



(10) **DE 10 2009 023 324 B4** 2012.02.16

(12)

## Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2009 023 324.5**  
(22) Anmeldetag: **29.05.2009**  
(43) Offenlegungstag: **02.12.2010**  
(45) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung: **16.02.2012**

(51) Int Cl.: **F16C 32/04 (2006.01)**  
**G05B 13/02 (2006.01)**

Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:  
**Continental Automotive GmbH, 30165, Hannover, DE**

(72) Erfinder:  
**Bachmaier, Georg, 80538, München, DE;**  
**Bergmann, Dominik, 83679, Sachsenkam, DE;**  
**Gerlich, Matthias, Dr., 80333, München, DE; Tump,**  
**Christian, 80469, München, DE**

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

**US 6 404 154 B2**  
**JP 2001 182 747 A**

**J. De Miras et al.: "A Vector Oriented Control  
for a Magnetically Levitated Shaft" IN: IEEE  
Transaction on Magnetics, Vol 34, No. 4, July 1998**

**Kraftfahrtechnisches Handbuch 22. Auflage  
Bosch**

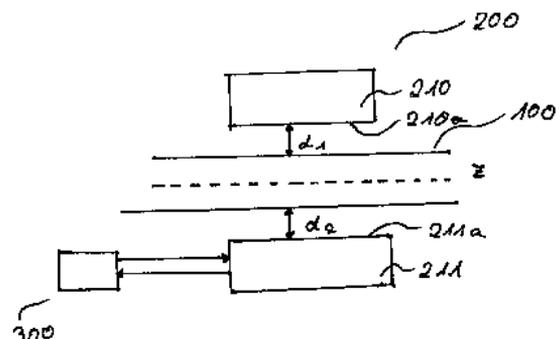
**N. Skricka: "Entwicklung eines sensorlosen  
aktiven Magnetlagers". In: Fortschritt-Berichte  
VDI Reihe 8 Nr.1027 VDI-Verlag 2004**

**[www.wikipedia.de-Steuergerät](http://www.wikipedia.de-Steuergerät)**

(54) Bezeichnung: **Aktiv geregeltes radiales Magnetlager**

(57) Hauptanspruch: Aktiv geregeltes radiales Magnetlager,  
aufweisend:

- eine Rotorwelle (100),
- einen Lagermagneten (200) mit mindestens einer ersten Spule (210) und einer zweiten Spule (211), welche radial zur Rotorwelle (100) positioniert sind, so dass durch die Magnetkraft der Spulen (210, 211) die Rotorwelle (100) berührungslos gelagert ist, und
- eine Einrichtung (300), welche ausgehend von einem in den Spulen des Lagermagneten erzeugten Sensorsignal die Lage der Rotorwelle (100) so regelt, dass diese im berührungslosen Zustand zwischen den Spulen (210, 211) stabilisiert ist, dadurch gekennzeichnet, dass die Rotorwelle (100), im Querschnitt gesehen, eine Asymmetrie in Form einer definierten Abweichung von der Kreisform aufweist, so dass bei einer Rotation der Rotorwelle (100) um ihre Längsachse Z zusätzlich ein zyklisches Signal in den Spulen (210, 211) des Lagermagneten (200) erzeugt wird, das einen Bestandteil des Sensorsignals darstellt und dass das so in den Spulen erzeugte zyklische Signal als Referenzsignal zur...



### Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein aktiv geregeltes radiales Magnetlager. Derartige Magnetlager werden insbesondere im Bereich der Kraftfahrzeugindustrie eingesetzt.

**[0002]** Für die aktive Lageregelung eines radialen Magnetlagers wird Information bezüglich der aktuellen Position eines Rotors des Magnetlagers benötigt. Hierfür werden gegenwärtig beispielsweise spezielle Wegsensoren (kapazitative Sensoren, optische Sensoren oder Wirbelstromsensoren) eingesetzt. Diese erfassen im Fall radialer Magnetlager die radiale Position der Rotorwelle zwischen zwei oder mehreren radial zu dieser Welle gelagerten Magneten.

**[0003]** Um den Einsatz eines speziellen Wegsensors zu vermeiden, ist es möglich, über die Induktivität der Spulen des Magnetlagers die Breite des Luftspalts zwischen Rotorwelle und radialen Magneten im Lager zu ermitteln. Aufgrund der zahlreichen parasitären Einflüsse in Bezug auf die Spuleninduktivität, wie beispielsweise einer Änderung des Ohmschen Widerstandes der Spule oder Änderungen der magnetischen Eigenschaften der eingesetzten Materialien aufgrund von Temperatureinflüssen, ist diese Art der Messung jedoch häufig ungenau. Dies wird beispielsweise dargestellt von N. Skricka in „Entwicklung eines sensorlosen aktiven Magnetlagers“, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 1027, VDI Verlag 2004.

**[0004]** Eine Möglichkeit, trotz dieser Einflüsse eine möglichst sichere Positionsbestimmung durchzuführen, liegt in einer so genannten „virtuellen Positionsbestimmung“, gemäß der in einer Steuereinrichtung parallel zur physikalisch vorhandenen Regelstrecke des Magnetlagers ein virtuelles Modell derselben errechnet wird, mittels dessen beispielsweise die radiale Rotorwellenposition ermittelt werden kann.

**[0005]** Es ist die Aufgabe der Erfindung, ein aktiv geregeltes radiales Magnetlager anzugeben, gemäß dem die radiale Positionsbestimmung mit verbesserter Genauigkeit ohne den Einsatz spezieller Wegsensoren ausgeführt werden kann. Darüber hinaus ist es Aufgabe der Erfindung, ein entsprechendes Verfahren zur aktiven Regelung eines radialen Magnetlagers anzugeben.

**[0006]** Die Aufgabe wird erfindungsgemäß durch ein aktiv geregeltes radiales Magnetlager nach Anspruch 1 sowie ein Verfahren zur Regelung nach Anspruch 11 gelöst. Bevorzugte Ausführungsformen sind in den Unteransprüchen angegeben.

