Polygonspiegels;

Fig. 9 ein supraleitendes Lager ähnlich wie in Fig. 8, das jedoch als zweiseitiges Radiallager ausgeführt ist, und

Fig. 10 ein zweiseitiges Radiallager mit Polygonspiegel in einer Sandwich-Geometrie.

Wie aus den vorhergehenden Ausführungen schon deutlich wurde, kommt es bei dieser Erfindung wesentlich auf die Ausrichtung von Kristallen in einem speziell angefertigten Teil aus supraleitendem Material an. Für die insbesondere angesprochene Schmelztexturierung kann man sich im wesentlichen auf die Ausführungen in dem vorhergenannten Werfel-Artikel beziehen. Derartige Verfahren benötigen jedoch große Erfahrung, so daß empfohlen wird, sich an die

Firma Adelwitz Technologiezentrum GmbH, Rittergut Adelwitz in D-04886 Adelwitz, Deutschland, zu wenden, die in der Lage ist, verschiedenste Teile mit unterschiedlichsten Richtungen für verschiedene Anforderungen herzustellen.

In **Fig. 1** ist das Prinzip der Wechselwirkung eines in axialer Richtung magnetisierten Permanentmagneten **1** mit einem Teil **3** gezeigt, das aus einem supraleitenden Material **2** hergestellt ist. Die Striche unterschiedlicher Richtung in dem Teil **3** sollen schematisch verdeutlichen, daß die Kristallrichtungen, wie dies aus dem Stand der Technik bekannt ist, statistisch verteilt sind.

Dabei ist der Permanentmagnet **1** über einer Fläche des supraleitenden Materials **2** angeordnet. Das supraleitende Material **2** ist beim Betrieb des Lagers, also in dem in der **Fig. 1** gezeigten Zustand, unterhalb seiner kritischen Temperatur. Die Magnetfeldlinien des Permanentmagneten **1** erzeugen Ströme, die ein Magnetfeld aufbauen, das dem des Permanentmagneten **1** entgegengerichtet ist. Es entsteht also eine Kraftwirkung, die den Permanentmagnet **1** über dem supraleitenden Material **2** schweben läßt.

Die induzierten Magnetfelder erzeugen eine Kraft, die größer als das Gewicht des Permanentmagneten **1** ist und diesen auf Abstand hält. Sowohl seitliche Bewegungen als auch Rotationsbewegungen um eine Rotationsachse sind bei geeigneter Formgebung von Magnet **1** und Material **2** möglich.

In dem Beispiel gemäß **Fig. 1** ist allerdings durch die Rotationssymmetrie des magnetischen Feldes des Permanentmagneten **1** und der Verankerung der Magnetfeldlinien ausschließlich ein rotatorischer Freiheitsgrad um eine Drehachse gegeben. Dabei bildet der Permanentmagnet **1** ein Rotorteil und das supraleitende Material **2** ein Statorteil **3**, die voneinander durch einen Spalt **4** aufgrund der erläuterten magnetischen Kräfte und der Gegenwirkung des supraleitenden Materials **2** getrennt sind. Die Spaltbreite wird durch den sogenannten frozen-field-Zustand bestimmt, wodurch auch die beim Abkühlen des Supraleiters eingestellte Spaltgröße dauerhaft eingehalten wird.

Der Permanentmagnet **1** dreht sich nach der Einwirkung äußerer Kräfte nahezu reibungsfrei über dem supraleitenden Material **2**. Die Luftreibung kann bei höheren Drehzahlen allerdings Reibungsverluste verursachen. Insbesondere für hohe Drehgeschwindigkeiten ist wegen der Verringerung der Gasreibung ein Vakuum besser als 10^{-1} Pa zwischen stehendem und drehendem Teil zweckmäßig. Weiter kann man den Permanentmagneten **1** und das supraleitende Teil **3** zur Verringerung der Luftreibung auch in einem Gehäuse lagern, das mit einem Gas gefüllt ist, welches eine höhere Schallgeschwindigkeit als in Luft erlaubt. Dazu bieten sich vor allen Dingen Gase mit geringem Molekulargewicht an, wobei sich insbesondere Helium als besonders vorteilhaft herausgestellt hat.

Alle folgenden Ausführungsbeispiele können, wenn sie beispielsweise zum Antrieb eines Polygonspiegels in der Videotechnik eingesetzt werden, in einem Gehäuse, das hier allerdings nicht gezeigt ist, untergebracht werden. Dann ist es vorteilhaft, auch einen durch das Lager gelagerten Polygonspiegel zur Verringerung der Reibung in dem Gehäuse unterzubringen, wobei dann in dem Gehäuse Fenster für das Einfallen und Ausfallen des abzulenkenden Lichtbündels vorgesehen sind. Diese notwendigen Fenster sind zwar aufwendiger, als wenn der Polygonspiegel außerhalb des Gehäuses gelagert würde, die geringeren Reibungsverluste am Polygonspiegel und die Unabhängigkeit des Laufs bezüglich Bewegungen der Umgebungsluft haben sich aber insgesamt als Vorteile erwiesen. Drehzahlen größer als 120.000 1/min erfordern eine evakuierte Umgebung.

In **Fig. 2** ist das supraleitende Material **2** ein schmelztexturiertes Vielkristallmaterial hoher kritischer Stromdichte mit den Kristallachsen **a**, **b** und **c**, wobei die durch die Achsen **a** und **b** aufgespannte Fläche den supraleitenden Strom trägt und die höchste Magnetisierung erlaubt. Wie durch die Striche im Material **2** angedeutet ist, sind die Kristallite in dem supraleitenden Material **2** so ausgerichtet, daß die Normale auf den stromtragenden Ebenen parallel zur Rotationsachse **5** liegt.

Wegen des vorübergehend näher beschriebenen anisotropen physikalischen Verhaltens des supraleitenden Materials **2** werden die supraleitenden Ströme vorzugsweise in den in nahezu der gleichen Richtung ausgerichteten **a-b**-Ebenen des Kristalls erzeugt. Dabei hat sich gezeigt, daß eine gegenüber dem Stand der Technik höhere erreichbare Magnetisierung möglich ist, die sowohl die Tragfähigkeit als auch die Steifigkeit des Magnetlagers gegenüber solchen mit ungeordneten Kristallen erhöht, wie später näher anhand der **Fig. 5** deutlicher werden wird.

