(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
4. Februar 2010 (04.02.2010)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2010/012366 A2

(51) Internationale Patentklassifikation:
F16C 32/04 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2009/005003

(22) Internationales Anmeldedatum:
10. Juli 2009 (10.07.2009)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2008 036 702.8
1. August 2008 (01.08.2008) DE

(71) Anmelder *(für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US)*: **THYSSENKRUPP TRANSRAPID GMBH** [DE/DE]; Henschelplatz 1, 34127 Kassel (DE). **ROTHE ERDE GMBH** [DE/DE]; Tremoniastr. 5-11, 44137 Dortmund (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder *(nur für US)*: **ZHENG, Qinghua** [DE/DE]; Sudetenstr. 51, 82024 Taufkirchen (DE). **MILLER, Luitpold** [DE/DE]; An der Ottosäule 5, 85521 Ottobrunn (DE).

(74) Anwalt: **KIRCHNER, Sven**; Thyssenkrupp Technologies AG, Legal and Compliance, Patents, Am Thyssenhaus 1, 45128 Essen (DE).

(81) Bestimmungsstaaten *(soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart)*: AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten *(soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart)*: ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) **Title**: MAGNETIC BEARING AND METHOD FOR OPERATION THEREOF

(54) **Bezeichnung**: MAGNETLAGER UND VERFAHREN ZU DESSEN BETRIEB

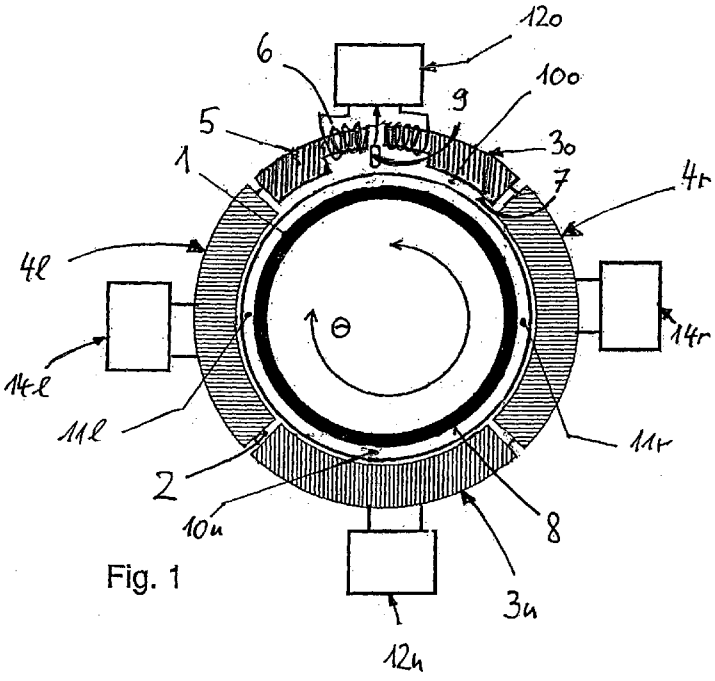


Fig. 1

(57) **Abstract**: The invention relates to a magnetic bearing and to a method for operation thereof. The magnetic bearing contains a ferromagnetic, movably mounted bearing element (1) and at least two magnetic devices (3o, 3u) arranged on opposing sides of the bearing element (1) and equipped with windings (6), wherein during operation of the magnetic bearing, electric currents are conducted through the windings (6) and these currents are regulated such that in an equilibrium state between the bearing element (1) and the two magnetic devices (3o, 3u), bearing gaps (10o, 10u) of predetermined size (So, Su) form. According to the invention, the temperatures produced in the magnetic devices (3o, 3u) during operation are measured and the regulation of the currents takes place such that in the equilibrium state, regardless of the load situation, the same temperatures appear in the magnetic devices (3o, 3u) or in the windings (6) thereof (figure 1).

(57) **Zusammenfassung**: Die Erfindung betrifft ein Magnetlager und ein Verfahren zu dessen Betrieb. Das Magnetlager enthält einen ferromagnetischen, beweglich gelagerten Lagerkörper (1) und wenigstens zwei, auf gegenüberliegenden Seiten des Lagerkörpers (1) angeordnete und mit Wicklungen (6) versehene Magnetanordnungen

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2010/012366 A2

Veröffentlicht:

— *ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe g)*

(3o, 3u), wobei während des Betriebs des Magnetlagers elektrische Ströme durch die Wicklungen (6) geleitet und diese Ströme so geregelt werden, dass sich in einem Gleichgewichtszustand zwischen dem Lagerkörper (1) und den beiden Magnetanordnungen (3o, 3u) Lagerspalte (10o, 10u) vorgewählter Größe (So, Su) bilden. Erfindungsgemäß werden die während des Betriebs in den Magnetanordnungen (3o, 3u) entstehenden Temperaturen gemessen, und die Regelung der Ströme erfolgt so, dass sich im Gleichgewichtszustand unabhängig von der Lastsituation gleiche Temperaturen in den Magnetanordnungen (3o, 3u) oder deren Wicklungen (6) einstellen (Fig. 1).

Magnetlager und Verfahren zu dessen Betrieb

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben eines Magnetlagers nach dem Oberbegriff des Anspruchs 1 sowie ein Magnetlager der im Oberbegriff des Anspruchs 7 angegebenen Gattung.

Magnetlager, die als Radial- oder Axiallager ausgebildet sein können, und Verfahren zu ihrem Betrieb gemäß den oben bezeichneten Gattungen sind in zahlreichen Varianten bekannt (z. B. Roland Steffen in "Magnetlager, Prinzip und Berechnungsgrundlagen", 2004, http://www.rolandsteffen.de).

Radiallager dieser Art dienen überwiegend der berührungslosen, radialen Lagerung von Rotationskörpern mit Hilfe von an diesen angebrachten Lagerkörpern in Form von kreisrunden Lagerringen. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass sie verschleißfrei arbeiten und keine Schmiermittel benötigen. Bevorzugte Anwendungsgebiete sind daher die Vakuum- und Medizintechnik. Bekannt sind z. B. magnetisch gelagerte Herzpumpen für die Herz-Chirurgie. Außerdem werden derartige Magnetlager aber auch z. B. in Werkzeugmaschinen, Windkraftanlagen oder medizinischen Scannern angewendet.

