

(19)



(11)

EP 3 832 141 A1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:
09.06.2021 Patentblatt 2021/23

(51) Int Cl.:
F04D 27/02 ^(2006.01) **F04D 27/00** ^(2006.01)
F04D 19/04 ^(2006.01) **F04D 29/058** ^(2006.01)

(21) Anmeldenummer: **20205911.9**

(22) Anmeldetag: **05.11.2020**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
**AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB
GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO
PL PT RO RS SE SI SK SM TR**
Benannte Erstreckungsstaaten:
**BA ME
KH MA MD TN**

(72) Erfinder: **Stammler, Herbert**
35396 Gießen (DE)

(74) Vertreter: **Manitz Finsterwald**
Patent- und Rechtsanwaltspartnerschaft mbB
Martin-Greif-Strasse 1
80336 München (DE)

(71) Anmelder: **Pfeiffer Vacuum Technology AG**
35614 Asslar (DE)

(54) VERFAHREN ZUM BETREIBEN EINER VAKUUMPUMPE

(57) Ein Verfahren ist zum Betreiben einer Vakuumpumpe vorgesehen, die einen Rotor, einen Stator, ein aktiv geregeltes Magnetlager zum Lagern des Rotors und ein Fanglager für den Rotor aufweist. Gemäß dem Verfahren wird ein Satz von Betriebsvorgaben für die Vakuumpumpe bereitgestellt, der zumindest einen bei einem Störungsereignis zu erreichenden Betriebszustand der Vakuumpumpe aufweist. Ferner wird ein Störungsereignis detektiert, bei welchem der Rotor bezogen auf den Stator einen für den Rotor vorgesehenen Raumbe-

reich derart verlässt, dass ein Verschleiß an dem Fanglager auftritt. Anhand des detektierten Störungsereignisses wird ein Verschleißinkrement für das Fanglager geschätzt. Das Verschleißinkrement wird zu einer Variablen für den Gesamtverschleiß des Fanglagers hinzugefügt. Anhand des Satzes von Betriebsvorgaben für die Vakuumpumpe und anhand der Variablen für den Gesamtverschleiß des Fanglagers wird schließlich ermittelt, ob eine Maßnahme zur Stabilisierung des Rotors ausgeführt wird.

EP 3 832 141 A1

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben einer Vakuumpumpe und eine Vakuumpumpe mit einer Steuerungseinrichtung, die ausgebildet ist, um ein solches Verfahren auszuführen.

[0002] Viele Typen von Vakuumpumpen, beispielsweise Turbomolekularpumpen und/oder Vakuumpumpen mit Siegbahnpumpstufen, sind mit einem Rotor ausgestattet, der eine aktive Magnetlagerung aufweist. Da die aktive Magnetlagerung berührungs- und schmiermittellos ist, erfolgt der Normalbetrieb einer solchen Vakuumpumpe mit aktiver Magnetlagerung nahezu verschleiß- und wartungsfrei.

[0003] Begrenzend für die Lebensdauer der Vakuumpumpe mit aktiver Magnetlagerung wirken jedoch die allgemeine Bauteilalterung durch übliche Betriebslasten, zum Beispiel elektrische, mechanische, thermische und/oder elektrochemische sowie korrosive Einwirkungen und/oder stoffliche Ablagerungen oder Blockierungen, die hauptsächlich durch Pump- und/oder Hilfsmedien sowie aus der Umgebungsatmosphäre eingebracht werden können.

[0004] Ferner können jegliche Formen von Betriebsstörungen die Lebensdauer der Vakuumpumpe mit aktiver Magnetlagerung begrenzen. Solche Betriebsstörungen sind beispielsweise Ausfälle der Versorgungsspannung oder über den zulässigen Rahmen hinaus wirkende impulsartige oder andauernde äußere mechanische Einwirkungen. Diese Einwirkungen werden beispielsweise durch Erdbeben, Stöße, Vibrationen, Resonanzereignisse oder durch elektrische, magnetische oder andere hochenergetische Felder oder Strahlungen hervorgerufen. Weiterhin können Betriebsstörungen durch Prozesseinflüsse auftreten, die eine schlagartige Änderung von Durchflussmengen der zu pumpenden Medien und/oder Hilfsmedien bewirken, zum Beispiel während des Flutens, Evakuierens oder bei einem Prozessstart oder Prozessstopp. Solche Betriebsstörungen können in vielen Fällen zur Überlastung und/oder zum Ausfall der aktiven Magnetlagerung der Vakuumpumpe führen.