Sind die Kristallite sehr klein, werden die supraleitenden Ströme durch die Korngrenzen gedämpft, so daß sich durch die mittleren Korngrößen der Kristallite auch eine entsprechende Dämpfung eines Magnetlagers einstellen läßt. Eine derartige Dämpfung ist zweckmäßig, damit bei ausweichender Rotationsachse aus der vorgegebenen Lage und Rückstellung, insbesondere bei Breichen kritischer Drehzahlen, aufgrund der die Steifigkeit bestimmenden Kräfte keine oder nur eine schnell abklingende Schwingung entsteht. Entsprechende Korngrößen der Kristallite wurden vorstehend schon angegeben. Insbesondere hat es sich gezeigt, daß sie für vorteilhafte Dämpfungen, insbesondere bei der Anwendung des schematisch in **Fig. 4** dargestellten Lagers in einem Motor zum Antrieb eines Polygonspiegels, in der Größenordnung von 8 mm liegen sollten.

Diesbezüglich sei auch noch einmal auf die besonders günstige Anordnung des Permanentmagneten **1** als Rotorteil und des supraleitenden Materials **2** als Statorteil hingewiesen, aufgrund der sich das Statorteil besonders einfach kühlen läßt. Bei den versuchsweise ausgeführten Ausführungsbeispielen wurde dazu eine Kleinkühlmaschine verwendet, die als Stirlingkühler mit 2,5 W/80 K ausgeführt war, oder eine Anordnung verwendet, die mit flüssigem Stickstoff betrieben wurde.

Weiter ist aus der **Fig. 2** erkennbar, daß das Rotorteil aus drei zylindrischen, gegenpolig angeordneten Permanenttringen **6**, **7**, **8** besteht. Die dadurch gegebene Magnetfeldkonfiguration erzeugt im Supraleiter hohe Feldgradienten an den Polaritätsgrenzen **NS** und **SN**. Diese sind vor allen Dingen für die erwünschte Steifigkeit, d. h. die Rückführung des Rotors **1** auf die gewünschte Rotationsachse **5** nach Ausweichen aufgrund mechanischer Störungen, äußerst vorteilhaft.

Als weiteres Beispiel ist in **Fig. 3** ein rotatorisches Lager in Radialgeometrie gezeigt mit magnetischen Materialien nach dem Stand der Technik. Das supraleitende Material **2** bildet dabei das Statorteil **10**, das aus einem supraleitenden Zylinder oder Ring besteht und, wie schon beschrieben, gekühlt wird. Ein System aus geschichteten Permanentmagnetringen **11**, **12**, **13**, **14** und Zwischenringen **16** ist auf einer Achse **18** befestigt und bildet den Rotorteil **20** mit der Drehachse **5**. Die axialmagnetisierten Permanentmagnetringe **11**, **12**, **13**, **14** sind, wie aus **Fig. 3** erkennbar ist, jeweils zum Nachbarn gegengepolt und erhöhen so den radialen Magnetfluß nahezu auf den zweifachen Wert des einfachen Magneten.

Im Ausführungsbeispiel bestehen die Zwischenringe **16** aus hochpermeablem Material, insbesondere aus Weicheisen, das eine Feldführung und Homogenisierung des Magnetfelds der Permanentmagnete **11**, **12**, **13**, **14** bewirkt. Die

Achse 18 ist im Ausführungsbeispiel aus einem unmagnetischen Material. Die optimale Dicke der Zwischenringe 16 hängt wesentlich von der Größe des auch in diesem Beispiel vorhandenen Spaltes 4 ab. Es hat sich herausgestellt, daß bei den Ausführungsbeispielen die Dicke der Zwischenringe 16 ungefähr die Hälfte des Spaltes 4 betragen sollte. Das heißt, daß bei einem üblicherweise verwendeten Spalt 4 von 1 mm zweckmäßigerweise eine Dicke von ungefähr 0,5 mm für die Zwischenringe 16 vorgesehen wird.

Fig. 4 zeigt nun im Unterschied zum Beispiel von Fig. 3 ein erfindungsgemäßes supraleitendes Radiallager, bei dem das supraleitende Statorteil 10 eine radialsymmetrische Ausrichtung der supraleitenden Kristallite aufweist. Durch Anlegen von positiven und negativen örtlichen Temperaturgradienten bei der Herstellung des Statorteils 10 als zylinderförmiges Formteil wurde, wie im Werfel-Artikel beschrieben, eine radiale c-Achsen-Textur des supraleitenden Materials 2 realisiert. Wie schon vorhergehend beschrieben wurde, wird auch hier durch die Vorzugsrichtung der c-Achsen zur Drehachse 5 hin, die gegenüber dem Beispiel von Fig. 3 höhere Magnetisierung erreicht, die gegenüber bekannten Lösungen eine größere Tragfähigkeit und Steifigkeit für die Lagerung des Rotorteils 20 gegenüber dem Statorteil 10 ermöglicht. Die höhere Flußverankerung erlaubt insbesondere die Miniaturisierung von berührungslosen passiven supraleitenden Magnetlagern.

Durch Änderung in der symmetrischen und periodischen Anordnung der Zwischenringe 16 und die Wahl von deren Dicke kann die magnetische Flußführung und deren Verankerung im Supraleiter so eingestellt werden, daß an den Achsenenden eine höhere radiale Steifigkeit entsteht, die einer virtuellen Zweipunktlagerung entspricht. Auf diese Weise ist eine besonders hohe Kippsteifigkeit des Rotors 6 möglich.

In Fig. 5 ist die Magnetisierung eines YBaCuO Supraleiters als Meßkurve der Magnetisierung m in Abhängigkeit von einem äußeren Magnetfeld H , sowohl parallel zur kristallographischen c-Achse entsprechend b Kurve 22 als auch senkrecht zur kristallographischen c-Achse entsprechend Kurve 24 dargestellt. Die gemäß Kurve 22 gemessene höhere maximale Magnetisierung für ein parallel zur c-Achse gerichtetes Magnetfeld stellt ein experimentell gewonnenes Ergebnis dar, das hier vorteilhaft für eine hohe Steifigkeit bewirkt, die bis zum vierfachen der bekannten Anordnungen betragen kann. Es hat sich in Versuchsaufbauten gezeigt, daß die bei den angegebenen Werten erreichbare Dämpfung des supraleitenden Magnetlagers so hoch ist, daß die Eigenfrequenz unwuchtiger Rotorteile beim Hochfahren, selbst bei einer Schwerpunktverlagerung von bis zu 0,3 mm, sicher durchfahren werden konnte.

Ein zylinderförmiges Statorteil 10 für ein supraleitendes Radiallager mit radialer Textur ist in Fig. 6 schematisch gezeigt. Die einzelnen Kristallite 26 werden dabei durch ein Züchtungsverfahren mit Hilfe einer Gradienten-Schmelztextur ausgerichtet, wie es aus dem Werfel-Artikel bekannt ist.