Die berührungslose Lagerung der Lagerringe erfolgt dadurch, dass ihre radialen Abstände von den sie tragenden, in ihrer Umfangsrichtung verteilt angeordneten, als Elektromagnete ausgebildeten Magnetanordnungen laufend mittels Sensoren ermittelt, die erhaltenen Istwerte mit Abstands-Sollwerten verglichen, die sich ergebenden Differenzwerte einem Regelkreis zugeführt und mit diesen die Ströme in den Wicklungen der Magnetanordnungen so geregelt werden, dass die Abstands-Istwerte im Wesentlichen konstant bleiben und vorgewählte Größen annehmen.

In analoger Weise sind Magnetlager in Form von Axiallagern ausgebildet. In diesem Fall ist z. B. ein auf eine Welle aufgezogener Lagerkörper zwischen wenigstens zwei axial beabstandeten Magnetanordnungen angeordnet, um durch Regelung der Größen der dadurch erhaltenen Lagerspalte die axiale Lage der Welle festzulegen.

Ein gemeinsames Merkmal der beschriebenen Magnetlager besteht darin, dass sie eine hohe Laufgenauigkeit erfordern, um beispielsweise mit einem medizinischen Scanner scharfe und reproduzierbare Bilder zu ermöglichen. Bisher werden diese Laufeigenschaften hauptsächlich dadurch beeinflusst, dass die Lagerkörper mit hoher Präzision gefertigt werden und versucht wird, auf gegenüberliegenden Seiten der Lagerkörper befindliche Lagerspalte während des Betriebs mit Hilfe der Regelung möglichst gleich groß zu halten. Das gilt unabhängig davon, ob es sich um Radial- oder Axiallager oder Kombinationen davon handelt.

Beim Betrieb derartiger Magnetlager hat sich allerdings gezeigt, dass die Temperaturentwicklung in den Magnetanordnungen bzw. deren Wicklungen eine nicht unbedeutende Rolle spielt, insbesondere wenn es sich um Großlager mit Lagerringen handelt, deren Durchmesser z. B. 500 mm, insbesondere 1000 mm und mehr betragen, wie dies z. B. für die Anwendung von Magnetlagern in medizinischen Scannern erwünscht ist. Solange derartige Lager gleichmäßig belastet werden und die Lagerspalte überall, insbesondere auf gegenüberliegenden Seiten der Lagerkörper gleich groß sein sollen, haben die Magnetanordnungen im Wesentlichen denselben Stromverbrauch und damit auch im Wesentlichen gleiche Temperaturen. Werden die Magnetlager jedoch un-

gleichmäßig belastet, indem z. B. in einer Werkzeugmaschine eine einseitige Druckerhöhung eintritt, in einer Windkraftanlage die Windstärke schwankt oder in einem Scanner aufgrund einer Schieflage, einer Gewichtsverlagerung od. dgl. die Gleichgewichtsverhältnisse verändert werden, dann führt das aufgrund der Vorschrift, dass einander gegenüberliegende Lagerspalte gleich groß sein sollen, zwangsläufig dazu, dass einander gegenüberliegende Magnetanordnungen mit unterschiedlichen elektrischen Strömen betrieben werden müssen, um dieser Vorschrift zu genügen. Dadurch ergeben sich, insbesondere bei Magnetlagern mit großen Abmessungen, entsprechend unterschiedliche, durch die elektrischen Verlustleistungen in den Wicklungen verursachte, örtliche Temperaturschwankungen, die zu unterschiedlichen Wärmedehnungen der Lagerkörper oder Magnetanordnungen führen und dadurch eine exakte Spaltregelung stark behindern, wenn nicht gar unmöglich machen.

Ausgehend davon besteht das technische Problem der vorliegenden Erfindung darin, die eingangs bezeichneten Magnetlager und Verfahren zu deren Betrieb so auszubilden, dass sich bei allen Betriebsbedingungen im Wesentlichen gleichmäßige Temperaturverteilungen ergeben.

Gelöst wird dieses Problem mit den kennzeichnenden Merkmalen der Ansprüche 1 und 7.

Die Erfindung beruht auf dem Gedanken, die Regelung der die Wicklungen der Magnetanordnungen durchfließenden Ströme in erster Linie so durchzuführen, dass den Wicklungen von gegenüberliegenden Magnetanordnungen auch dann, wenn sich die mechanische Belastung des Magnetlagers ändert, im Wesentlichen solche elektrischen Ströme zugeführt werden, dass das Auftreten unterschiedlicher Temperaturen vermieden wird. Es wird dabei in Kauf genommen, dass sich die Lagerspalte auf gegenüberliegeden Seiten der Lagerkörper dadurch geringfügig ändern können. Da jedoch die elektrische Spaltregelung mit einer sehr kleinen Zeitkonstante arbeitet, während sich eine eventuelle Temperaturänderung nur langsam auswirkt, ändert sich auch die Größe der einander gegenüberliegenden Lagerspalte nur allmählich, was für

die meisten Anwendungszwecke toleriert werden kann. Außerdem ergibt sich der Vorteil, dass dies auch dann gilt, wenn sich aus irgendwelchen Gründen die Lagerkörper oder Magnetanordnungen aufgrund äußerer Temperaturverläufe unterschiedlich erwärmen.

Weitere vorteilhafte Merkmale der Erfindung ergeben sich aus den Unteransprüchen.

Die Erfindung wird nachfolgend in Verbindung mit den beiliegenden Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 schematisch ein Magnetlager am Beispiel eines Radiallagers; und

Fig. 2 eine erfindungsgemäße Regeleinrichtung für das Magnetlager nach Fig. 1.