**[0007]** Ein aktiv geregeltes axiales Magnetlager weist gemäß einer Ausführungsform der Erfindung Folgendes auf: eine Rotorwelle, einen Lagermagne-

ten mit mindestens einer ersten Spule und einer zweiten Spule, welche radial zur Rotorwelle positioniert sind, so dass durch die Magnetkraft der Spulen die Rotorwelle berührungslos gelagert ist, und eine Steuereinrichtung (im übergeordneten Sinne eines Steuergerätes, siehe auch Kraftfahrtechnisches Taschenbuch, Bosch, 22. Auflage, Seite 165 ff, Weltbild GmbH, 2004), welche dafür ausgelegt ist, also eine Einrichtung aufweist, die ausgehend von einem Sensorsignal der Spulen die Lage der Rotorwelle so regelt, dass diese im berührungslosen Zustand zwischen den Spulen stabilisiert ist. Dabei weist die Rotorwelle, im Querschnitt gesehen, eine Asymmetrie auf, so dass bei einer Rotation der Rotorwelle um ihre Längsachse Z ein zyklisches Signal in den Spulen des Lagermagneten erzeugt wird, wobei das zyklische Signal einen Bestandteil des Sensorsignals für die Einrichtung, welche die Lage der Rotorwelle regelt, bildet.

**[0008]** An den Spulen des Lagermagneten wird eine Messgröße abgegriffen, die Spuleninduktivität, diese wird als Messgröße zur Ermittlung der radialen Position der Rotorwelle in Bezug auf die Spulen verwendet. Wie dies eingangs geschildert wurde, kann die so ermittelte radiale Position jedoch fehlerbehaftet sein, da sich parasitäre Einflüsse, wie beispielsweise Temperaturschwankungen, auf die Induktivität der Spulen auswirken. Um dennoch die zur Krafterzeugung verwendeten elektromagnetischen Spulen zur Positionsbestimmung einsetzen zu können, wird gemäß der Erfindung dafür gesorgt, dass eine zyklische Signalkomponente in dem Sensorsignal vorhanden ist, das eine zusätzliche Information aufweist, welche zur Eliminierung oder Verringerung der parasitären Einflüsse eingesetzt wird.

**[0009]** Hierzu wird eine Rotorwelle verwendet, welche im Querschnitt eine Asymmetrie aufweist. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass, wenn im Rahmen der folgenden Beschreibung der Ausdruck „Asymmetrie“ verwendet wird, hierunter eine Rotationsasymmetrie verstanden werden soll. Wellen von Magnetlagern weisen nach dem Stand der Technik generell einen kreisförmigen Querschnitt auf. Die erfindungsgemäße Asymmetrie des Querschnitts bedeutet, dass der Querschnitt der Rotorwelle zumindest an einer Stelle eine Abweichung von der Kreisform aufweist.

**[0010]** Hierdurch wird bei der Rotation der Rotorwelle durch Änderung der Dicke  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  eines Luftspalts zwischen der Rotorwelle und einer Spule des Magnetlagers eine zyklische Änderung der Induktivität in die Spulen der Magnetlager induziert, welche an Klemmen der Spulen abgegriffen werden kann. Auf diese Weise wird eine Zusatzinformation erzeugt, welche zur Beseitigung von parasitären Einflüssen bzw. Störeinflüssen bei der Bestimmung der radialen Position der Rotorwelle eingesetzt wird. Mit an-

deren Worten birgt jede gemessene Induktivität, im Zeitverlauf gesehen, zwei Komponenten in sich: die genannte zyklische Komponente, welche von der Rotationsgeschwindigkeit der Rotorwelle abhängig ist, und eine von der Rotationsgeschwindigkeit unabhängige Komponente, welche eine Lageinformation bezüglich der radialen Rotorwellenposition beinhaltet.

**[0011]** Im Folgenden werden Möglichkeiten zur Gestaltung der Rotorwelle im Rahmen auf der Basis der genannten Asymmetrie erläutert.

**[0012]** Hierzu ist anzumerken, dass sich die genannte Asymmetrie nicht zwingend über die gesamte axiale Länge  $L$  der Rotorwelle erstrecken muss. Vielmehr kann die Asymmetrie die Welle nur auf einem Teil der axialen Länge  $L$  derselben ausgebildet. Diese Ausgestaltung ist insofern vorteilhaft, als jede Asymmetrie bekanntlich auch eine mechanische Unwucht der Rotorwelle bedeutet, welche jedoch so gering wie möglich gehalten werden soll, damit sie das eigentliche Verhalten des Lagers, d. h. das Halten der Rotorwelle in ihrer Position nicht wesentlich beeinflusst.

**[0013]** Die Ausbildung der Asymmetrie auf nur einem Teil der axialen Länge  $L$  der Rotorwelle bedeutet in diesem Sinne eine Verringerung der Unwucht im Vergleich zu einer Konstruktion, gemäß der dieselbe Art der Asymmetrie über der gesamten Länge  $L$  der Welle vorhanden ist.

**[0014]** Was die konkrete Ausgestaltung der Asymmetrie der Rotorwelle betrifft, so kann diese beispielsweise in Form eines elliptischen Querschnitts ausgebildet sein. Eine solche Form lässt sich produktionstechnisch auf einfache Weise verwirklichen. Im Sinne des vorstehend beschriebenen Ziels des Geringshaltens der mechanischen Unwucht kann es dabei vorteilhaft sein, wenn die Differenz zwischen dem großen Durchmesser der Ellipse und deren kleinem Durchmesser weniger als 5%, insbesondere weniger als 3% beträgt.