In Fig. 7 ist ein supraleitendes Magnetlager mit einem Rotorteil 20 gezeigt, das gegenpolig angeordnete permanentmagnetische Ringe 30, 31, 32, 33, 34 aufweist. Das supraleitende Statorteil 10 hat dabei eine zylinderförmige Aussparung 36 in der die permanentmagnetischen Ringe 30, 31, 32, 33, 34 mit kleinem Spalt 4 angeordnet sind. Das supraleitende Material des Stators 10 weist in radialer Richtung der Ringe 30, 31, 32, 33, 34 die in Fig. 6 gezeigte radial ausgerichtete Textur der Kristallite auf. Zusätzlich ist im Gebiet 38 des Statorteils 10 am Boden der zylindrischen Aussparung eine axiale Textur vorgesehen. Eine derartige Kombination von supraleitendem Radiallager mit zusätzli-

chen axialen Lagerkomponenten sichert besonders hohe magnetische Lagerkräfte und Steifigkeiten.

Ein Beispiel eines supraleitenden radialen Magnetlagers mit einem Polygonspiegel 40 an einem Lagerende und einem motorischen Antrieb 42 an seinem anderen Lagerende ist beispielhaft in Fig. 8 gezeigt. Dabei besteht das Magnetlager aus einem supraleitendem Statorteil 10, das von einer angeschlossenen Kleinkühlmaschine 44 gekühlt wird. Das Rotorteil 20 trägt den Polygonspiegel 40 auf einer auslaufenden Achse 45 aus hochfestem Material. Auf der Achse 45 sind permanentmagnetische Ringe 50, 51, 52, 53 gegenpolig geschichtet angeordnet, zwischen denen Zwischenringe 16 zur radialen Homogenisierungen der Magnetfelder liegen. Die permanentmagnetischen Ringe 50, 51, 52, 53 und die Zwischenringe 16 sind für extrem hohe Drehzahlen ausgelegt und dazu zweckmäßigerweise mit Kohlefasern oder Kevlar armiert, vor allem damit die Teile den bei hohen Umdrehungszahlen auftretenden hohen Zentrifugalkräften Stand halten können.

An dem dem Polygonspiegel 40 gegenüberliegenden Ende des Rotorteils 20 ist ein für den motorischen Antrieb 42 angeordnetes Rotorteil als Kurzschlußläufer oder als magnetischer Läufer 56 ausgebildet. Der entsprechende Bereich des Rotorteils 20 ist von einer Statorspule 60 umgeben.

In Fig. 9 ist das Beispiel eines zweifach radial gelagerten Polygonspiegels 40 mit einer besonders erhöhten Lagersteifigkeit gezeigt, die dadurch bewirkt ist, daß der Polygonspiegel symmetrisch zwischen zwei Lagerteilen gemäß Fig. 8 angeordnet ist.

In Fig. 10 ist weiter ein mit einem Polygonspiegel 40 ausgerüsteter Scanner in Sandwichbauweise gezeigt. Dieser Scanner weist ein rotatorisches supraleitendes Magnetlager auf, wie es im Prinzip schon in Fig. 2 dargestellt wurde, wobei hier jedoch auch ein motorischer Antrieb 46 vorgesehen ist und ein Spiegelpolygon 40 direkt am Rotor ausgebildet ist. Am äußeren Umfang des Rotorteils 20 ist dazu ein Ring angeordnet, der außen die Spiegelemente des Polygonspiegels 40 trägt. Weiter sind im Unterschied zu Fig. 2 zwei Scheiben aus supraleitendem Material 2 spiegelbildlich zum Permanentmagneten 1 des scheibenförmigen Rotorteils 6 angeordnet.

In Fig. 10 ist ein dicht schließendes Gehäuse 62 gezeigt, in dem das supraleitende Material 2, der Rotor 20 und spiegelbildlich angeordneten Statorspulen 46 angeordnet sind.

Aufgrund der parallelen symmetrischen Anordnung des Statorteils bzgl. der Stirnfläche des Rotorteils werden besonders stabile Lager- und Antriebsverhältnisse bei einem radial ausgedehnten Lager geschaffen. Die gezeigte Anordnung eignet sich auch besonders für die Massenfertigung.

Die vorstehenden Beispiele zeigen, mit welcher Vielfalt sich die erfindungsgemäßen Magnetlager ausbilden lassen. Den wesentlichen Anteil an der erhöhten Tragfähigkeit hat dabei die Ausrichtung des anisotropen supraleitenden Materials bezüglich der maximalen Magnetflußverankerung, die durch die c-Achse bestimmt ist. Steifigkeit und Dämpfung lassen sich, wie dargestellt, mit Hilfe der Kristallitgröße, der Größe des Spaltes 4 sowie mit Hilfe von Zwischenringen 16 in weiten Bereichen variieren. Ein weiterer Vorteil des vorher genannten Multikorngefüges liegt in einem starken Verankerungseffekt für äußere Magnetfelder, wodurch eine exakte Positionierung und/oder Rückpositionierung magnetischer Rotoren im Bezug zum Stator im Bereich von 0,1 µm erreicht werden, was möglicherweise auf den Einfluß der Korngrenzen im remanenten eingefrorenen Zustand des Supraleiters zurückzuführen ist. Die einleitend angegebenen Werte sind demgegenüber insbesondere optimal für den Betrieb des dargestellten Lagers in einem Motor zum Antrieb

eines Polygonspiegels. Dies bedeutet aber auch, daß man für andere Anwendungsfälle, z. B. für Magnetlager mit geringeren Nenn-Umdrehungszahlen, durchaus andere Bemessungsregeln zugrunde legen kann. Die angegebenen Werte unter Berücksichtigung der Umdrehungszahl von über 100.000 Umdrehungen pro Minute erlauben es dem Fachmann, geeignete Größen für andere Anwendungsfälle abzuschätzen und danach zumindest experimentell eine weitgehende Optimierung auf den jeweiligen Anwendungsfall vorzunehmen.