Fig. 1 zeigt schematisch ein Magnetlager mit einem als Innenring und Rotor ausgebildeten, in Richtung eines Doppelpfeils Θ drehbaren, ersten Lagerkörpers 1 und einem als Außenring und Stator ausgebildeten, zweiten Lagerkörper 2. Der Lagerkörper 2 ist im Ausführungsbeispiel mit vier Magnetanordnungen 3o, 3u, 4l und 4r versehen, wobei die Buchstaben "o", "u", "l" und "r" für die Zwecke der vorliegenden Anmeldung die Bedeutung "oben", "unten", "links" und "rechts" haben. Die Magnetanordnungen 3o, 3u einerseits und die Magnetanordnungen 4l, 4r andererseits sind jeweils auf gegenüberliegenden Seiten des Lagerkörpers 1 angeordnet, so dass sie zwei Paare von einander diametral gegenüberliegenden Magnetanordnungen bilden. Außerdem weist jede Magnetanordnung 3 und 4, wie in Fig. 1 schematisch nur für die Magnetanordnung 3o angedeutet ist, eine auf einen Kern 5 gewickelte Wicklung 6 auf. Magnetpolflächen 7 der Kerne 5 sind einer Umfangs- bzw. Radialfläche 8 des Lagerskörpers 1 zugeordnet und können wie üblich an deren Kontur angepasste, konkave Formen aufweisen. Der Aufbau der Magnetanordnungen 3o, 3u, 4l und 4r ist vorzugsweise gleich, weshalb nur die Magnetanordnung 3o genauer beschrieben wird.

Der Lagerkörper 1 besteht aus einem ferromagnetischen Material und wird durch die

Magnetanordnungen 3, 4 in an sich bekannter Weise radial zentriert und geführt. Außerdem kann der Lagerkörper 1 z. B. am Umfang einer Scheibe aus einem nicht ferromagnetischen Material befestigt, insbesondere auf diese aufgeschrumpft und/oder an einem zu lagernden Rotationskörper befestigt sein. Vorzugsweise ist an den beiden axialen Enden eines Rotors je ein derartiger, ein Radiallager bildender Lagerkörper 1 angebracht, während z. B. in einem mittleren Teil des Rotors ein weiterer, nicht gezeigter Lagerkörper angeordnet ist, der als Axiallager dient und mit umlaufenden Randabschnitten seiner Stirn- bzw. Axialflächen weiteren Magnetanordnungen gegenübersteht. Ebenfalls nicht dargestellt ist der Antrieb, mittels dessen der Rotor und damit auch die Lagerkörper 1 in Rotation versetzt werden. Hierzu können übliche, dem Fachmann bekannte Mittel verwendet werden.

Wie Fig. 1 weiter zeigt, ist jeder Magnetanordnung 3, 4 ein vorzugsweiser induktiver Sensor 9 zugeordnet, der die Istwerte der Größe bzw. Dicke eines Lager- bzw. Luftspalts misst, der sich beim Betrieb des Magnetlagers, d. h. beim Drehen des Lagerkörpers 1, zwischen dessen Umfangs- bzw. Radialfläche 8 und den Polflächen 7 der zugeordneten Magnetanordnung 3, 4 bildet. In Analogie zu den Magnetanordnungen 3o, 3u, 4l, 4r sind die Lagerspalte in Fig. 1 mit den Bezugszeichen 10o, 10u, 11l und 11r bezeichnet.

Die Ausgangssignale der Sensoren 10 und 11 werden je einer vereinfacht dargestellten Regeleinheit 12o, 12u, 14l, 14r zugeführt und in dieser mit einem vorgegebenen Sollwert verglichen. Aus der Differenz beider Signale wird ein Stellsignal abgeleitet, das einer den Strom durch die betreffende Wicklung steuernden Stromsteller zugeführt wird. Dadurch wird der Wicklungsstrom und damit die am Ort des Sensors 9 auf den Lagerkörper 1 wirkende Magnetkraft so gesteuert, dass die Größe der Lagerspalte 10, 11 trotz etwaiger geometrischer Unwuchten im Lagerring 1 im Wesentlichen den gewünschten Sollwert annimmt. Diese Art der Regelung ist für alle Magnetanordnungen 3, 4 vorzugsweise dieselbe.

Magnetlager dieser Art und Verfahren zu deren Betrieb sind allgemein und z. B. aus

der eingangs genannten Druckschrift bekannt, die daher zur Vermeidung von Wiederholungen durch Referenz auf sie zum Gegenstand der vorliegenden Offenbarung gemacht wird.

Herkömmliche Magnetlager (Fig. 1) werden in der Weise betrieben, dass mit Hilfe der Regeleinheiten 12, 14 versucht wird, die Größen der Lagerspalte 10o, 10u einerseits und 11l, 11r andererseits exakt gleich zu machen. Dies kann, solange der Lagerkörper 1 beim Betrieb unter Nominalbedingungen in Richtung aller vorhandenen Magnetanordnungen 3, 4 im Wesentlichen gleichmäßig belastet wird und daher nur etwaige Unwuchten od. dgl. auszugleichen sind, dadurch erreicht werden, dass den Wicklungen 6 aller Magnetanordnungen 3, 4 mit Hilfe der Regeleinheiten 12, 14 im Mittel gleich große elektrische Ströme zugeführt werden. Das hat zur Folge, dass alle Wicklungen 6 und Magnetanordnungen 3, 4 auch im Mittel gleiche Betriebstemperaturen annehmen. Dasselbe kann erreicht werden, wenn der Lagerkörper 1 unter Nominalbedingungen z. B. aufgrund seines Eigengewichts in der einen oder anderen Richtung stärker als in der entgegengesetzten Richtung belastet wird und daher die einander gegenüberliegenden Magnetanordnungen 3o, 3u und/oder 4l, 4r unterschiedlich ausgelegt werden, um auch unter solchen Nenn- bzw. Nominalbedingungen mit im wesentlichen gleichen Strömen gleich große Spalte zu erhalten.

Wird der Lagerkörper 1 dagegen in irgendeiner Richtung stärker als unter Nominalbedingungen belastet, d. h. ändert sich die Lastsituation gegenüber den Nominalbedingungen, dann muss durch die entsprechende Wicklung 6 ein stärkerer Strom als durch die ihr gegenüberliegende Wicklung geleitet werden, um diese stärkere Belastung zu kompensieren, was aufgrund einer entsprechend vergrößerten Verlustleistung mit einer erhöhten Erwärmung der betreffenden Wicklung 6 bzw. Magnetanordnung 3, 4 verbunden ist. Das ist aus den eingangs genannten Gründen unerwünscht und wird erfindungsgemäß durch die nachfolgend erläuterte Betriebsweise vermieden.