**[0015]** Gemäß einer Alternative kann die radiale Asymmetrie der Rotorwelle auch dadurch verwirklicht werden, dass der Umfang der Welle über einem ersten Winkelbereich  $\alpha_1$  einen ersten Radius  $r_1$  aufweist und über einem zweiten Winkelbereich  $\alpha_2$  einen zweiten Radius  $r_2$ , wobei  $r_1$  von  $r_2$  verschieden ist. Mit anderen Worten setzt sich der Querschnitt der Rotorwelle aus zwei aneinander grenzenden Teilkreisen mit demselben Kreismittelpunkt, aber mit unterschiedlichen Radien zusammen. Um die mechanische Unwucht möglichst klein zu halten, kann die Differenz der Radien weniger als 5%, insbesondere weniger als 3% betragen.

**[0016]** Eine weitere Möglichkeit der Ausführung einer Asymmetrie der Rotorwelle besteht in einer radialen Ausbuchtung derselben. Diese Ausbuchtung

kann in verschiedenen Querschnittsformen ausgebildet sein, beispielsweise rechteckig oder kreisförmig. Die radiale Ausbuchtung bedeutet also eine Asymmetrie in Form eines Zapfens auf nur einem kleinen Teil des Umfangs der Welle. Diese Ausgestaltung hat den Vorteil, dass die Ausbuchtung auch nachträglich auf eine im Querschnitt kreisförmige Welle aufgebracht werden kann, beispielsweise mittels Kleben oder Schweißen. Es können also bereits existierende Rotorwellen umgerüstet werden, um im Rahmen der Erfindung einsetzbar zu sein.

**[0017]** Die radiale Ausbuchtung der Rotorwelle kann sich beispielsweise über einen umfangsseitigen Winkelbereich von etwa  $5^\circ$  bis  $20^\circ$  erstrecken. Dies bedeutet, dass das zyklisch auftretende Signal einen schmalen Peak innerhalb eines Rotationszyklus bzw. einer Umdrehung der Welle aufweist, welcher gut zu lokalisieren ist.

**[0018]** Gemäß einer Ausführungsform der Erfindung umfasst die Steuereinrichtung, bei der es sich beispielsweise um einen Mikroprozessor handeln kann, einen Beobachter, welcher dafür ausgelegt ist, aus dem Sensorsignal der Spulen sowie aus einer Kenngröße der den Spulen zugeführten elektrischen Leistung die radiale Lage der Rotorwelle relativ zu den Spulen des Lagermagneten zu ermitteln. Wie dies bekannt ist, stellt ein Beobachter ein System dar, das unter Verwendung eines Modells aus bekannten Eingangsgrößen (z. B. Stellgrößen oder messbaren Störgrößen) und Messgrößen die Ermittlung nicht messbare Größen ermöglicht.

**[0019]** Im Rahmen der Erfindung wird der Beobachter dafür eingesetzt, nicht messbare parasitäre Einflüsse zu rekonstruieren, so dass diese aus dem Sensorsignal eliminiert werden können und somit die Position der Rotorwelle genauer und mit geringerer Fehlerbelastung allein mit Hilfe der Spulen (also ohne den Einsatz spezieller Wegsensoren) ermittelt werden kann. Bei dem genannten Beobachter kann es sich beispielsweise um einen Luenberger-Beobachter handeln. Darüber hinaus kann es sich bei der Kenngröße der den Spulen zugeführten elektrischen Leistung insbesondere um Spannung oder Stromstärke handeln, da diese durch herkömmliche Messeinrichtungen leicht ermittelbar sind.

**[0020]** Gemäß einer Ausführungsform ermittelt die Einrichtung, welche die Lage der Rotorwelle regelt, aus dem zyklischen Sensorsignal eine Drehzahl des Rotors und gibt diese an einem Ausgang aus. Dieses Sensorsignal kann für weitere Anwendungen, bei denen die Drehzahl oder Winkelgeschwindigkeit des Rotors von Interesse ist, zur Verfügung gestellt werden. Somit ist es gegebenenfalls möglich, durch die doppelte Nutzung des zyklischen Sensorsignals einen Geschwindigkeitssensor in einem Gesamtsystem, in dem das aktiv geregelte axiale Magnetlager

gemäß Ausführungsformen der Erfindung eingesetzt ist, einzusparen.

[0021] Wie bereits erwähnt, betrifft die Erfindung auch ein Verfahren zur aktiven Regelung eines radialen Magnetlagers, wobei das Magnetlager eine Rotorwelle, einen Lagermagneten mit mindestens einer ersten Spule und einer zweiten Spule aufweist, wobei die Spulen radial zur Rotorwelle positioniert sind, so dass durch die Magnetkraft der Spulen die Rotorwelle berührungslos gelagert ist. Weiterhin weist das magnetlager eine Einrichtung auf, welche ausgehend von einem Sensorsignal der Spulen die Lage der Rotorwelle so regelt, dass diese im berührungslosen Zustand zwischen den Spulen stabilisiert ist, wobei die Rotorwelle, im Querschnitt gesehen, eine Asymmetrie aufweist, so dass bei einer Rotation der Rotorwelle um ihre Längsachse Z ein zyklisches Signal in den Spulen des Lagermagneten erzeugt wird, und wobei das zyklische Signal einen Bestandteil des Sensorsignals für die Einrichtung, welche die Lage der Rotorwelle regelt, bildet.

[0022] Das Verfahren umfasst dabei die folgenden Schritte: Erfassen des Sensorsignals an den Spulen des Lagermagneten; Extrahieren des zyklischen Signals aus dem Sensorsignal; Ermitteln der aktuellen radialen Position der Rotorwelle aus dem Sensorsignal, wobei das extrahierte zyklische Signal dazu verwendet wird, um parasitäre Einflüsse aus dem Sensorsignal zu eliminieren; und Regeln der radialen Position der Rotorwelle in Bezug auf die Spulen auf der Basis der ermittelten aktuellen radialen Position, so dass die Rotorwelle im berührungslosen Zustand stabilisiert wird.