Patentansprüche

1. Magnetlager, bei dem ein erstes Teil (1, 20) eine Magnetkonfiguration (1, 6, 7, 8; 11, 12, 14; 30, 31, 32, 34; 50, 51, 52, 53) aufweist, die zumindest in Teilbereichen permanentmagnetische Eigenschaften hat und gegenüber einem zweiten Teil (3, 10) magnetisch gelagert ist, das ein supraleitendes Material II. Art unter dessen kritischer Temperatur enthält, wobei das supraleitende Material ein schmelztexturiertes Vielkornmaterial mit kristallinen Körnern ist, deren stromtragende, kristalline a-b-Ebenen mit ihren Normalen auf das erste Teil (1, 20) weisen **dadurch gekennzeichnet**, daß das supraleitende Material eine Verbindung $X_xBa_2Cu_3O_{(7-\delta)}$ mit $1 \leq x \leq 1,6$, X ein Seltenerdmetall aus der Gruppe Y, Sm, Nd, Tb und $0,01 \leq \delta \leq 0,1$ enthält oder daraus besteht.
2. Magnetlager nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das erste Teil (1, 20) gegenüber dem zweiten Teil (3, 10) drehbar gelagert ist, daß die Magnetkonfiguration mehrere längs einer die Drehachse darstellenden Achse aufgereihete Magnete (1; 6, 7, 8; 11, 12, 13, 14; 30, 31, 32, 34; 50, 52, 53) aufweist, bei der jeweils ein Magnet (1; 6, 7, 8; 11, 12, 13, 14; 30, 31, 32, 34; 50, 52, 53) bezüglich des in der Reihe nachfolgenden Magneten (1; 6, 7, 8; 11, 12, 13, 14; 30, 31, 32, 34; 50, 52, 53) gegengepolt ist, und daß die Normalen der stromtragenden a-b-Ebenen radial auf die Drehachse weisen, wobei zwischen dem ersten (1, 20) und dem zweiten Teil (3, 10) ein Abstand größer als 0,1 mm vorgesehen ist.
3. Magnetlager nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Magnetkonfiguration ein scheibenförmiger Permanentmagnet (1) mit axialer Polarisierung ist und zwei Scheiben aus supraleitendem Material (2) spiegelbildlich zum Permanentmagneten angeordnet sind.
4. Magnetlager nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß der minimale Abstand zwischen dem ersten (1, 20) und dem zweiten Teil (3, 10) einen Wert zwischen 1 und 10 mm, insbesondere zwischen 2 und 7 mm hat.
5. Magnetlager nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß das erste Teil (1, 20) als Rotor und das zweite Teil (3, 10) als Stator eines elektrischen Motors ausgebildet sind.
6. Magnetlager nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß die Körner eine Korngröße zwischen 2 mm und 20 mm aufweisen.
7. Magnetlager nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß eine Kleinkühlmaschine (44) vorgesehen ist, die das zweite Teil (3, 10) kühlt.
8. Magnetlager nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Kleinkühlmaschine (44) eine Stirlingmaschine ist.
9. Magnetlager nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß das erste (1, 20) und das

zweite Teil (3, 10) von einem luftdichten Gehäuse (62) umgeben sind.

10. Magnetlager nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß das Gehäuse (62) bis zu einem Druck kleiner als 10^{-4} Pa evakuiert ist.

11. Magnetlager nach Anspruch 9 oder 10, dadurch gekennzeichnet, daß das Gehäuse (62) mit einem Gas kleineren Molekulargewichts als 28 gefüllt ist.

12. Magnetlager nach einem der Ansprüche 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Magnete (1; 6, 7, 8; 11, 12, 13, 14; 30, 31, 32, 34; 50, 52, 53) des ersten Teils Permanentmagnete sind.

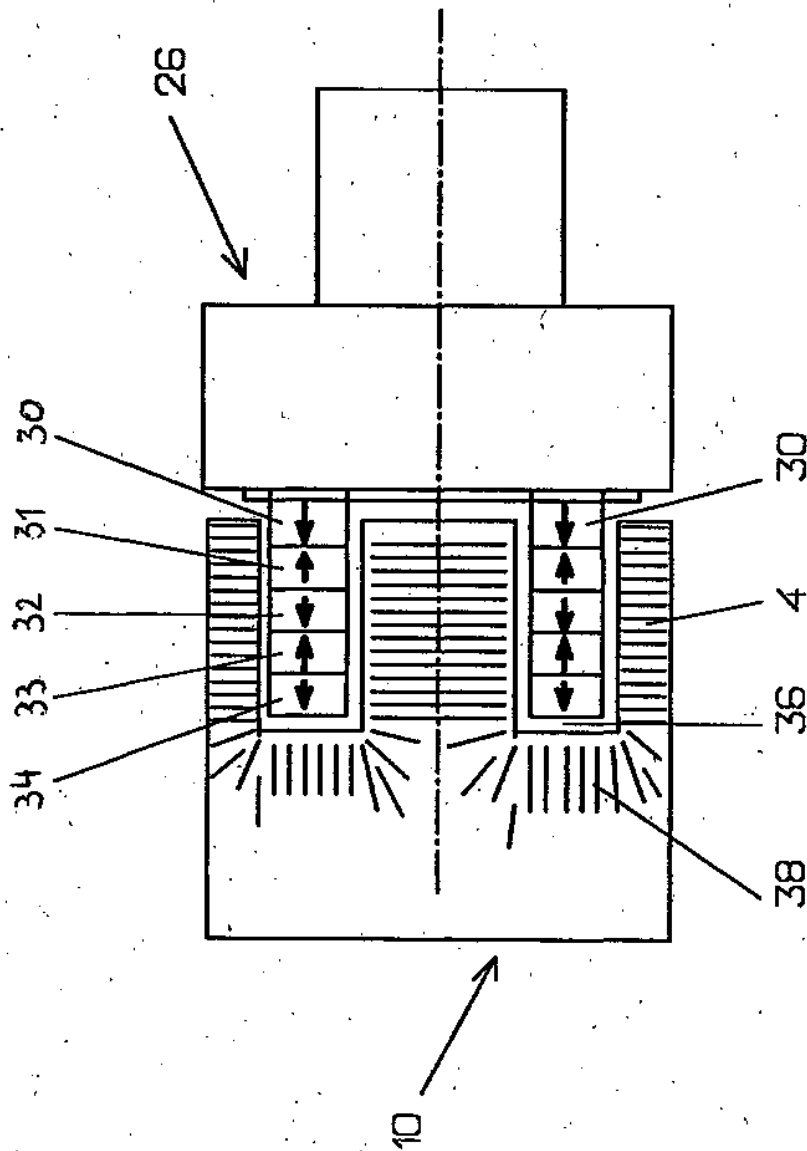
13. Magnetlager nach einem der Ansprüche 1 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß das supraleitende Material (2) auf dem Stator und die Magnetkonfiguration (1, 6, 7, 8; 11, 12, 14; 30, 31, 32, 34; 50, 51, 52, 53) auf dem Rotor eines Motors angeordnet ist.

14. Magnetlager nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß der Stator (3, 10) ein Antriebsspulensystem aufweist, das mit einem Bereich des Rotorteils (20) einen Kurzschlußläufer oder einen magnetischen Läufer bildet.