Es sei angenommen, dass die beiden gegenüberliegenden Magnetanordnungen 3o, 3u ein erstes Paar von Magnetanordnungen bilden und der Lagerspalt 10o die Größe So,

der Lagerspalt 10u dagegen die Größe Su besitzt. Die Regelung der die Wicklungen 6 dieser Magnetanordnungen 3o, 3u durchfließenden Ströme wird unter Nominalbedingungen, d. h. im Normalfall, in dem keine außergewöhnliche Belastung auftritt, nach der Vorschrift So - Su = 0 durchgeführt. Hierzu dienen die beiden Regeleinheiten 12o und 12u, die in Fig. 2 genauer dargestellt sind.

Gemäß Fig. 2 enthält die Regeleinheit 12o für die in Fig. 1 obere Magnetanordnung 3o einen Spaltsensor 9o, dessen Ausgangssignale, die für die Istwerte des Lagerspalts 10o charakteristisch sind, einem Regler 15o zugeführt werden. Dessen Ausgang ist mit einem Stromsteller 16o verbunden, der den der Wicklung 6 der Magnetanordnung 3o zuzuführenden Strom liefert. Der Regler 15o vergleicht die Istwerte des Sensors 9o mit einem über eine Leitung 17o zugeführten Sollwert und führt dem Stromsteller 16o ein aus der Differenz abgeleitetes Steuersignal zu.

Fig. 2 zeigt weiter, dass die Regeleinheit 12u für die in Fig. 1 untere Magnetanordnung 3u entsprechend ausgebildet ist, weshalb deren Teile mit gleichen Bezugsziffern, jedoch zusätzlich mit dem Buchstaben "u" bezeichnet sind. Außerdem ist aus Fig. 2 ersichtlich, dass die Istwerte des Sensors 9o über eine Leitung 18o auch dem Regler 15u und die Istwerte des Sensors 9u über eine Leitung 18u auch dem Regler 15o zugeführt werden.

In den Reglern 15o und 15u werden die Istwerte der Spalte 10o und 10u miteinander verglichen und nach der oben genannten Vorschrift So - Su = 0 in Steuersignale für die Stromsteller 16o, 16u umgewandelt. Der Sollwert "0" für die Differenz So - Su wird dabei von je einem Ausgang eines Temperaturreglers 19 festgelegt. Dieser weist zwei Eingänge auf, denen über Leitungen 20o, 20u die Istwerte von Temperaturen zugeführt werden, die sich beim laufenden Betrieb des Magnetlagers in den Magnetanordnungen 3o, 3u oder deren Wicklungen 6 ergeben und mittels Temperatursensoren 21o, 21u ermittelt werden, die in Fig. 2 schematisch angedeutet und mit den Leitungen 20o, 20u verbunden sind. Der Temperaturregler 19 vergleicht die Istwerte der beiden Temperaturen miteinander und gibt an seinen Ausgängen jeweils einen

Sollwert von 0 aus, solange die Istwerte beider Temperatursensoren 21o, 21u gleich sind.

Ändert sich die Lastsituation, d. h. wird der Lagerkörper 1 beim Betrieb des Magnetlagers, ausgehend von den Nominalbedingungen, ungleichmäßig belastet, indem er z. B. durch eine Kraft in Fig. 1 zusätzlich nach unten gezogen oder aus anderen Gründen stärker in Richtung der Magnetanordnung 3u als in Richtung der Magnetanordnung 3o gedrückt wird, dann hat dies bei der beschriebenen Regelung zur Folge, dass der Wicklung 6 der Magnetanordnung 3o automatisch ein größerer Strom als der Magnetanordnung 3u zugeführt wird, da jetzt die obere Magnetanordnung 3o eine größere Kraft auf den Lagerkörper 1 ausüben muss, um die Bedingung So - Su = 0 zu erfüllen. Das hat jedoch die bereits oben beschriebene Folge, dass sich die obere Magnetanordnung 3o oder deren Wicklung 6 stärker als die untere Magnetanordnung 3u oder deren Wicklung 6 erwärmt, was zu unterschiedlichen und damit unerwünschten Wärmedehnungen des Lagerkörpers 1 führen kann, die eine nicht tolerierbare Unrundheit des Lagerkörpers 1 bewirken und den Regelvorgang stören könnten.

Erfindungsgemäß wird daher für diesen Fall vorgeschlagen, die Regeleinrichtung auf die Vorschrift So - Su = a umzustellen, wobei $a < 0$ gilt. Diese Umstellung wird automatisch durchgeführt, wenn sich die von den Temperatursensoren 21o, 21u gelieferten Istwerte der Temperaturen um einen gewissen Mindestwert voneinander unterscheiden. Die Vorschrift So - Su = a oder So = Su + a mit $a < 0$ bedeutet, dass die Größe So des oberen Lagerspalts 10o kleiner als die Größe des unteren Lagerspalts Su gemacht werden soll. Demzufolge gibt der Temperaturregelkreis 19 an die Leitungen 17o, 17u entsprechende Signale als Sollwerte für die Regler 15o, 15u aus, so dass diese die Stromsteller 16o, 16u jetzt derart steuern, dass sich ein Gleichgewichtszustand mit den neuen Spaltgrößen So und Su + a einstellt.