[0023] Mit diesem Verfahren wird eine Regelung der radialen Lage einer Rotorwelle auf der Basis eines Sensorsignals allein von den zur Magnetkraftherzeugung eingesetzten Spulen ermöglicht, wobei durch die Extrahierung des zyklischen Sensorsignals und dessen Auswertung parasitäre Einflüsse bei der Bestimmung der aktuellen Rotorwellenposition weitgehend vermieden werden können.

[0024] In diesem Zusammenhang kann der Schritt des Ermitteln der aktuellen radialen Position der Rotorwelle unter Einsatz eines Beobachters erfolgen, beispielsweise eines Luenberger-Beobachters.

[0025] Die vorliegende Erfindung wird nachfolgend anhand der in den Figuren der Zeichnung angegebenen Ausführungsbeispiele näher erläutert. Es zeigen dabei:

[0026] **Fig. 1** eine Längsschnittansicht eines radialen Magnetlagers gemäß einer Ausführungsform der Erfindung ist;

[0027] **Fig. 2** eine Querschnittsansicht einer Rotorwelle gemäß einer Ausführungsform der Erfindung mit radial positionierten elektromagnetischen Spulen;

[0028] **Fig. 3a** bis **Fig. 3c** Querschnittsansichten von Rotorwellen mit radialen Asymmetrien gemäß Ausführungsformen der Erfindung;

[0029] **Fig. 4** eine Längsschnittansicht der Welle von **Fig. 3c**;

[0030] **Fig. 5** ein Beispiel eines Beobachters, der im Rahmen der Erfindung eingesetzt werden kann; und

[0031] **Fig. 6** ein Flussdiagramm zur Veranschaulichung eines Regelverfahrens gemäß einer Ausführungsform der Erfindung.

[0032] In den verschiedenen Figuren sind einander entsprechende Elemente durchgängig mit den gleichen Bezugszeichen versehen.

[0033] **Fig. 1** zeigt schematisch die Elemente eines aktiv geregelten radialen Magnetlagers gemäß einer Ausführungsform der Erfindung.

[0034] Das Magnetlager umfasst eine Rotorwelle **100**, welche um ihre Längsachse Z drehbar und bezüglich ihrer radialen Position durch einen Lagermagneten **200** berührungslos gelagert ist, wobei das Magnetlager ein radiales Magnetlager mit radial um die Welle **100** positionierten Spulen **210**, **211** ist.

[0035] Für eine aktive Regelung der radialen Position der Welle **100** ist es wichtig, den jeweils aktuellen Wert der radialen Ist-Position zu kennen, mit anderen Worten die Dicke  $d_1$ ,  $d_2$  der Luftspalte zwischen der Rotorwelle **100** und Oberflächen **210a**, **211a** der radial benachbarten Spulen **210** bzw. **211**. In einer stabilen Position oder Gleichgewichtsposition sollte die Dicken  $d_1$ ,  $d_2$  im Fall eines kreisförmigen Querschnitts der Welle **100** gleich sein. Ist die Welle aus ihrer stabilen Position ausgelenkt, so ändert sich die Dicke der Luftspalte um die Größe der radialen Versetzung der Rotorwelle.

[0036] Diese Änderung der Dicke der Luftspalte wird durch eine Messung der Änderung der Induktivität der Spulen **210**, **211** bestimmt. Mithin kann also durch ein Sensorsignal von den Spulen die aktuelle Rotorwellenposition bestimmt werden. Jedoch unterliegt dieser Messwert bisweilen starken parasitären Störeinflüssen, welche einen Effekt auf die Induktivität der Spulen mit sich bringen.

[0037] Um diese Störeinflüsse zu eliminieren oder zu minimieren weist die Rotorwelle **100** gemäß den Ausführungsformen der Erfindung in Radialrichtung eine Asymmetrie (in **Fig. 1** nicht gezeigt) auf, so dass bei einer Rotation der Welle **100** um ihre Längsach-

se Z aufgrund der zyklischen Änderung der Dicke  $d_1$ ,  $d_2$  eines Luftspalts zwischen Welle **100** und Spule **210** bzw. **211** eine zyklische Änderung der Induktivität der entsprechenden Spule bewirkt wird. Diese zyklische Änderung hängt mit der Rotationsgeschwindigkeit der Welle **100** zusammen und bildet eine zusätzliche Messinformation, welche von einer Feinrichtung **300**, welche die Lage der Rotorwelle regelt, zur Verringerung bzw. Minimierung der parasitären Einflüsse von Umgebungsbedingungen wie z. B. Temperaturschwankungen, eingesetzt wird.

**[0038]** Die zyklische Messinformation kann zudem auch von der Einrichtung **300**, welche die Lage der Rotorwelle regelt, zur Bestimmung der Rotationsgeschwindigkeit der Welle **100** verwendet werden. Da die Rotationsgeschwindigkeit der Rotorwelle **100** bei vielen Anwendungen die Ausgangsgröße zur Ermittlung zahlreicher Parameter für die jeweilige Anwendung ist, wie z. B. der Verdichtergasströme bei magnetgelagerten Turboladerwellen, kann die Rotationsgeschwindigkeit auch zur Regelung der Leistung im Rahmen solcher Anwendungen eingesetzt werden, ohne dass ein separater Geschwindigkeitssensor vorgesehen werden muss.

**[0039]** **Fig. 2** zeigt im Querschnitt eine Ausführungsform der Erfindung, gemäß der die Welle **100** radial durch einen Lagermagneten **200**, dessen Spulen **210**, **211**, **212** radial um die Welle **100** positioniert sind, berührungslos gelagert ist. Es ist anzumerken, dass, obgleich in der gezeigten Ausführungsform drei radiale Spulen **210**, **211**, **212** gezeigt sind, diese Zahl als nicht beschränkend anzusehen ist. Für den Fachmann ist es offensichtlich, dass für das praktisch eingesetzte Magnetlager auch mehr oder weniger Spulen verwendet werden können.