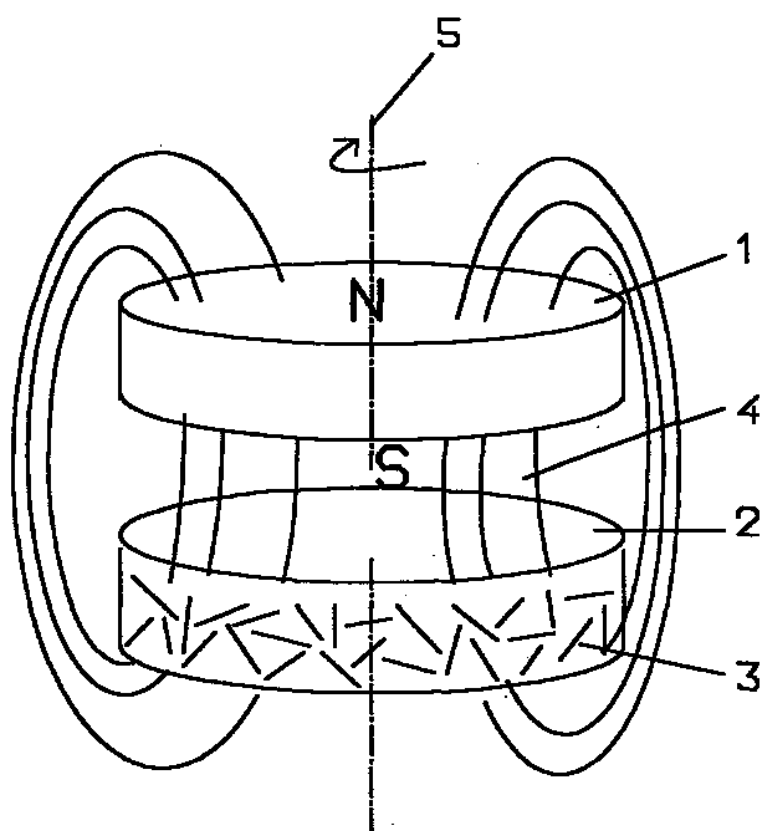
15. Magnetlager nach einem der Ansprüche 13 oder 14, bei dem ein Polygonspiegel (40) auf der Drehachse des Motors befestigt ist.

16. Magnetlager nach einem der Ansprüche 9 bis 11 zur Verwendung im Antrieb eines Polygonspiegels (40) in einem Videosystem, mit dem zeitlich periodisch ein zur Darstellung von Bildpunkten eines Videosystems vorgesehenes Lichtbündel abgelenkt wird, mit einem Gehäuse (62), das sowohl das Magnetlager als auch den Polygonspiegel (40) umgibt und ein oder zwei Fenster zum Ein- und Auslassen des abzulenkenden Lichtbündels aufweist.