Dadurch, dass im beschriebenen Fall die Größe des Spalts 10o kleiner als die Größe des Spalts 10u gewählt wird, muss der Wicklung 6 der oberen Magnetanordnung 3o etwas weniger und der Wicklung 6 der unteren Magnetanordnung 3u etwas mehr

Strom zugeführt werden, als ohne diese Regelung gelten würde, damit beide Magnetanordnungen 3o, 3u im Gleichgewichtszustand dieselbe Kraft auf den Lagerkörper 1 ausüben. Dadurch wird erreicht, dass dieser Gleichgewichtszustand mit solchen Strömen erhalten wird, die wiederum zu gleichen Temperaturen in beiden Magnetanordnungen 3o, 3u bzw. deren Wicklungen 6 führen. Mit anderen Worten wird der Wert a so gewählt, dass beide Magnetanordnungen 3o, 3u oder deren Wicklungen 6 trotz der unterschiedlichen Spaltgrößen So und Su im Mittel dieselben Temperaturen annehmen. Erfindungsgemäß wird somit zugunsten der Temperaturgleichheit auf eine exakte Gleichheit der Spaltgrößen verzichtet und sichergestellt, dass unabhängig von der speziellen Lastsituation gleiche Temperaturen in den Magnetanordnungen 3o, 3u oder Wicklungen 6 erhalten werden.

Im Übrigen ist klar, dass die Wicklung 6 der oberen Magnetanordnung 3o vor dem Erreichen des Gleichgewichtszustands kurzzeitig mit einem höheren Strom betrieben werden muss, um den Lagerkörper 1 entsprechend der reduzierten Spaltgröße S1 an sich heranzuziehen. Dieser Vorgang läuft allerdings sehr schnell ab und hat keinen wesentlichen Einfluss auf die Temperatur der Magnetanordnung 3o oder deren Wicklung 6.

Die unterschiedlichen Spaltgrößen, die sich bei der beschriebenen Regelung im Gleichgewichtszustand und unter der veränderten Lastsituation vergleichsweise wenig voneinander unterscheiden, und die damit verbundenen, geringfügigen Lageabweichungen des Lagerkörpers 1 im Lagerkörper 2 sind für den Betrieb des Magnetlagers in den meisten Fällen tolerierbar. Da die elektrische Spaltregelung durchweg relativ schnell erfolgt (z. B. im kHz-Bereich), während sich Temperaturänderungen demgegenüber vergleichsweise langsam auswirken (z. B. im Minutenbereich), können vom Temperaturregelkreis 19 vorgegebene Änderungen keine wesentlichen Auswirkungen auf die von den Reglern 15o, 15u durchzuführenden Regelvorgänge haben.

Ist, wie Fig. 1 zeigt, außer dem Paar mit den Magnetanordnungen 3o, 3u wenigstens ein weiteres Paar mit den Magnetanordnungen 4l, 4r vorhanden, dann sind diese

ebenso wie die zugehörigen Regeleinheiten 14l, 14r vorzugsweise genauso ausgebildet, wie oben für die Magnetanordnungen 3o, 3u und die Regeleinheiten 12o, 12u beschrieben ist. Dadurch wird erreicht, dass bei Belastungen des Lagerkörpers 1 in Richtung einer der Magnetanordnungen 4l, 4r ebenfalls auf exakt gleich große Lagerspalte 11l, 11r zugunsten von gleichen Temperaturen in den beiden Magnetanordnungen 4l, 4r bzw. deren Wicklungen 6 verzichtet wird.

Ein bisher für am besten gehaltenes Ausführungsbeispiel der Erfindung sieht vor, dass nicht nur die Temperaturen der sich jeweils gegenüberliegenden Magnetanordnungen 3o und 3u einerseits und/oder 4l und 4r andererseits auf gleiche Werte geregelt werden, sondern die Ströme durch die Wicklungen 6 aller beteiligten Magnetanordnungen 3o, 3u, 4l und 4r im Mittel gleich gemacht werden. Dies kann, wie Fig. 2 zeigt, z. B. dadurch erreicht werden, dass dem Temperaturregelkreis 19 des zuerst beschriebenen Paars von Magnetanordnungen 3o, 3u auch die Temperatur-Istwerte von Temperatursensoren 21l, 21r des anderen Paars von Magnetanordnungen 4l, 4r zugeführt werden und die den Wicklungen 6 dieser Magnetanordnungen 3o, 3u zugeführten Ströme im gleichen Maß, d. h. ohne Änderung der Regelvorschrift So - Su = a so vergrößert oder verkleinert werden, dass sich dieselben Temperaturen wie den Magnetanordnungen 4l, 4r bzw. deren Wicklungen 6 ergeben. Eine einfache Möglichkeit hierzu besteht z. B. darin, die Vorspannungen der Regler 15o, 15u entsprechend zu ändern, wenn die mittlere Temperatur, die von den Temperatursensoren 21o, 21u für das Paar 3o, 3u gemeldet wird, um ein vorgewähltes Maß von der mittleren Temperatur abweicht, die von den Temperatursensoren 21l, 21r für das Paar 4l, 4r gemeldet wird. In analoger Weise kann hinsichtlich der in Fig. 2 nicht dargestellten Regeleinrichtungen für die Magnetanordnungen 4l, 4r vorgegangen werden.

Die beschriebenen Regelungen werden vorzugsweise mit üblichen Mikroprozessoren und einer entsprechenden Software realisiert. Da derartige Regelungen und Regelverfahren dem Fachmann geläufig sind, ist eine weitere Erläuterung nicht erforderlich.

Als Mittel zur Ermittlung der Temperaturen sind in Fig. 2 übliche Temperatursenso-

ren 21o bis 21r dargestellt. Besonders vorteilhaft ist es in diesem Zusammenhang, wenn die Ermittlung der Betriebstemperaturen stattdessen indirekt über die elektrischen Widerstände der Wicklungen 6 erfolgt. Die Ermittlung dieser Widerstände kann z. B. über die u. U. bekannten Strom- und Spannungswerte der Wicklungen 6 erfolgen. Aus der bekannten oder vorher ermittelten Temperaturabhängigkeit der Widerstände des Wicklungsmaterials kann dann die Temperatur bestimmt werden.