[0005] Für einen solchen Fall der Überlastung oder des Ausfalls der aktiven Magnetlagerung ist üblicherweise ein sekundäres mechanisches Lagerungssystem vorgesehen, das im Normalbetrieb nur mit dem Rotor oder mit einem entsprechenden Stator der Vakuumpumpe in Eingriff steht und nur bei Inaktivität oder Störung der aktiven Magnetlagerung einen sicheren mechanischen Kontakt zwischen dem Rotor und dem Stator herstellt, wobei dieser Kontakt weiterhin eine Drehung des Rotors gegenüber dem Stator der Vakuumpumpe zulässt. Für den Zeitraum der Überlastung oder des Ausfalls der aktiven Magnetlagerung gewährleistet das sekundäre mechanische Lagerungssystem eine Notlagerung und eine ausreichende Zentrierung des Rotors innerhalb des Stators. Das sekundäre mechanische Lagerungssystem ist allgemein bekannt als Notlager, Sicherungslager, Schutzlager, Landungslager, Stützlager, Anlauf- oder auch

Fanglager. Dieser letzte Begriff wird im Folgenden verwendet. Der Betriebszustand der Notlagerung unter Einsatz eines oder mehrerer Fanglager wird im Folgenden Fanglagerbetrieb genannt.

[0006] Üblicherweise ist ein Fanglager auf der Seite des Stators bzw. an diesem fest eingespannt, und es steht im Normalbetrieb vollständig still. Das Fanglager kann jedoch auch auf der Seite des Rotors bzw. an diesem fest eingespannt sein und mit dem Rotor im Normalbetrieb der Vakuumpumpe vollständig mitdrehen. "Vollständig Stillstehen" und "Vollständig Mitdrehen" bedeuten in diesem Zusammenhang jeweils, dass alle Komponenten des Fanglagers ohne Einwirkung von Lagerlasten während des Normalbetriebs untereinander nahezu keine Relativbewegungen ausführen und damit während des Normalbetriebs keine Rotationslagerungsaufgabe erfüllen.

[0007] Fanglager für Vakuumpumpen sind üblicherweise nicht für einen dauerhaften Betrieb ausgelegt. Vielmehr beträgt die Lebensdauer eines Fanglagers während des Fanglagerbetriebs üblicherweise nur einige Minuten bis hin zu wenigen Stunden. Daher werden die Fanglager für Vakuumpumpen als lediglich "zeitfest" bezeichnet. Selbst wenn ein Fanglager als ein Vollkugellager ausgebildet ist, weist es im zur Verfügung stehenden Bauraum keine ausreichende Traglast für einen Dauerbetrieb auf. Weiterhin besteht für den Betrieb einer Vakuumpumpe mit Fanglager die Vorgabe, Fanglager schmiermittelfrei oder zumindest frei von organischen und/oder flüchtigen Schmiermitteln zu halten. Fanglager werden daher oft ohne Schmierung betrieben oder mit minimalen Mengen spezieller anorganischer Trockenschmierstoffe wie zum Beispiel Graphit oder Molybdädisulfid benetzt, imprägniert oder infiltriert.

[0008] Bei bekannten Verfahren zum Betreiben von Vakuumpumpen wird einerseits versucht, den Eintritt des Fanglagerbetriebs bzw. den Ausfall der aktiven Magnetlagerung durch verschiedene Mittel so weit wie möglich hinauszuzögern oder vorausschauend zu unterbinden. Dabei können Betriebsbedingungen optimiert werden, indem beispielsweise eine Kalibrierung für den Bewegungsbereich des Fanglagers durchgeführt wird, indem prozessbegrenzende Maßnahmen wie etwa eine Flutgas-Mengenbegrenzung oder Flutgas-Mengenregelung implementiert werden, oder indem vorausschauende Zustandsbestimmungen durchgeführt werden, um einer potentiellen späteren Störung vorzubeugen.