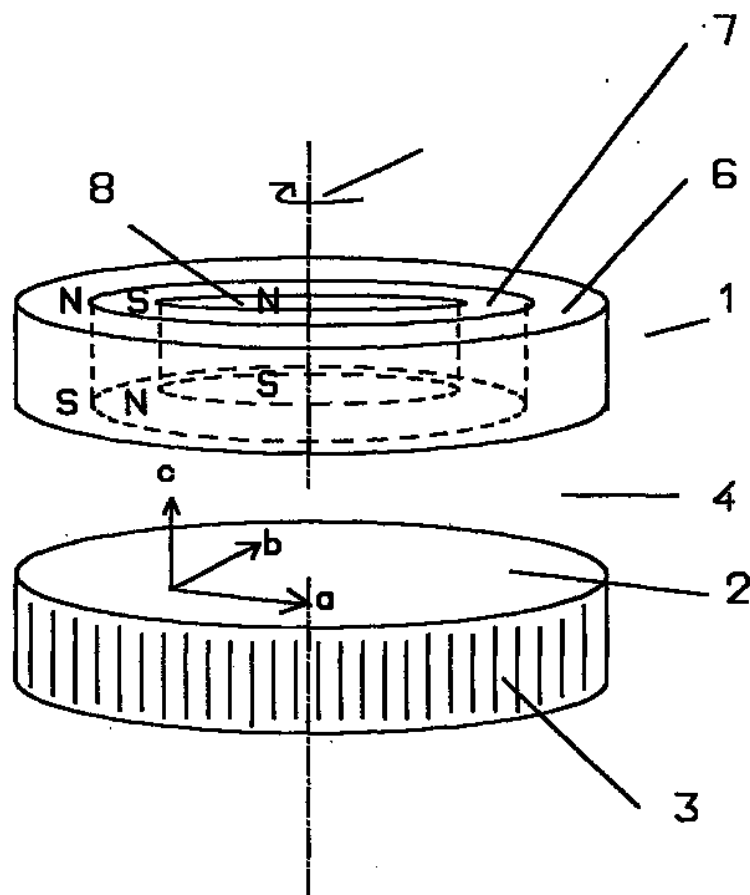
Hierzu 10 Seite(n) Zeichnungen



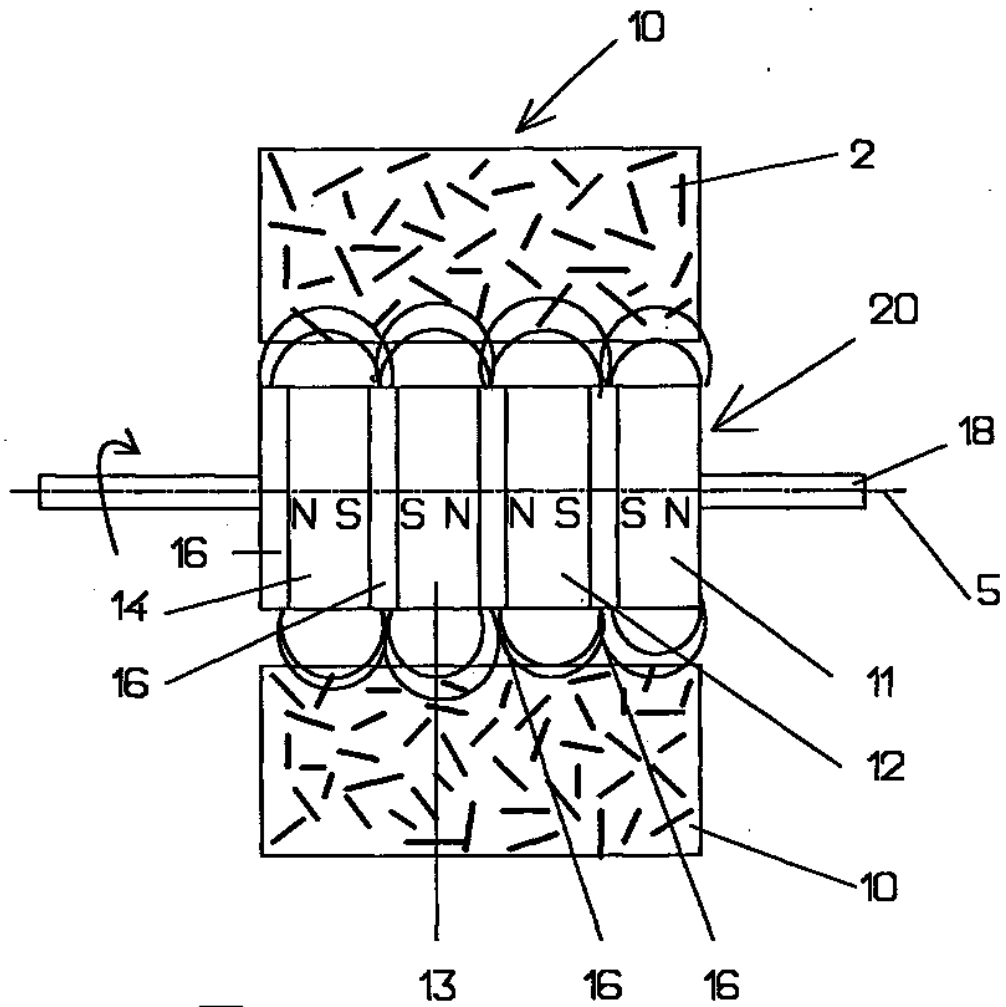
Figur 7



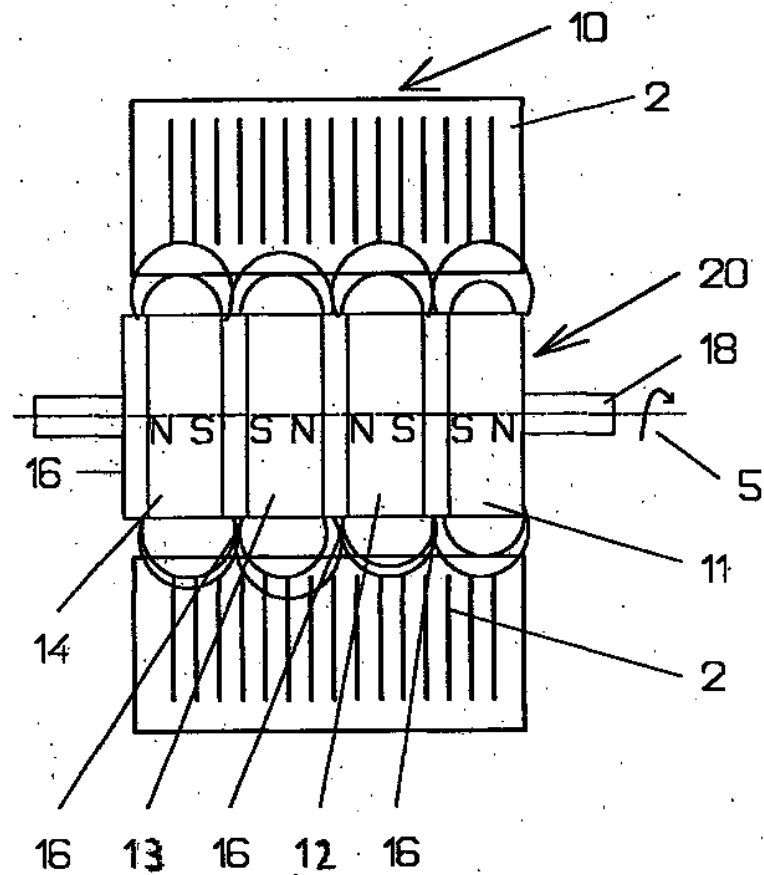