**[0040]** Wie dies in der **Fig. 2** zu erkennen ist, weist der Querschnitt der Rotorwelle **100** eine Abweichung von der Kreisform auf. Mit anderen Worten ist in der Rotorwelle **100** eine radiale Asymmetrie vorhanden, welche bewirkt, dass die Dicke der Luftspalte  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  (in **Fig. 2** nicht gezeigt) zwischen der Welle **100** und den drei Spulen **210**, **211**, **212** des radialen Magnetlagers verschieden sind. Dies bewirkt, dass bei einer Rotation der Welle **100** um ihre Längsachse Z eine zyklische Änderung der in die Spulen **210**, **211**, **212** induzierten Spannungen auftritt. Die Frequenz der Änderung der induzierten Spannungen ist dabei proportional der Rotationsgeschwindigkeit der Welle **100**.

**[0041]** Nunmehr mit Bezug auf die **Fig. 3a** bis **Fig. 3c** sind verschiedene mögliche Querschnittsformen von Rotorwellen **100** gezeigt, welche die erfindungsgemäß gewünschte radiale Asymmetrie verwirklichen. In der Ausführungsform der **Fig. 3a** ist ein elliptischer Querschnitt dargestellt. Es ist anzumerken, dass in der Darstellung die Unterschiede zwischen

den beiden Ellipsendurchmessern aus Gründen der Deutlichkeit der Darstellung übertrieben stark gezeigt sind. Tatsächlich ist es in der Praxis vorteilhaft, die Unterschiede zwischen den Durchmessern nur so stark auszubilden, dass ein ausreichend ausgeprägtes zyklisches Signal in den Spulen **210**, **211**, **212** erzeugt wird.

**[0042]** Um eine größere mechanische Unwucht der Welle **100** zu vermeiden, ist es günstig, wenn die Differenz zwischen dem großen Durchmesser  $D_2$  der Ellipse und deren kleinem Durchmesser  $D_1$  weniger als 5%, insbesondere weniger als 3% beträgt.

**[0043]** Ähnliches gilt auch für die Querschnittsform der Rotorwelle **100** von **Fig. 3b**, gemäß welcher der Umfang der Welle **100** über einem ersten Winkelbereich  $\alpha_1$  einen ersten Radius  $r_1$  aufweist und über einem zweiten Winkelbereich  $\alpha_2$  des Umfangs einen zweiten Radius  $r_2$ , wobei  $r_1$  von  $r_2$  verschieden ist. Der Querschnitt der Welle besteht somit aus zwei aneinander grenzenden Teilkreisen mit demselben Kreismittelpunkt, aber mit unterschiedlichen Radien zusammen. In der gezeigten Darstellung betragen der erste Winkelbereich und der zweite Winkelbereich jeweils  $180^\circ$ , was bedeutet, dass sich die Querschnittsansicht der Welle **100** aus zwei Halbkreisen mit unterschiedlichen Radien  $r_1$  und  $r_2$  zusammensetzt.

**[0044]** Um die mechanische Unwucht möglichst klein zu halten, kann auch hier die Differenz der Radien weniger als 5%, insbesondere weniger als 3% Gemäß einer weiteren Variante, die in **Fig. 3c** dargestellt ist, weist die Rotorwelle **100** eine radiale Ausbuchtung **110** auf einem Teil ihres Umfangs auf. Die radiale Ausbuchtung **110** kann beispielsweise, wie hier gezeigt, einen rechteckigen Querschnitt aufweisen. Es ist jedoch anzumerken, dass die Querschnittsform der Ausbuchtung **110** nicht wesentlich ist und dass verschiedene Querschnitte gewählt werden können, solange die Ausbuchtung **110** ausreichend ausgeprägt für die Erzeugung einer zyklischen Induktivitätsänderung in den radialen Spulen **210**, **211**, **212** ist.

**[0045]** In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass sich die Ausbuchtung über einen beliebigen Winkelbereich des Umfangs erstrecken kann. In manchen Fällen kann es jedoch gewünscht sein, die Ausbuchtung **110** in Umfangsrichtung schmal auszubilden, so dass die Induktivitätsänderung in den Spulen **410** nur in einer sehr kurzen Zeitspanne innerhalb eines Rotationszyklus der Welle **100** auftritt. Diesbezüglich kann die Ausbuchtung **110** beispielsweise so gestaltet sein, dass sie sich über einen umfangsseitigen Winkelbereich von etwa  $5^\circ$  bis  $30^\circ$  erstreckt.

**[0046]** Selbstverständlich kann die radiale Ausbuchtung **110** in einer nicht gezeigten alternativen Ausführungsform auch durch eine Vertiefung bzw. Einbuchtung ersetzt werden. Das vorstehend in Bezug auf die

Ausbuchtung **110** Erwähnte gilt analog auch für eine solche Vertiefung in der Rotorwelle **100**.

[0047] Wie bereits erwähnt, kann es zur Vermeidung einer größeren Unwucht von Vorteil sein, wenn die Asymmetrie nicht auf der gesamten axialen Länge  $L$  der Welle **100** ausgebildet ist, sondern nur auf einem Teil derselben. Dies ist in der Darstellung von **Fig. 4** verdeutlicht, welche die Ausbuchtung **110** in der Welle **100** von **Fig. 3c** im Längsschnitt zeigt. Wie zu erkennen ist, erstreckt sich die Ausbuchtung nur über eine Teillänge  $L_1$ , die einen Bruchteil der Gesamtlänge  $L$  beträgt.

[0048] Nunmehr mit Bezug auf **Fig. 5** ist ein Beispiel eines Beobachters **310** dargestellt, der im Rahmen der Erfindung eingesetzt werden kann, um mit auf der Basis des Sensorsignals von den Spulen **210**, **211**, **212**, welches das überlagerte zyklische Signal, das sehr genau bestimmt ist, enthält, eine korrekte und weitgehend von Störeinflüssen unabhängige Bestimmung der aktuellen radialen Ist-Position der Rotorwelle **100** durchzuführen.