[0009] Andererseits ist bei bekannten Verfahren zum Betreiben von Vakuumpumpen vorgesehen, nach dem Eintritt in den Fanglagerbetrieb bzw. beim Ausfall der aktiven Magnetlagerung den Rotor der Vakuumpumpe so schnell wie möglich entweder wieder in den Normalbetrieb oder zum Stillstand zu bringen, beispielsweise durch Fluten der gesamten Vakuumanlage mit einem Hilfsmedium zum Bremsen des Rotors der Vakuumpumpe oder durch elektrisches Bremsen mit Hilfe von Netzspeisung, direktem Kurzschluss des Motors der Vakuumpumpe oder durch Abführen der generatorisch im

Motor der Vakuumpumpe entstehenden Bremsenergie zu einem dedizierten Lastwiderstand.

[0010] Eine Aufgabe der Erfindung besteht darin, ein Verfahren zum Betreiben einer Vakuumpumpe zu schaffen, mit welchem der Fanglagerbetrieb, der einen Zeitraum von einem nicht kontrollierbaren Beginn einer Störung der Vakuumpumpe bis zur Wiederaufnahme des Normalbetriebs der Vakuumpumpe oder bis zum Eintreten des Stillstands umfasst, so verschleißarm wie möglich für das Fanglager gestaltet wird.

[0011] Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst.

[0012] Das Verfahren ist zum Betreiben einer Vakuumpumpe vorgesehen, die einen Rotor, einen Stator, ein aktiv geregeltes Magnetlager zum Lagern des Rotors und ein Fanglager für den Rotor aufweist. Gemäß dem Verfahren wird zunächst ein Satz von Betriebsvorgaben für die Vakuumpumpe bereitgestellt, der zumindest einen bei einem Störungsereignis zu erreichenden Betriebszustand der Vakuumpumpe aufweist. Ferner wird ein Störungsereignis detektiert, bei welchem der Rotor bezogen auf den Stator einen für den Rotor vorgesehenen Raumbereich derart verlässt, dass ein Verschleiß an dem Fanglager auftritt.

[0013] Anhand des detektierten Störungsereignisses wird ein Verschleißinkrement für das Fanglager geschätzt, und das Verschleißinkrement wird zu einer Variablen für den Gesamtverschleiß des Fanglagers hinzugefügt. Anhand des Satzes von Betriebsvorgaben für die Vakuumpumpe und anhand der Variablen für den Gesamtverschleiß des Fanglagers wird schließlich ermittelt, ob eine Maßnahme zur Stabilisierung des Rotors ausgeführt wird.

[0014] Der Betriebszustand der Vakuumpumpe, der bei einem Störungsereignis zu erreichen ist und von dem Satz von Betriebsvorgaben umfasst ist, kann beispielsweise ein Stillstand des Rotors der Vakuumpumpe sein, der möglichst schnell erreicht werden soll, oder umgekehrt das Aufrechterhalten des Vakuums, indem der Rotor durch eine Stabilisierung wieder in den Normalbetrieb mit einer Drehung im vorgesehenen Raumbereich zurückgebracht wird. Darüber hinaus kann der Satz von Betriebsvorgaben weitere Betriebszustände zwischen diesen Extremen umfassen, d.h. zwischen dem Stillstand des Rotors und dem Aufrechterhalten des Vakuums mit stabilisiertem Rotor.

[0015] Das Störungsereignis kann beispielsweise mittels zumindest eines Sensors detektiert werden, der zum Überwachen der räumlichen Lage des Rotors ausgebildet ist. Konkret können Magnetlager-Positionssensoren verwendet werden, wobei zwei Paare solcher Positionssensoren bezogen auf eine Drehachse des Rotors in radialer Richtung senkrecht zueinander angeordnet sind und ein einzelner oder ein weiteres Paar Positionssensoren in axialer Richtung angeordnet ist, d.h. entlang der Drehachse des Rotors. Alternativ oder zusätzlich können Schwingungs- und/oder Beschleunigungssensoren zum Detektieren eines Störungsereignisses der Vakuum-

pumpe verwendet werden.