Figur 1



Figur 2



Figur 3



Figur 4

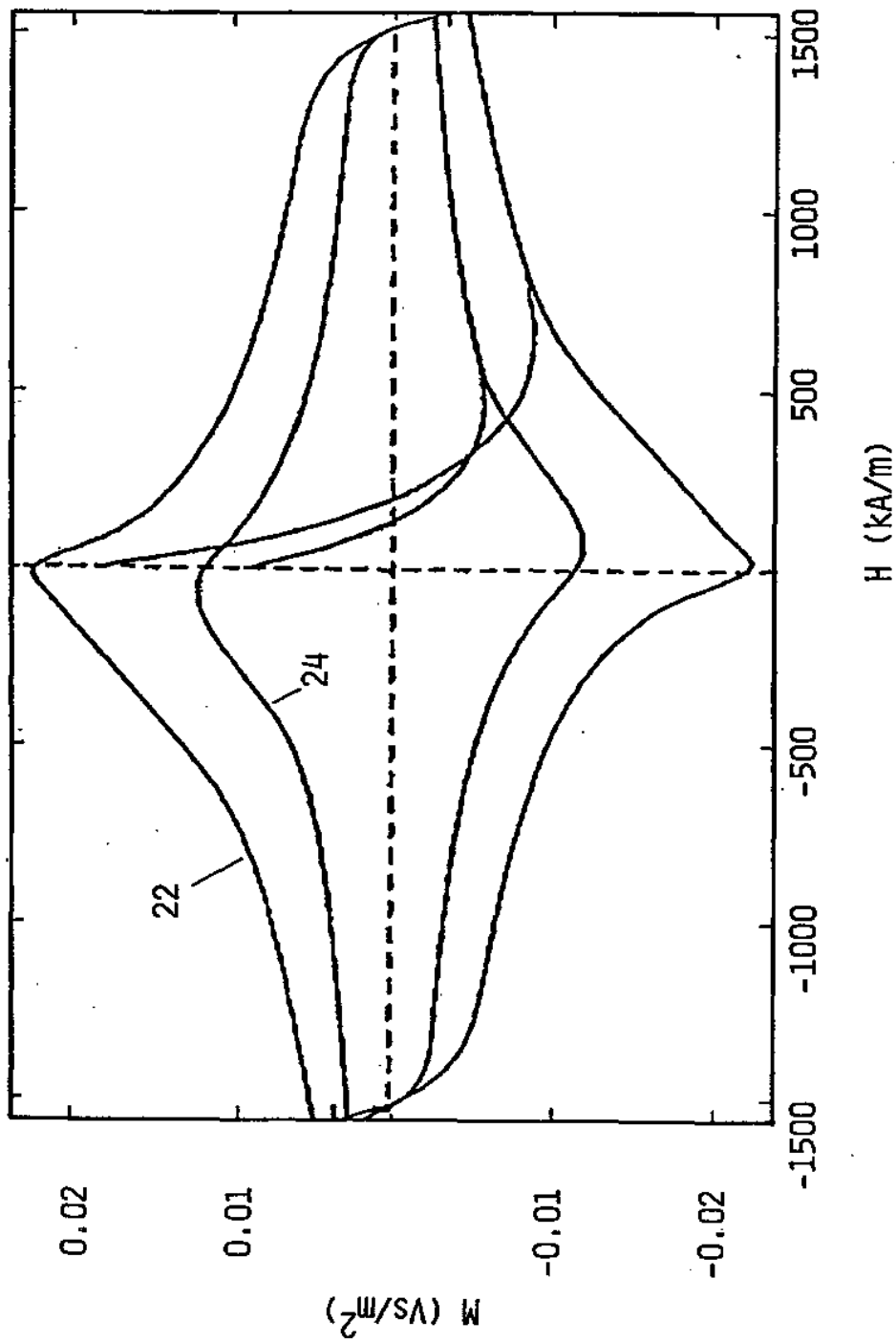
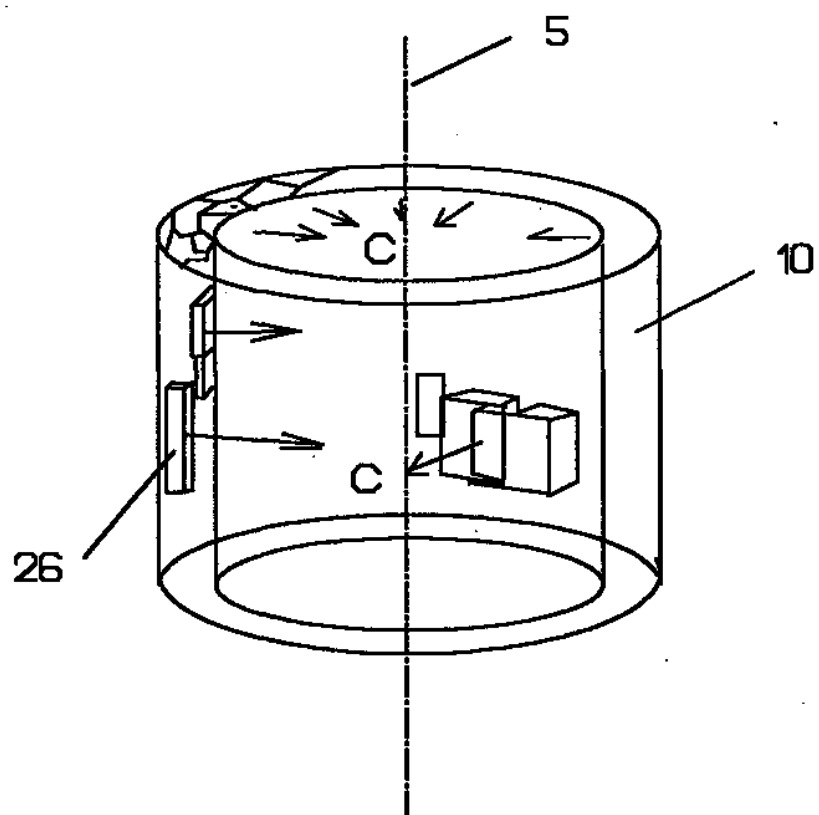
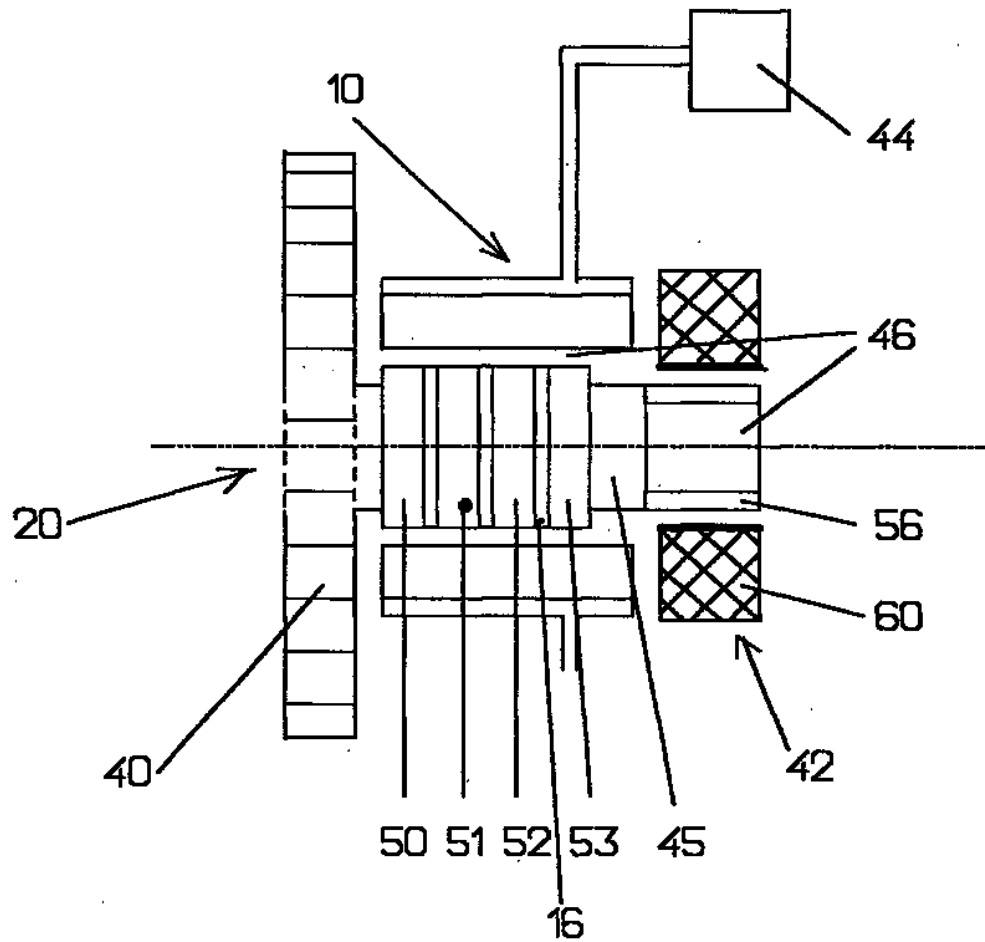


