



18 **BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND**



**DEUTSCHES
PATENTAMT**

12 **Patentschrift**
10 **DE 196 43 844 C 1**

51 Int. Cl.⁶:
F 16 C 32/04
H 02 K 7/09
B 60 K 6/06
// H02K 7/09,7/02

21 Aktenzeichen: 196 43 844.6-51
22 Anmeldetag: 30. 10. 96
43 Offenlegungstag: -
45 Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 7. 5. 98

DE 196 43 844 C 1

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

73 **Patentinhaber:**
Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, 76133
Karlsruhe, DE

72 **Erfinder:**
Weber, Klaus, 76297 Stutensee, DE; Bornemann,
Hans Jürgen, Dr., 68753 Waghäusel, DE

66 **Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:**
JP 04-3 70 417
Applied Superconductivity, Vol. 12, No. 7/8,
S. 439-447;
Forschungszentrum Karlsruhe, Technik und
Umwelt
Technologietransfer und Marketing, Feb. 1996:
Flywheel for efficient Energy Storage 300 Wh
Prototype System;

64 **Supraleitendes Magnetlager in Modulbauweise**

57 Der supraleitende Teil eines Magnetlagers an einer Maschine mit Rotor ist so konstruiert und aufgebaut, daß bei der Montage und Demontage keine vollständige Zusammensetzung bzw. Zerlegung erfolgen muß. Der stillstehende, supraleitende Teil des Magnetlagers kann komplett und gesondert irgendwelchen Manipulationen unterzogen werden. Der Spalt zwischen dem rotierenden Permanentmagneten und dem stillstehenden supraleitenden Magneten ist jederzeit justierbar und korrigierbar. Der Supraleiter wird durch Wärmeleitung gekühlt, aber nicht unmittelbar durch das Kühlmittel angeströmt. Dadurch werden die Supraleitereigenschaften langfristig nicht durch das Kühlmittel beeinträchtigt, wie das bei unmittelbar stickstoffangeströmten Supraleitern beobachtet wird.

DE 196 43 844 C 1

Die Erfindung betrifft ein supraleitendes Magnetlager in Modulbauweise.

Passive supraleitende Magnetlager finden Einsatz in der berührungsfreien Schwebetechnik. Ein großes Anwendungspotential liegt dabei im Elektromaschinenbau vor. Insbesondere eignen sich solche Lager für schnell-drehende Maschinen wie Schwungrad-Energiespeicher oder schnell-drehende Rotoren im allgemeinen.

Supraleitende Magnetlager zeichnen sich gegenüber herkömmlichen Magnetlagern durch ihre inhärente Stabilität aus. Ihre Handhabung ist einfach, da Regeleinrichtungen zur Lagestabilisierung wie bei konventionellen Lagern entfallen. Die Fertigungskosten sind verhältnismäßig niedrig.

Um die supraleitenden Eigenschaften einzustellen, müssen die Lager bis unterhalb der jeweiligen Sprungtemperatur T_c gekühlt werden. In der Regel wird hierzu bei heute einsetz-fähigen Hochtemperatursupraleitern flüssiger Stickstoff (Liquid Nitrogen = LN) verwendet. Im Laborbetrieb wird der Supraleiter direkt vom flüssigen Stickstoff umspült ("wet cooling"). Diese Technik ist im Laborbereich nahelie-gend, da dort stets flüssiger Stickstoff zur Verfügung steht.

In Applied Superconductivity Vol. 2, No. 7/8, 439-447, 1994 berichten H. J. Bornemann et al. über ein Schwungrad-energiespeichersystem mit supraleitenden Magnetlagern. Auslaufexperimente wurden durchgeführt, um die Wirk-samkeit eines solchen Systems zu untersuchen. Hierzu war das gesamte Schwungradsystem in eine Vakuumkammer ge-kapselt (siehe auch die Informationsschrift des Forschungs-zentrum Karlsruhe, Technik und Umwelt, Technologietrans-fer und Marketing vom Februar 1996 "Flywheel for Effi-cient Energy Storage 300Wh Prototype System").