Die Erfindung ist nicht auf die beschriebenen Ausführungsbeispiele beschränkt, die auf vielfache Weise abgewandelt werden können. Der im Ausführungsbeispiel als Ring oder Zylinder dargestellte Lagerkörper 1 kann sowohl als Innenring, wie in Fig. 1 gezeigt, als auch als Außenring ausgebildet werden. Außerdem kann das Magnetlager statt als Radiallager auch als Axiallager ausgebildet und/oder mit einem Lagerkörper versehen sein, der in anderer Weise als drehbar geweglich gelagert ist. Weiterhin ist klar, dass die Magnetanordnungen 3o, 3u, 4l, 4r nur ein Ausführungsbeispiel darstellen. Tatsächlich können auch mehr oder weniger als vier Magnetanordnungen am Umfang des Lagerkörpers 1 angeordnet und/oder mehr als zwei Paare von jeweils gegenüberliegend angeordneten Magnetanordnungen vorgesehen sein. Außerdem kann jede Magnetanordnung aus einer Mehrzahl von in Umfangsrichtung des Lagerkörpers 1 nebeneinander liegenden Kernen und Wicklungen bestehen. Ferner können mehr oder weniger und anders ausgebildete und angeordnete Sensoren 9 und 21 vorgesehen werden. Weiterhin können die beschriebenen Regeleinheiten anders ausgebildet sein und andere Regelstrategien verwendet werden, um gleiche Temperaturen in gegenüberliegenden Magnetanordnungen oder Wicklungen zu erhalten. Insbesondere können die Regeleinheiten 12o, 12u, 14l, 14r für alle vorhandenen Paare von Magnetanordnungen und die zugehörigen Temperaturregelkreise 19 zu einer gemeinsamen Regeleinrichtung zusammengefasst werden. Im Übrigen ist klar, dass die Bezeichnung "gleich" für die Temperaturen, Ströme und Lagerspalte nicht nur identische, sondern auch im Wesentlichen gleiche Werte umfassen soll. Auch für Großlager, deren Lagerkörper beträchtlichen Temperaturdehnungen unterliegen können und auf die die Erfindung besonders vorteilhaft angewendet wird, kann es ausreichen, die Temperaturen von gegenüberliegenden Magnetanordnungen derart aneinander anzunähern, dass

die Wärmedehnungen innerhalb vorgewählter Toleranzen bleiben. Schließlich versteht sich, dass die verschiedenen Merkmale auch in anderen als den beschriebenen und dargestellten Kombinationen angewendet werden können.

Ansprüche

1. Verfahren zum Betreiben eines Magnetlagers, das einen ferromagnetischen, beweglich gelagerten Lagerkörper (1) und wenigstens zwei, auf gegenüberliegenden Seiten des Lagerkörpers (1) angeordnete und mit Wicklungen (6) versehene Magnetanordnungen (3o, 3u) enthält, wobei während des Betriebs des Magnetlagers elektrische Ströme durch die Wicklungen (6) geleitet und diese Ströme so geregelt werden, dass sich in einem Gleichgewichtszustand zwischen dem Lagerkörper (1) und den beiden Magnetanordnungen (3o, 3u) Lagerspalte (10o, 10u) vorgewählter Größe (So, Su) bilden, dadurch gekennzeichnet, dass die während des Betriebs in den Magnetanordnungen (3o, 3u) entstehenden Temperaturen gemessen werden und die Regelung der Ströme so erfolgt, dass sich im Gleichgewichtszustand unabhängig von der Lastsituation gleiche Temperaturen in den Magnetanordnungen (3o, 3u) oder deren Wicklungen (6) einstellen.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass für den Fall, dass der Lagerkörper (1) während des Betriebs in Richtung der beiden Magnetanordnungen (3o, 3u) unter Nominalbedingungen betrieben wird, die Regelung für die Größen (So, Su) der Lagerspalte (10o, 10u) nach der Vorschrift So - Su = 0 durchgeführt wird, indem durch die Wicklungen (6) beider Magnetanordnungen (3o, 3u) solche Ströme geleitet werden, dass sich sowohl gleich große Lagerspalte (10o, 10u) als auch in beiden Magnetanordnungen (3o, 3u) oder deren Wicklungen (6) gleiche Temperaturen ergeben.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass für den Fall, dass der Lagerkörper (1) während des Betriebs in Richtung einer der beiden Magnetanordnungen (z. B. 3u) stärker als unter Nominalbedingungen belastet wird, auf eine Regelung für die Größen (So, Su) der Lagerspalte (10o, 10u) nach der Vorschrift So - Su = a mit a < 0 umgestellt wird, um einen Gleichgewichtszustand herzustellen, in dem solche Ströme durch die Wicklungen (6) beider Magnetanordnungen (3o, 3u) fließen, dass deren Temperaturen gleich groß sind, während sich die Größen (So, Su)

der Lagerspalte (10o, 10u) um das Maß a voneinander unterscheiden.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass beim Vorhandensein von mehr als zwei Magnetanordnungen (3o, 3u, 4l, 4r), die eine Mehrzahl von Paaren aus auf gegenüberliegenden Seiten des Lagerkörpers (1) angeordneten Magnetanordnungen (3o, 3u bzw. 4l, 4r) bilden, die Regelung für alle diese Paare entsprechend wenigstens einem der Ansprüche 1 bis 3 durchgeführt wird.

5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Ströme durch die Wicklungen (6) aller Paare von Magnetanordnungen (3o, 3u, 4l, 4r) ohne Änderung der jeweiligen Regelvorschrift so geregelt werden, dass alle Magnetanordnungen (3o, 3u, 4l, 4r) ohne deren Wicklungen (6) gleiche Durchschnittstemperaturen annehmen.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Temperaturen in den Magnetanordnungen (3o, 3u, 4l, 4r) durch Ermittlung der elektrischen Widerstände ihrer Wicklungen (6) bestimmt werden.

7. Magnetlager mit einem ferromagnetischen, beweglich gelagerten Lagerkörper (1), wenigstens zwei, auf gegenüberliegenden Seiten des Lagerkörpers (1) angeordneten und mit Wicklungen (6) versehenen Magnetanordnungen (6o, 6u) und je einer mit der Wicklung (6) verbundenen Regeleinheit (12o, 12u) zur Regelung von die Wicklungen (6) durchfließenden elektrischen Strömen derart, dass sich beim Betrieb ein Gleichgewichtszustand mit Lagerspalten (10o, 10u) vorgewählter Größe (So, Su) einstellt, dadurch gekennzeichnet, dass die Regeleinheiten (12o, 12u) Mittel zur Ermittlung von Betriebstemperaturen der Magnetanordnungen (3o, 3u) bzw. deren Wicklungen (6) aufweisen und zur derartigen Regelung der Ströme eingerichtet sind, dass sich im Gleichgewichtszustand unabhängig von der Lastsituation gleiche Betriebstemperaturen in den Magnetanordnungen (3o, 3u) oder deren Wicklungen (6) einstellen.