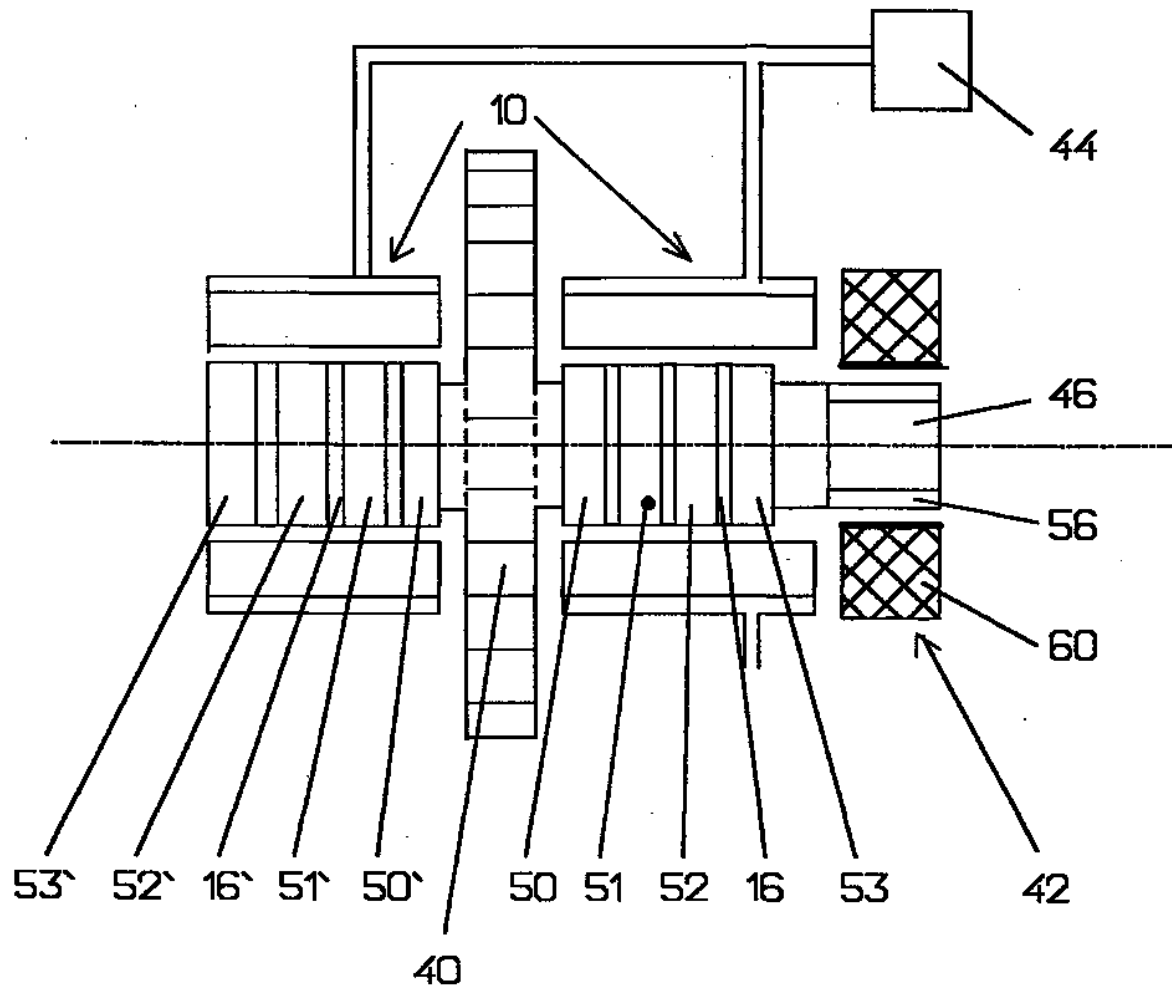
Figure 5



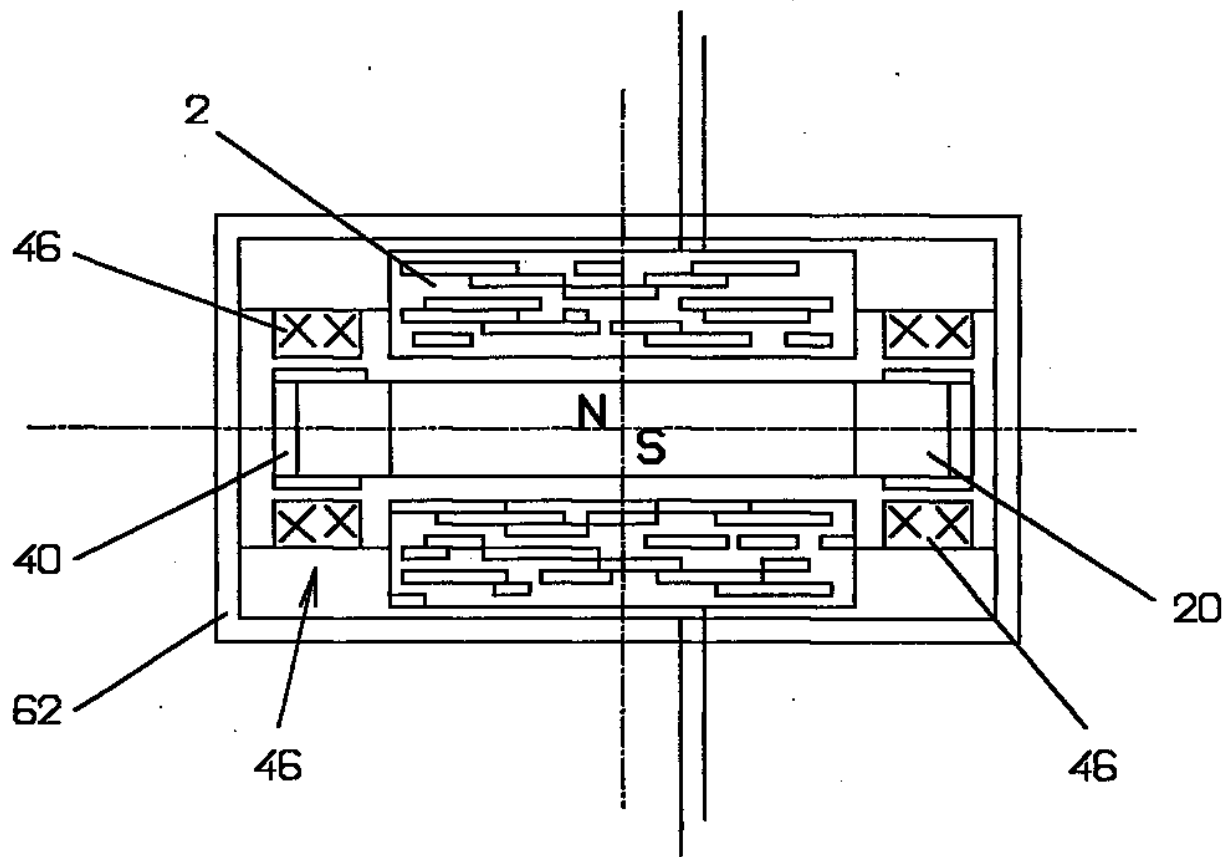
Figur 6



Figur 8



Figur 9



Figur 10