[0049] Der Beobachter **310** umgibt ein Modell  $S$  der zu regelnden Strecke (hier die Rotorwelle **100** bzw. ihre radiale Position) bzw. ist im Fall des hier gezeigten Luenberger-Beobachters parallel zu diesem geschaltet. Als wesentliches Element weist der Beobachter eine Rückführmatrix  $k_b$  auf, der eine Differenz der Signale  $i$  und  $i_b$  (beispielsweise gemessene und modellierte Stromstärke) zugeführt wird. Über diese Rückführmatrix  $k_b$  erfolgt eine Korrektur der Eingangsgröße  $u$  (beispielsweise der den Spulen zugeführten Spannung) des Modells  $S$  mittels Einspeisung eines Korrekturwertes über die Matrix  $k_r$ .

[0050] Durch den Beobachter wird es im Rahmen der Erfindung ermöglicht, auf der Basis des zyklischen Sensorsignals als Kalibriersignal parasitäre Störeinflüsse auf die ermittelte Position der Welle **100** zu minimieren. Dazu sind in dem Beobachter die Parameter des Modells  $S$  mit einem Algorithmus so anzupassen, dass die Luftspalte zwischen der Welle **100** und den Spulen **210**, **211**, **212** sich im Beobachtermodell während einer Rotation genau so ändern wie die bekannte magnetische Unwucht, d. h. die durch die Asymmetrie hervorgerufene zyklische Induktivitätsänderung der Spulen **210**, **211**, **212**. Für den Fachmann auf dem Gebiet der Regelungstechnik ist ein solcher Algorithmus ohne weiteres auszuarbeiten, weswegen hier nicht detailliert auf diese Ausarbeitung eingegangen werden soll.

[0051] Es ist anzumerken, dass die in den Figuren dargestellten Abmessungen und ihre Verhältnisse zueinander nicht maßstabgetreu sind. So sind beispielsweise die Asymmetrien des Rotorquerschnitts in Bezug auf den Durchmesser der Rotorwelle über-

trieben dargestellt, was der Verdeutlichung des der Erfindung zugrunde liegenden Prinzips dient.

[0052] Mit Bezug auf das Flussschema von **Fig. 6** wird nun ein Verfahren zur aktiven Regelung eines radialen Magnetlagers gemäß einer Ausführungsform der Erfindung erläutert.

[0053] In einem ersten Schritt  $S_{10}$  wird ein Sensorsignal an den Spulen des Lagermagneten erfasst. Dieses Sensorsignal kann beispielsweise die Induktivität der jeweiligen Spule umfassen und an den Klemmen der jeweiligen Spule abgegriffen werden.

[0054] Wie dies bereits erwähnt wurde, enthält das Sensorsignal eine relativ genau definierte zyklische Signalkomponente, welche durch die radiale Asymmetrie der Rotorwelle **100** erzeugt wird. In einem zweiten Verfahrensschritt  $S_{20}$  wird das zyklische Signal bzw. die zyklische Signalkomponente aus dem Sensorsignal extrahiert, um einen Referenzwert für eine Kalibrierung zu bilden.

[0055] Aus der nicht-zyklischen Signalkomponente, welche eine Positionsinformation bezüglich der Rotorwelle **100** beinhaltet, wird in einem weiteren Schritt  $S_{30}$  die aktuelle radiale Position der Rotorwelle **100** ermittelt. Im Rahmen dieser Ermittlung wird das extrahierte zyklische Signal als bekanntes Referenzsignal dazu verwendet, um parasitäre Einflüsse aus dem Sensorsignal zu eliminieren. Dies kann beispielsweise im Rahmen einer virtuellen Positionsbestimmung unter Einsatz eines Beobachters mit Modellbildung der zu regelnden Strecke, beispielsweise eines Luenberger-Beobachters, erfolgen.

[0056] In einem weiteren Schritt  $S_{40}$  findet das Regeln der radialen Position der Rotorwelle in Bezug auf die Spulen auf der Basis der ermittelten aktuellen und weitgehend fehlerfreien radialen Position statt, so dass die Rotorwelle im berührungslosen Zustand stabilisiert wird.

### Patentansprüche

1. Aktiv geregeltes radiales Magnetlager, aufweisend:

- eine Rotorwelle (**100**),
- einen Lagermagneten (**200**) mit mindestens einer ersten Spule (**210**) und einer zweiten Spule (**211**), welche radial zur Rotorwelle (**100**) positioniert sind, so dass durch die Magnetkraft der Spulen (**210**, **211**) die Rotorwelle (**100**) berührungslos gelagert ist, und
- eine Einrichtung (**300**), welche ausgehend von einem in den Spulen des Lagermagneten erzeugten Sensorsignal die Lage der Rotorwelle (**100**) so regelt, dass diese im berührungslosen Zustand zwischen den Spulen (**210**, **211**) stabilisiert ist, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Rotorwelle (**100**), im Querschnitt gesehen, eine Asymmetrie in Form einer de-

finierten Abweichung von der Kreisform aufweist, so dass bei einer Rotation der Rotorwelle (100) um ihre Längsachse Z zusätzlich ein zyklisches Signal in den Spulen (210, 211) des Lagermagneten (200) erzeugt wird, das einen Bestandteil des Sensorsignals darstellt

und dass das so in den Spulen erzeugte zyklische Signal als Referenzsignal zur Kalibrierung für die Einrichtung (300), welche die Lage der Rotorwelle regelt, herangezogen wird, um parasitäre Störeinflüsse auf das Sensorsignal zu eliminieren.

2. Magnetlager nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Asymmetrie der Rotorwelle (100) nur auf einem Teil der axialen Länge L der Welle (100) ausgebildet ist.

3. Magnetlager nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Asymmetrie der Rotorwelle (100) in Form eines elliptischen Querschnitts derselben ausgebildet ist.