Eine Anordnung mit supraleitenden Magnetlagern wird in dem Patents Abstract of Japan, M-1412 May 19, 1993 Vol. 17/No. 252 vorgestellt. Um die Konstruktion einer Supralei-tenden Magnetlageranordnung eines Energiespeichers zu vereinfachen, wird die Rotorlage und die Lageregelung des aus einem Supraleiter und einem Permanentmagneten beste-henden Lager stabilisiert und vereinfacht. Die gesamte An-ordnung ist ebenfalls in einer umschließenden Vakuumkam-mer untergebracht.

Für den industriellen Einsatz ist schon allein wegen der geforderten Wartungsfreundlichkeit eine vakuumgekapselte Maschine nicht akzeptierbar, deren Supraleiter unmittelbar mit dem Kühlmedium angeströmt wird. In der Technik ist die Einsatzreife im Sinne eines "plug & play" anzustreben. Das System soll mit einfachem Netzanschluß zuverlässig betrieben werden können und für Wartungsarbeiten leicht zugänglich sein.

Bei einem Schwungradenergiespeicher wird oder ist in der Regel Luftreibung zu vermeiden. Das bedeutet, daß immer ein gewisser vakuumtechnischer Aufwand getrieben werden muß. Dennoch ist die bauliche Entkopplung des su-praleitenden Magnetlagers ein für die Montage und Demon-tage sowie Justage gewichtiger Punkt. Vorteilhaft wäre dies und ist dies auf jeden Fall in anderen Bereichen der berüh-rungsfreien Lagerung, wie z. B. langsam laufende Pumpen im Chemie-Verfahrensbereich, wo der Rotor nicht im Va-kuum läuft.

In der Nachrichtenelektronik geht der Trend der ange-wandten Supraleitung heute schon dahin, daß Filter und Res-onatoren für den Mobilfunk unter "cryogen free cooling" -Einsatz betrieben werden. Hierunter versteht man die Küh-lung über ein mit einem Kühlaggregat verbundenen Kaltfin-ger, der nur noch an den zu kühlenden Supraleiter angelegt werden muß. Das unmittelbare Bespülen mit flüssigem Stickstoff hat den Nachteil, daß eine Degradierung des Su-

praleitermaterials damit einhergeht. Das zieht nach sich, daß der Supraleiter zum Erhalt seiner Leitereigenschaften für den Langzeiteinsatz nur über Wärmeleitung gekühlt werden kann.

5 Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein supralei-tendes Magnetlager in Modulbauweise derart weiterzubil-den, daß eine Vereisung des supraleitenden Bereichs wirk-sam verhindert werden kann.

Die Aufgabe wird durch ein supraleitendes Magnetlager-10 Modul gemäß Anspruch 1 gelöst. Hierzu ist nur der stillste-hende Lagerbereich in eine Vakuumkammer eingeschlos-sen, indem ein Kryostat zur Kühlung des Supraleiters un-tergebracht ist. In das Kryostatgehäuse ist von außen ein Su-praleiterring bündig oder leicht überstehend mit gutem Wär-meübergang eingebettet, dessen frei liegende Stirnseite mit zum Permanentmagneten hinweisenden Stirnseite der Vaku-15 umkammer einen ringförmigen Spalt bildet. Im Bereich des Kryostaten hat der innere Deckel der Vakuumkammer eine kleinere Wandstärke, so daß der Permanentmagnet am Rotor mit dem Supraleiterring einen kleinst möglichen Ringspalt bildet.

Der Kryostat ist über Kryo-Befestigungen - das sind nicht wärmeleitende oder allenfalls schlecht wärmeleitende, mechanisch stabile Befestigungen - an der Vakuumkammer verankert und, wie auch die Vakuumkammer selber, axial in Grenzen verstellbar. Dadurch kann der Spalt zwischen dem Supraleiterring und dem Deckel der Vakuumkammer fein eingestellt werden, so daß die vorgegebenen Schwebeeigen-schaften der Magnetlager eingestellt werden können.

20 Durch den Aufbau des Moduls werden die Verluste durch Minimierung der zu kühlenden passiven (nicht supraleiten-ten) Masse gering gehalten. Irreversible Klebetechniken werden vermieden. Das Modul ist auch dadurch leicht hand-habbar.