[0016] Das Verschleißinkrement und die Variable für den Gesamtverschleiß des Fanglagers können konkret als Prozentanteil eines zulässigen Verschleißes des Fanglagers quantifiziert werden, wobei der zulässige Gesamtverschleiß auf Erfahrungswerten basiert und einem Zustand entspricht, bei welchem das Fanglager als vollständig verschlissen gilt und bei einer Wartung der Vakuumpumpe auszutauschen ist. Zur Ermittlung des Verschleißinkrements können Messwerte der vorstehend beschriebenen Sensoren verwendet werden, denen das Verschleißinkrement anhand einer kalibrierten Tabelle zugeordnet werden kann. Beispielsweise können Messwerte von Magnetlager-Positionssensoren die Zeitdauer und die Intensität einer Berührung des Rotors mit dem Fanglager beschreiben, und die Zeitdauer sowie die Intensität der Berührung zwischen Fanglager und Rotor können einem Verschleißinkrement als Prozentanteil des zulässigen Gesamtverschleißes zugeordnet werden.

[0017] Die Maßnahme zur Stabilisierung des Rotors umfasst insbesondere, dass der Rotor mittels der aktiven Magnetlagerung wieder in eine vorgegebene Raumposition oder Sollposition zurückgebracht wird, die für den Normalbetrieb der Vakuumpumpe vorgesehen ist und beispielsweise mittels Magnetlager-Positionssensoren überprüft werden kann. Da die Maßnahme eine erneute Stabilisierung des Rotors bewirkt, der vor dem Störungsereignis bereits stabilisiert war, wird diese erneute Stabilisierung auch als "Restabilisierung" des Rotors bezeichnet.

[0018] Bei der Ermittlung bzw. Entscheidung, ob die Maßnahme zur Stabilisierung des Rotors ausgeführt wird oder nicht, erfolgt gemäß dem Verfahren eine "Vermittlung" zwischen dem Satz von Betriebsvorgaben für die Vakuumpumpe und der Variablen für den Gesamtverschleiß des Fanglagers. Wenn beispielsweise für den Betrieb der Vakuumpumpe vorgegeben ist, dass das Vakuum unbedingt aufrechterhalten werden soll, kann stets eine Maßnahme zur Stabilisierung des Rotors bei Auftreten eines Störungsereignisses ausgeführt werden, solange die Variable für den Gesamtverschleiß des Fanglagers unterhalb eines vorgegebenen Schwellenwerts liegt. Erreicht die Variable für den Gesamtverschleiß diesen Schwellenwert, kann umgekehrt entschieden werden, dass keine Maßnahme zur Stabilisierung des Rotors ausgeführt wird und der Rotor stattdessen zum Stillstand gebracht wird, um die Betriebssicherheit der Vakuumpumpe nicht zu gefährden. Umgekehrt kann selbst dann, wenn der zu erreichende Betriebszustand der Stillstand des Rotors der Vakuumpumpe ist, entschieden werden, zunächst eine Maßnahme zur Stabilisierung des Rotors auszuführen, wenn der Gesamtverschleiß aufgrund des zu erwartenden Verschleißinkrements während eines Vollausschlags des Rotors der Vakuumpumpe bis zum Stillstand zu stark ansteigen würde.

[0019] Der Verschleiß des Fanglagers kann somit durch die "Vermittlung" zwischen dem Satz der Betriebs-

vorgaben und der Variablen für den Gesamtverschleiß minimiert werden, da durch diese Vermittlung ein Kompromiss zwischen dem Normalbetrieb mit Stabilisierung des Rotors und einem Vollaustausch des Rotors der Vakuumpumpe bis zum Stillstand erreicht werden kann. Aufgrund des minimierten Verschleißes des Fanglagers kann die Zeitdauer maximiert werden, bis ein Austausch des Fanglagers während einer Wartung der Vakuumpumpe erforderlich ist.

[0020] Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen, der Beschreibung und den Zeichnungen angegeben.