4. Magnetlager nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Asymmetrie der Rotorwelle (100) dadurch verwirklicht ist, dass der Umfang der Rotorwelle (100) über einen ersten Winkelbereich  $\alpha_1$  einen ersten Radius  $r_1$  aufweist und in einem zweiten Winkelbereich  $\alpha_2$  einen zweiten Radius  $r_2$ , wobei  $r_1$  von  $r_2$  verschieden ist.

5. Magnetlager nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Asymmetrie der Rotorwelle (100) in Form einer radialen Ausbuchtung (110) ausgebildet ist.

6. Magnetlager nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass sich die radiale Ausbuchtung (110) der Rotorwelle über einen umfangsseitigen Winkelbereich von etwa 5° bis 30° erstreckt.

7. Magnetlager nach mindestens einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Steuereinrichtung (300) einen Beobachter (310) umfasst, welcher dafür ausgelegt ist, aus den Sensorsignalen der Spulen (210, 211) sowie aus einer Kenngröße der den Spulen zugeführten elektrischen Leistung die radiale Lage der Rotorwelle (100) relativ zu den Spulen (210, 211) des Lagermagneten (200) zu ermitteln.

8. Magnetlager nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass es sich bei dem Beobachter (310) um einen Luenberger-Beobachter handelt.

9. Magnetlager nach Anspruch 7 oder 8, dadurch gekennzeichnet, dass es sich bei der Kenngröße der den Spulen zugeführten elektrischen Leistung um Spannung oder Stromstärke handelt.

10. Magnetlager nach mindestens einem der vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Einrichtung (300), welche die Lage der Rotorwelle (100) regelt, aus dem zyklischen Sensorsignal eine Drehzahl der Rotorwelle (100) ermittelt und an einem Ausgang ausgibt.

11. Verfahren zur aktiven Regelung eines radialen Magnetlagers mit allen Merkmalen gemäß Anspruch 1, wobei das Verfahren die folgenden Schritte umfasst:

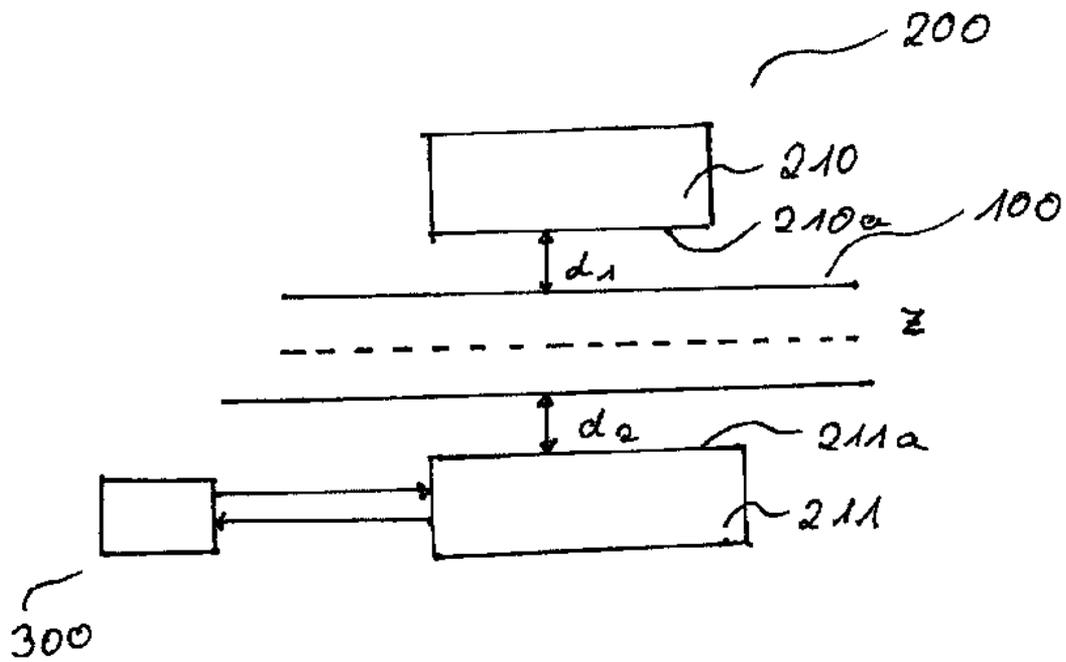
- Erfassen des Sensorsignals an den Spulen (210, 211) des Lagermagneten (200);
- Extrahieren des zyklischen Signals aus dem Sensorsignal;
- Ermitteln der aktuellen radialen Position der Rotorwelle (100) aus dem Sensorsignal, wobei das extrahierte zyklische Signal als Referenzsignal zur Kalibrierung verwendet wird, um parasitäre Einflüsse aus dem Sensorsignal zu eliminieren; und
- Regeln der radialen Position der Rotorwelle (100) in Bezug auf die Spulen (210, 211) auf der Basis der ermittelten aktuellen radialen Position, so dass die Rotorwelle (100) im berührungslosen Zustand zwischen den Spulen (210, 220) stabilisiert wird.

12. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass der Schritt des Ermitteln der aktuellen radialen Position der Rotorwelle (100) unter Einsatz eines Beobachters erfolgt.