Die Erfindung wird nachstehend anhand der in der Zeich-nung dargestellten Ausführungsform erläutert.

Es zeigt:

Fig. 1 den axialen Schnitt durch das supraleitende Ma-gnetlager in Modulbauweise,

Fig. 2 den axialen Schnitt durch einen herkömmlichen Schwungrad-Energiespeicher.

Den prinzipiellen Aufbau eines Schwungrad-Energie-speichers zeigt Fig. 2. Ein solcher Speicher besteht aus dem Motor/Generator 20 im mittleren Bereich, mit dem im Mo-torbetrieb die Einrichtung auf die vorgegebene Drehzahl bzw. Nenndrehzahl hochgefahren wird. Die damit aufge-prägte kinetische Energie (Rotationsenergie), die dann im wesentlichen in den beiden Schwungrädern 21 gespeichert ist, kann in Form von elektrischer Energie jetzt vom Genera-tor 20 abgegriffen werden. Dabei verringert sich die Dreh-zahl entsprechend.

In den beiden Endbereichen der Rotorachse 1, unmittel-bar hinter dem jeweiligen Schwungrad 21 sitzt das Magnet-lager 22. Der Permanentmagnet 6 sitzt auf der Rotorachse 1 und ist gegen die auftretende, drehzahlabhängige radiale und tangential Spannung über eine auf seinem Umfang an-liegende Armierung 23 vorgespannt. Im feststehenden Teil des Magnetlagers sitzt, durch einen schmalen ringförmigen Spalt getrennt, der supraleitende Teil mit seinem zugehö-rigen Kryostaten 3. In die äußere Stirnwand des Kryostatge-häuses ist der ringförmige Supraleiter 4 oder die ringförmige Supraleiteranordnung eingelassen. Im Innern des Kry-ostaten 3 fließt das Kühlmittel, das den Supraleiter indirekt über Wärmeleitung unter die Sprungtemperatur T_c von flüs-sigem Stickstoff kühlt.

An beiden Enden der Rotorachse 1 ist je ein Notlager 24, daß im Ausnahmefall auf das zugehörige Achsende drückt. Der gesamte Schwungrad-Energiespeicher ist gasdicht ge-

kapselt, so daß das Innere evakuierbar ist. Einerseits gibt es dann im Vakuum keine Luft oder Gasreibung für den rotierenden Teil, andererseits besteht damit eine Wärmeisolation, so daß der Kryostat 3 in seiner Leistung kleiner gehalten werden kann.

Abgesehen von der Vermeidung der Luftreibung und der Eisbildung an kälteren Stellen ist mit diesem Aufbau für Montage und Demontage ein Aufwand zu treiben, der dem Bedürfnis nach Wartungsfreundlichkeit nicht entgegenkommt.

Für die unmittelbare Umgebung problematisch sind die beiden supraleitenden Lagerbereiche. Sie vereisen, falls sie sich direkt in Luft befinden.

Das supraleitende Magnetlager-Modul gemäß Fig. 1 entkoppelt den supraleitenden Teil des Magnetlagers hinsichtlich der Montage und Demontage des Schwungrad-Energiespeichers, es ist unmittelbar zugänglich.

Das Modul besteht äußerlich im wesentlichen aus der kreisringförmigen Vakuumkammer 2 mit dem Rohrstützen 25 für das Evakuieren und Fluten des Innenraums sowie den beiden Durchführungen 14 (nur eine eingezeichnet) am äußeren Mantel für die Kühlmittelleitungen 19. Die Durchführungen 14 sind aus der Mantelwand der Vakuumkammer 2 herausgezogen, damit der Wärmeweg von der sehr kleinflächig berührten Kühlmittelleitung 19 zur Wand der Vakuumkammer 2 groß ist, wodurch dort der Wärmeübergang verschlechtert wird.