8. Magnetlager nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Regeleinheiten (12o, 12u), wenn der Lagerkörper (1) während des Betriebs in Richtung der beiden

Magnetanordnungen (3o, 3u) unter Nominalbedingungen betrieben wird, nach der Vorschrift So - Su = 0 für die Größen (So, Su) der Lagerspalte (10o, 10u) arbeiten.

9. Magnetlager nach Anspruch 7 oder 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Regeleinheiten (12o, 12u), wenn der Lagerkörper (1) während des Betriebs in Richtung einer der beiden Magnetanordnungen (z. B. 3u) stärker als unter Nominalbedingungen belastet wird, nach der Vorschrift So - Su = a mit a < 0 für die Größen (So, Su) der Lagerspalte (10o, 10u) und derart arbeiten, dass ein Gleichgewichtszustand erhalten wird, in dem solche Ströme durch die Wicklungen (6) beider Magnetanordnungen (3o, 3u) fließen, dass deren Temperaturen gleich groß sind, während sich die Größen (So, Su) der Lagerspalte (10o, 10u) um das Maß a voneinander unterscheiden.

10. Magnetlager nach einem der Ansprüche 7 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass die Regeleinheiten (12o, 12u), wenigstens je einen Spaltsensor (9o, 9u) für jede der beiden Magnetanordnungen (3o, 3u) und einen mit diesem verbundenen Regler (15o, 15u) aufweisen, dem je ein Sollwert für die Regelung der Spaltgröße (So, Su) zugeführt wird.

11. Magnetlager nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Regeleinheiten (12o, 12u) mit einem Temperaturregelkreis (19) verbunden sind, der mit den Mitteln zur Temperaturermittlung verbundene Eingänge und die Sollwerte ausgebende Ausgänge aufweist.

12. Magnetlager nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass an den Ausgängen des Temperaturregelkreises (19), wenn beide Magnetanordnungen (3o, 3u) gleiche Betriebstemperaturen haben, Sollwerte entsprechend der Vorschrift So - Su = 0 und, wenn beide Magnetanordnungen (3o, 3u) ungleiche Betriebstemperaturen haben, Sollwerte entsprechend der Vorschrift So - Su = a mit a < 0 erscheinen.

13. Magnetlager nach einem der Ansprüche 7 bis 12, dadurch gekennzeichnet, dass es mehr als zwei Magnetanordnungen, die eine Mehrzahl von Paaren aus auf gegenüber-

liegenden Seiten des Lagerkörpers (1) angeordneten Magnetanordnungen (3o, 3u bzw. 4l, 4r) bilden, und mit diesen verbundene, weitere Regeleinheiten (14l, 14r) enthält, die wie die Regeleinheiten (12o, 12u) nach wenigstens einem der Ansprüche 7 bis 12 eingerichtet und betreibbar sind.

14. Magnetlager nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass die Regeleinheiten (12o, 12u; 14l, 14r) so eingerichtet sind, dass die Ströme durch die Wicklungen (6) aller Paare von Magnetanordnungen (3o, 3u; 4l, 4r) ohne Änderung der jeweiligen Regelvorschrift derart geregelt werden, dass alle Magnetanordnungen (3o, 3u; 4l, 4r) gleiche Durchschnittstemperaturen annehmen.

15. Magnetlager nach einem der Ansprüche 7 bis 14, dadurch gekennzeichnet, dass die Ermittlung der Betriebstemperaturen über die elektrischen Widerstände der Wicklungen (6) der Magnetanordnungen (3o, 3u; 4l, 4r) erfolgt.

16. Magnetlager nach einem der Ansprüche 7 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass der Lagerkörper (1) ein zylindrischer Lagerring ist und die Magnetanordnungen (3o, 3u; 4l, 4r) am Umfang des Lagerrings angeordnet sind.