[0021] Wenn ermittelt wird, dass die Maßnahme zur Stabilisierung des Rotors nicht ausgeführt wird, kann die Vakuumpumpe heruntergefahren werden. Ohne die Maßnahme zur Stabilisierung des Rotors ist ein sicherer Betrieb der Vakuumpumpe unter Umständen nicht mehr gewährleistet. Daher erfolgt das Herunterfahren der Vakuumpumpe bzw. des Rotors bis zum Stillstand, obwohl der Gesamtverschleiß des Fanglagers aufgrund des Vollaustauschs des Rotors zunimmt. Durch das Herunterfahren der Vakuumpumpe kann jedoch eine mögliche Beschädigung der Vakuumpumpe außerhalb des Fanglagers, beispielsweise im Bereich der pumpaktiven Elemente wie etwa Stator- und Rotorscheiben, vermieden werden.

[0022] Gemäß einer Ausführungsform wird zusätzlich überprüft, ob die Maßnahme zur Stabilisierung des Rotors erfolgreich ist. Wenn die Maßnahme zur Stabilisierung des Rotors fehlschlägt, kann nach einer vorgebestimmten Wartezeit ermittelt werden, ob die Maßnahme zur Stabilisierung des Rotors erneut ausgeführt wird. Dabei kann ein weiteres Verschleißinkrement ermittelt werden, das zu der Variablen für den Gesamtverschleiß des Fanglagers hinzugefügt wird.

[0023] Die Ermittlung, ob die Maßnahme zur Stabilisierung des Rotors erneut ausgeführt wird, kann wiederum anhand des Satzes von Betriebsvorgaben für die Vakuumpumpe und anhand der Variablen für den Gesamtverschleiß des Fanglagers erfolgen. Bei einem Misserfolg der Maßnahme zur Stabilisierung des Rotors wird diese Maßnahme bei der vorliegenden Ausführungsform somit iterativ wiederholt, wobei die Wartezeit zwischen den Stabilisierungsversuchen mit der Anzahl der Iterationen zunehmen kann. Durch die iterativen Versuche, den Stator zu stabilisieren, kann der Verschleiß des Fanglagers weiter minimiert werden, da insgesamt die Wahrscheinlichkeit erhöht wird, dass der Rotor der Vakuumpumpe durch die Stabilisierung wieder in den Normalbetrieb ohne Kontakt zum Fanglager zurückkehrt.

[0024] Dies kann insbesondere dann relevant sein, wenn ein nur kurzzeitiges Störungsereignis vorliegt, das zunächst die Stabilisierung des Rotors verhindert. Nach dem Ende des Störungsereignisses kann die Maßnahme zur Stabilisierung des Rotors mit erheblich größerer Wahrscheinlichkeit als während des Störungsereignisses erfolgreich sein. Dabei kann insbesondere überprüft werden, ob das Störungsereignis, das zunächst detek-

tiert wurde und dem Verschleißinkrement zugeordnet ist, weiterhin andauert, d.h. während und/oder nach der Maßnahme zur Stabilisierung des Rotors. In Abhängigkeit von dieser Überprüfung kann ferner ein zu erreichender Betriebszustand innerhalb des Satzes von Betriebsvorgaben für die Vakuumpumpe ausgewählt werden, wenn der Satz von Betriebsvorgaben für die Vakuumpumpe mehr als einen zu erreichenden Betriebszustand umfasst.

[0025] Bei der Ermittlung bzw. Entscheidung, ob die Maßnahme zur Stabilisierung des Rotors erneut ausgeführt wird, kann ferner ein Kennfeld verwendet werden, das die Wahrscheinlichkeit für eine erneute Stabilisierung des Rotors in Abhängigkeit von der aktuellen Drehzahl des Rotors und/oder weiterer Betriebsparameter der Vakuumpumpe umfasst. Das Kennfeld kann wiederum auf Erfahrungswerten basieren.

[0026] Ferner kann die Vakuumpumpe heruntergefahren werden und/oder eine Fehlermeldung ausgegeben werden, wenn die Variable für den Gesamtverschleiß des Fanglagers einen vorbestimmten Schwellenwert überschreitet. Der Schwellenwert kann von der zu erwartenden Lebensdauer des Fanglagers abhängen. Mittels der Dokumentation des Verschleißes durch die Variable für den Gesamtverschleiß kann somit sichergestellt werden, dass ein möglicherweise defektes Fanglager rechtzeitig ausgetauscht wird.