Am eingebauten, supraleitenden Magnetlager-Modul ist zunächst von außen her der in der Fig. 1 untere Deckel 16 zugänglich. Er flanscht an der äußeren Mantelwand vakuumdicht an. An der unteren Stirnseite des coaxialen Rohres 26 ist der axial verstellbare Stellring 17 mit Innengewinde aufgeschraubt. Der Deckel 16 und der Stellring 17 werden über den Spannring 18 zusammengezogen, dabei wird der O-Ring 27, gasdicht abschließend, an die drei Wände des dreieckförmigen Ringraums gepreßt. Der dünnwandige Teil (Membran) des Deckels 7 wird bei gelöstem Zustand des Feststellflansches 18 durch entsprechendes Verdrehen des Stellrings 17 angehoben oder gesenkt. Danach wird der Feststellflansch 18 wieder festgezogen.

An der in der Fig. 1 oberen Stirnseite des Innenrohrs 26 ist der andere stirnseitige Deckel 7 der Vakuumkammer 2 angeschweißt. Er hat im Bereich des Kryostaten 3 mit eingebettetem Supraleiterring 4 eine kleine Wandstärke, die zur äußeren Mantelwand der Vakuumkammer 2 hin wieder stärker ist. Dort ist dieser Deckel 7 ebenfalls vakuumdicht verschweißt. Die Wände der Vakuumkammer sind metallisch, im Durchführungsbeispiel aus Edelstahl.

Der Kryostat 3 ist coaxial zur Achse 1 im Innern der Vakuumkammer 2 über Kryobefestigungen aufgehängt, und zwar aus Bolzen 9 aus Kunstharz-verklebten Glasfasern, die die Wärme nicht oder allenfalls sehr schlecht leiten. Es gibt somit keinen Wärmepfad von der Kryostatkammer zu den Wänden der Vakuumkammer 2. Es sind hier drei, um die Rotorachse 1 gleichverteilte Gewindebolzen 11 an dem Deckel 7 eingeschraubt. An der in das Kammerinnere zeigenden Stirnseite der Bolzen 9 sitzt je eine Fahne 10 rechtwinkelig, die radial nach innen weist. Durch ihren freien Endbereich gehen zwei Gewindebolzen 11, die über je zwei Muttern an der Fahne festgestellt sind. Die Bolzen 11 setzen an der freien stirnseitigen Kryostatwand an. Mit ihnen wird das Kryostatgehäuse gehalten und die Größe des Ringspaltes 8 vom Supraleiterring 4 zum dünnwandigen Bereich des Deckels 7 eingestellt.

Die Wand des Kryostatgehäuses 3 ist aus einem Material, hier Kupfer, das die Wärme sehr gut leitet, zumindest dort wo der eingebettete Supraleiterring 4 die Wände außen unmittelbar berührt. Zur optimalen Wärme- bzw. Kälteleitung

sind an der Innenwand des Kryostatgehäuses, dort wo der Supraleiterring eingelassen ist, Nuten 13 eingefräst, so daß das durch die Kryostatkammer 3 strömende Kühlmittel, hier flüssiger Stickstoff (LN), dort gut die Wärmemenge aus dem Supraleiterring aufnehmen kann. Des weiteren ist zwischen dem Supraleiterring 4, der hier ein Hochtemperatursupraleiter ist, und den anliegenden Kryostatwänden Wärmeleitpaste für einen leichten Wärmeübergang. Der Supraleiterring ist über gleichmäßig um die Achse verteilte Schrauben 15, die in der Wand der Kryostatkammer 3 schräg zur Achse 1 eingeschraubt sind, einerseits radial und gleichzeitig axial gespannt, so daß er in sein Bett in der Kryostatwand gepreßt wird.

Sollten sich in dem Bereich des Magnetlagermoduls, dort wo der Permanentmagnet 6 gegenüberliegt, lokale Vereisungen bilden, dann berührt dort der Deckel 7 den Supraleiterring oder ist der Spalt zu klein. Durch entsprechendes Verdrehen des Einstellrings 17 kann der Deckel 7 rotationssymmetrisch hochgedrückt und damit die Spaltweite vergrößert werden, so daß lokale Vereisungen nicht mehr auftreten können. Da mit der Spaltvergrößerung auch das Schwebeverhalten verschlechtert wird, ist eine solche Maßnahme sehr sorgfältig durchzuführen.