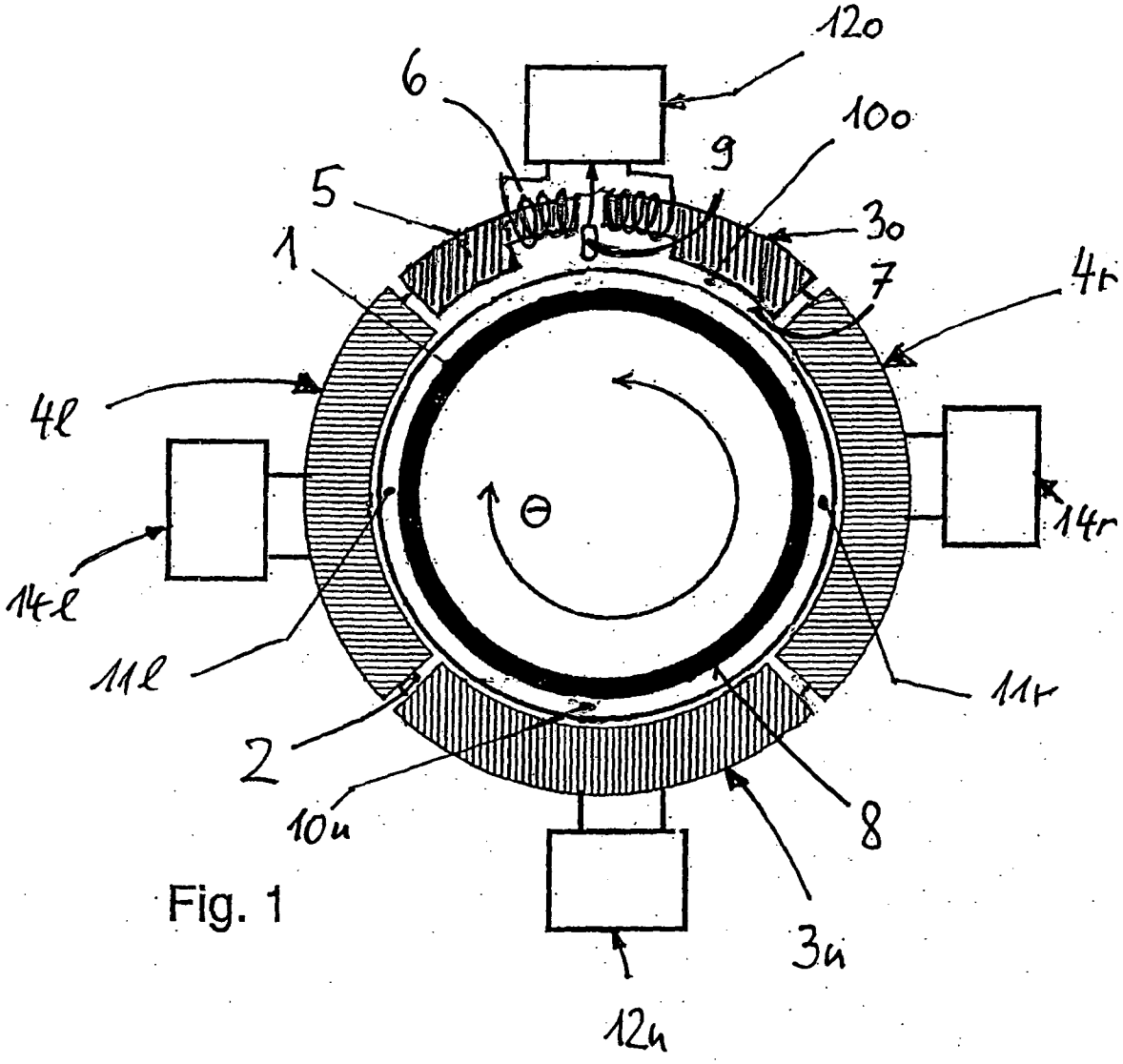


Fig. 1

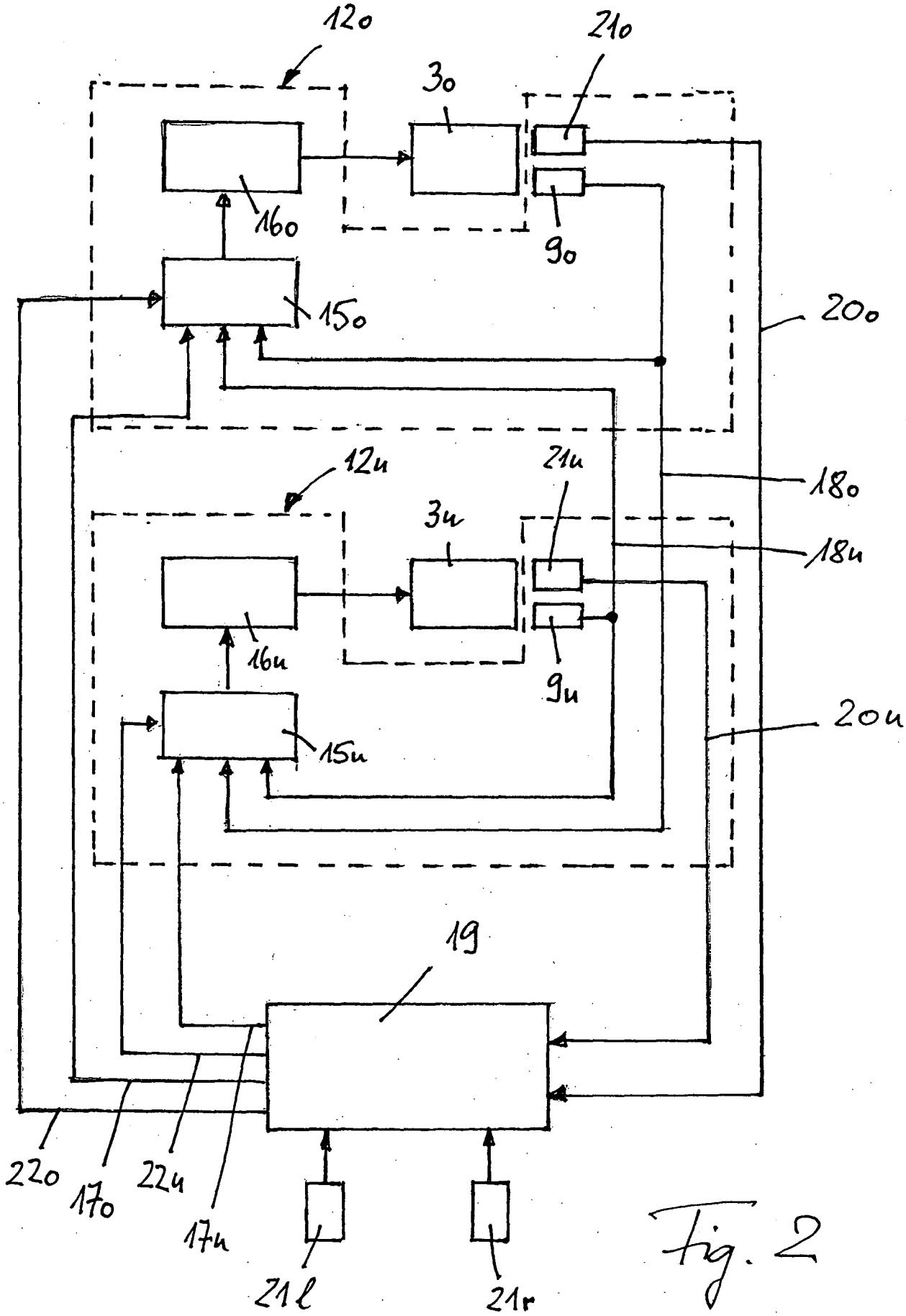

12o
21o
3o
16o
9o
15o
20o
12u
21u
18o
3u
18u
16u
9u
15u
20u
19
22o
17o
22u
17u
21l
21r

Fig. 2