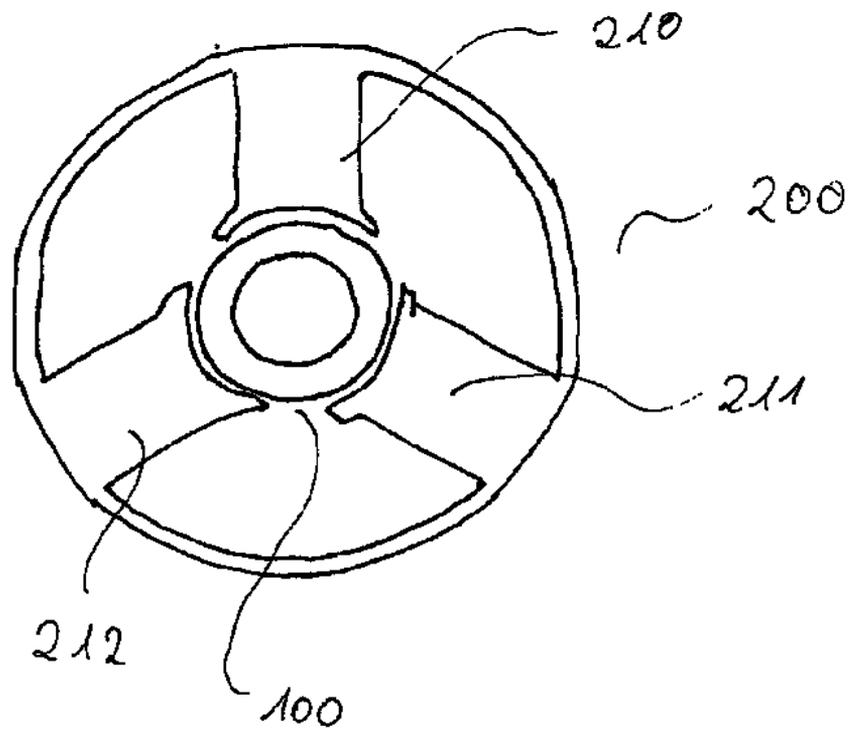
13. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass es sich bei dem Beobachter (310) um einen Luenberger-Beobachter handelt.

Es folgen 3 Blatt Zeichnungen

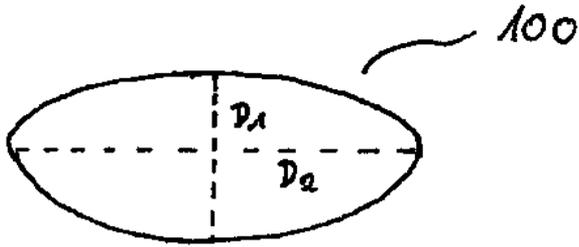
Anhängende Zeichnungen



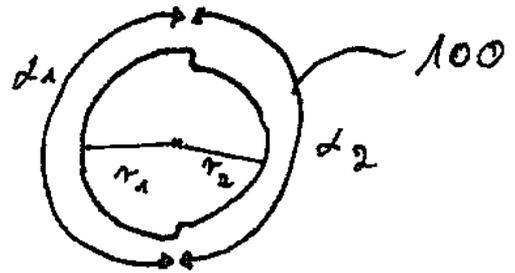
Figur 1



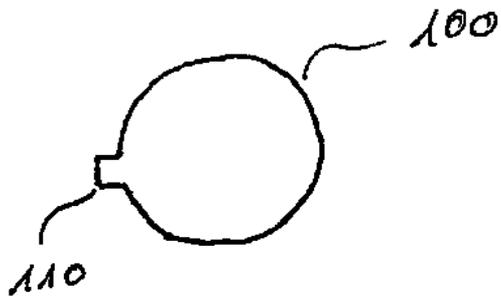
Figur 2



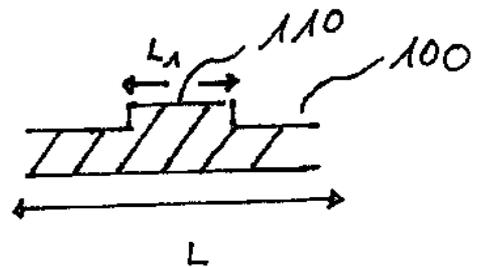
Figur 3 a



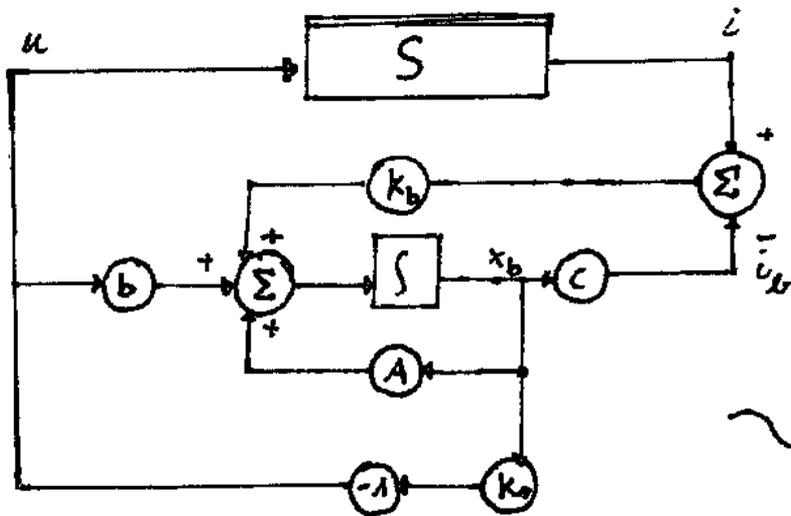
Figur 3 b



Figur 3 c

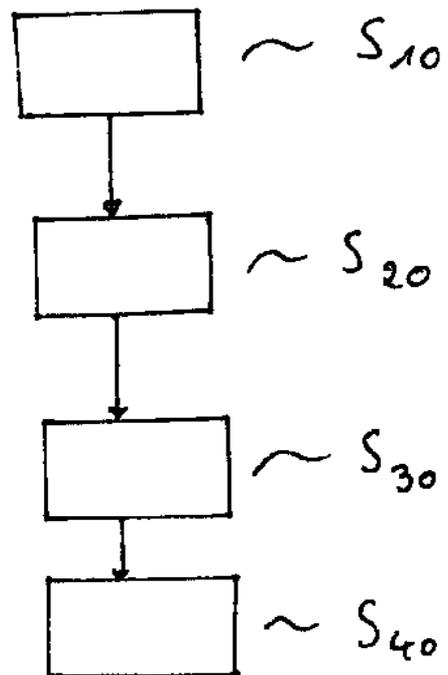


Figur 4



Figur 5

310



Figur 6