Bezugszeichenliste

- 1 Rotorachse, Achse, Rotor
- 2 Vakuumkammer
- 3 Kryostat, Kryostatgehäuse
- 4 Supraleiterring
- 5 Stirnfläche
- 6 Permanentmagnet
- 7 Deckel
- 8 Spalt
- 9 Bolzen
- 10 Fahne
- 11 Gewindebolzen, Gewindestift
- 12 Mutter
- 13 Nut
- 14 Durchführung
- 15 Schraube
- 16 Boden
- 17 Stellring
- 18 Feststellflansch
- 19 Kühlmittelleitung
- 20 Motor/Generator
- 21 Schwungrad
- 22 Magnetlager
- 23 Armierung
- 24 Notlager
- 25 Rohrstützen
- 26 Innenrohr
- 27 Dichtring, O-Ring

Patentansprüche

1. Supraleitendes Magnetlager in Modulbauweise mit einem Permanentmagneten (6) an einem Rotor und einem coaxial zur Rotorachse (1) angeordneten Supraleiterring (4) am Stator, wobei
 - a) am Stator eine Vakuumkammer (2) angebracht ist, in der sich ein Kryostat (3) befindet,
 - b) am Kryostaten (3) der Supraleiterring (4) so eingebettet ist, daß eine Stirnfläche (5) des Supraleiterrings freiliegt und seine beiden Mantelflächen sowie seine andere Stirnfläche an der Außenseite des Kryostaten (3) wärmeleitend anliegen,
 - c) im Bereich der freiliegenden Stirnfläche (5)

des Supraleiterrings (4) der zwischen Permanentmagnetring (6) und Supraleiterring (4) befindliche Bereich des Deckels (7) der Vakuumkammer (2) dünnwandig ausgebildet ist und dort ein ringscheibenförmiger Spalt (8) zwischen Deckel (7) der Vakuumkammer (2) und freiliegender Stirnfläche (5) des Supraleiterrings (4) besteht, der in seiner Spaltbreite durch eine elastische Deformation des dünnwandigen Bereichs des Deckels (7) der Vakuumkammer (2) mit Hilfe eines Stellrings (17) an einem zwischen Boden (16) und Deckel (7) der Vakuumkammer (2) angeordneten Innenrohr (26) korrigierbar und die Korrektur durch einen Feststellflansch (18) am Boden (16) der Vakuumkammer (2) fixierbar ist,

d) um die Rotorachse (1) gleichverteilte, außerhalb des dickwandigen Bereichs des Deckels (7) verankerte Kryobefestigungen (9, 10, 11, 12) den Kryostaten (3) in Position halten.

2. Supraleitendes Magnetlager nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Kryo-Befestigungen (9, 10) aus einem mechanisch stabilen Bolzen (9) aus schlecht wärmeleitendem Material bestehen, von dessen freier Stirnseite eine Fahne (10) absteht, durch die mindestens ein am Kryostatgehäuse befestigter, parallel zur Rotorachse (1) liegender Gewindebolzen (11) ragt, der jeweils mittels zweier Muttern (12) an der Fahne (10) fixiert ist.

3. Supraleitendes Magnetlager nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Bolzen aus kunstharzvergossenen Glasfasern bestehen.

4. Supraleitendes Magnetlager nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß in der Innenwand des Kryostatgehäuses (3) im Bereich des eingebetteten Supraleiterrings (4) oberflächenvergrößernde Mittel zum Zwecke eines größeren Kälteenergie transports vom vorbeiströmenden Kühlmittel auf die Innenwand (3) gewährleistet ist.

5. Supraleitendes Magnetlager nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß die oberflächenvergrößernden Mittel Nuten (13) oder Lamellen sind.

6. Supraleitendes Magnetlager nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß der Supraleiterring (4) an seiner äußeren Mantelfläche über um die Rotorachse (1) gleichverteilte, durch die Wand des Kryostatgehäuses führende Schrauben (15) in seine dortige Einbettung gedrückt wird, um axiale Zugkräfte aufzunehmen.

7. Supraleitendes Magnetlager nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß wärmeleitwegverlängernde Durchführungen (14) zur Durchführung der Kühlmittleitungen (19) für den Kühlmittel-Zufluß und -Abfluß am Gehäuse der Vakuumkammer (2) angebracht sind.

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen 55

60

65

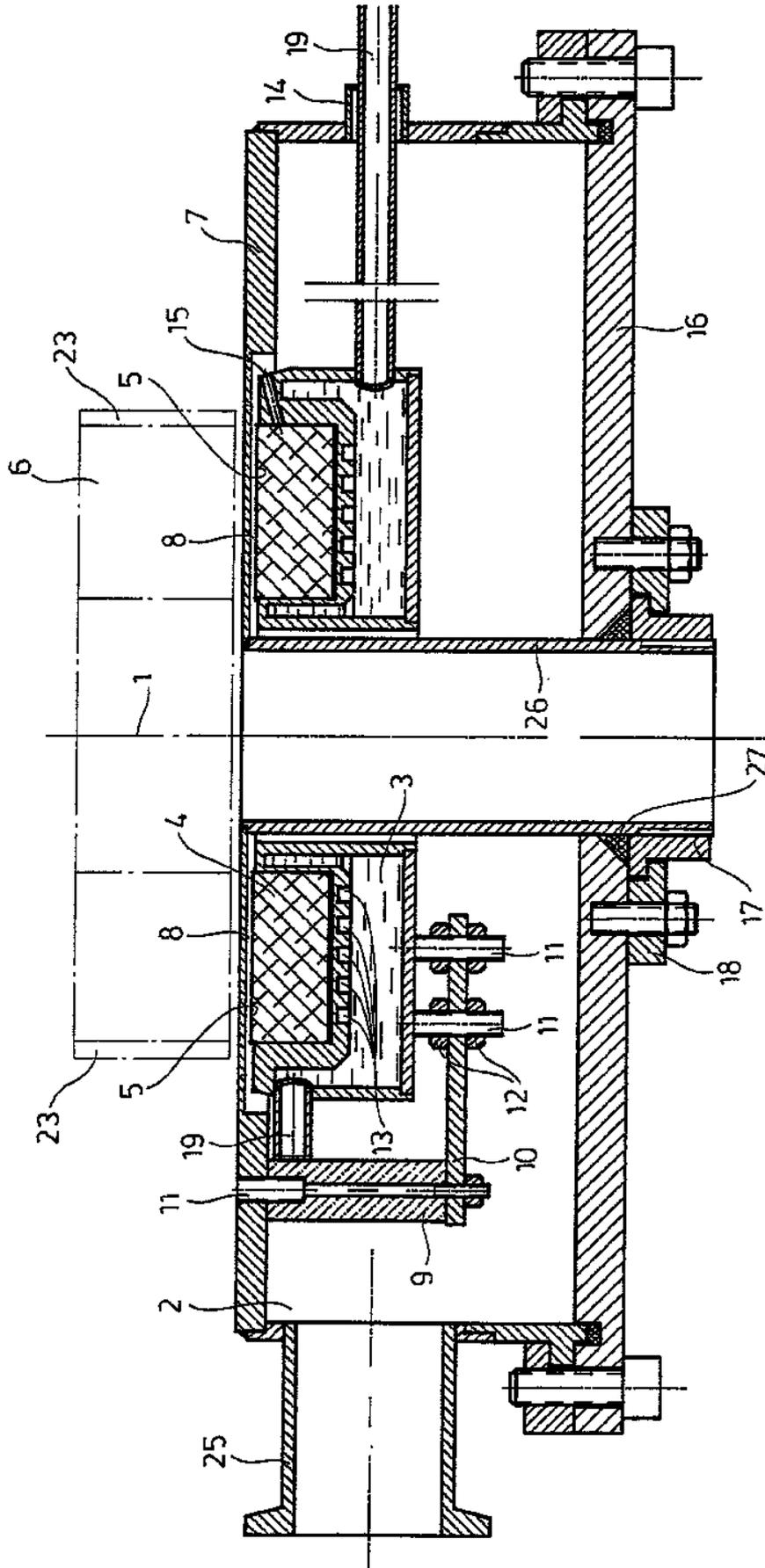


Fig. 1

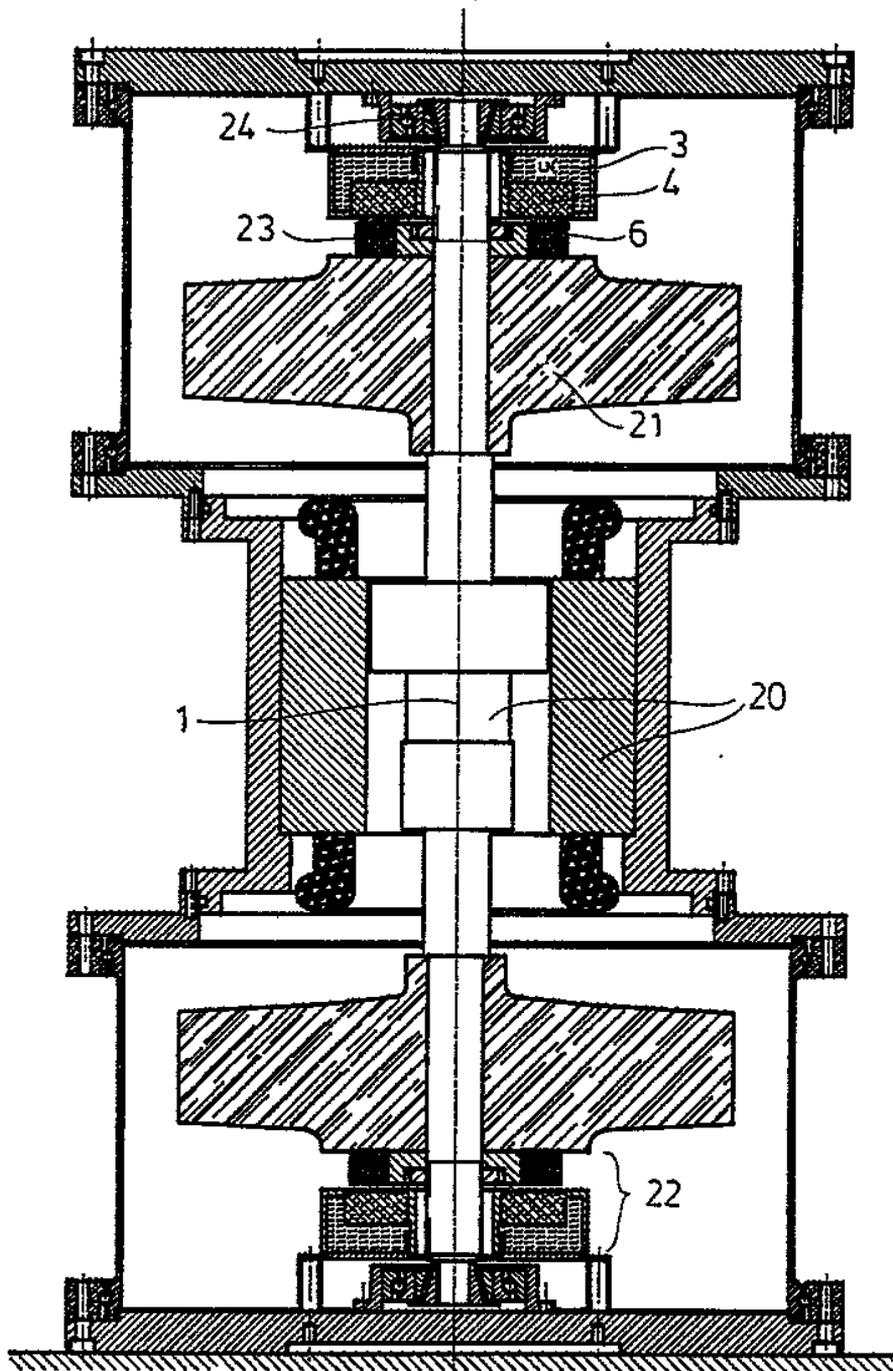


Fig. 2