[0027] Die Größe des Verschleißinkrements kann anhand experimenteller Daten und/oder anhand von Erfahrungswerten geschätzt werden. Die Schätzung der Größe des Verschleißinkrements erfolgt dabei insbesondere basierend auf Messwerten zumindest eines Sensors, die während des Störungsereignisses ermittelt werden. Dadurch kann die Größe des Verschleißinkrements von der Intensität des Störungsereignisses abhängen, die sich beispielsweise in den experimentellen Daten des Sensors widerspiegelt.

[0028] Die Größe des Verschleißinkrements kann ferner in Abhängigkeit von einer Drehzahl des Rotors bei Eintreten des Störungsereignisses und/oder in Abhängigkeit von einer Einbaulage der Vakuumpumpe geschätzt werden. Dabei kann die Größe des Verschleißinkrements insbesondere proportional zum Quadrat der Drehzahl des Rotors sein. Da die Rotationsenergie des Rotors ebenfalls proportional zum Quadrat der Drehzahl des Rotors ist, kann die Größe des Verschleißinkrements somit proportional zur Rotationsenergie des Rotors zunehmen. Insgesamt erfolgt somit eine unterschiedliche Bewertung von Störungsereignissen bei der Dokumentation des Verschleißes in Abhängigkeit von der Drehzahl des Rotors und der Einbaulage der Vakuumpumpe.

[0029] Gemäß einer weiteren Ausführungsform kann das Verschleißinkrement zumindest zwei Anteile umfassen. Von diesen kann ein erster Anteil auf einer anfänglichen Beschleunigung des Fanglagers bei Eintreten des Störungsereignisses basieren, während ein zweiter Anteil auf einem zu erwartenden Verschleiß des Fanglagers während des Stabilisierens des Rotors oder während ei-

nes Auslaufens des Rotors bis zu dessen Stillstand basieren kann. Ferner kann das Verschleißinkrement bei einer erfolgreichen Stabilisierung des Rotors zusätzlich einen dritten Anteil umfassen, der auf einem Auslaufen des Fanglagers nach dem Stabilisieren des Rotors basieren kann. Jeder der drei Anteile kann wiederum in Abhängigkeit von dem Verlauf der Maßnahme zur Stabilisierung des Rotors unterschiedliche Werte aufweisen. Anhand der drei Anteile des Verschleißinkrements kann das Störungsereignis und dessen Auswirkung auf den Verschleiß des Fanglagers detailliert bewertet werden.

[0030] Der Satz von Betriebsvorgaben für die Vakuumpumpe kann zumindest zwei bei einem Störungsereignis zu erreichende Betriebszustände der Vakuumpumpe aufweisen, die das Aufrechterhalten des Vakuums innerhalb der Vakuumpumpe und das Herunterfahren der Vakuumpumpe umfassen. Dabei können die bei einem Störungsereignis zu erreichenden Betriebszustände durch einen Anwender der Vakuumpumpe und/oder durch einen Lernalgorithmus priorisiert werden. Es können somit nicht nur zumindest zwei zu erreichende Betriebszustände im Falle einer Störung vorgegeben werden, sondern es können diese Betriebszustände entweder durch den Anwender der Vakuumpumpe und/oder durch den Lernalgorithmus dynamisch bewertet werden, um den bevorzugt zu erreichenden Betriebszustand an die jeweilige Betriebsweise der Vakuumpumpe bzw. einer Vakuumanlage, in der sich diese befindet, anzupassen.

[0031] Gemäß einer weiteren Ausführungsform kann das anhand des detektierten Störungsereignisses geschätzte Verschleißinkrement für das Fanglager während der Maßnahme zur Stabilisierung des Rotors oder während des Herunterfahrens der Vakuumpumpe aktualisiert werden. Das aktualisierte Verschleißinkrement kann anstelle des zuvor geschätzten Verschleißinkrements zu der Variablen für den Gesamtverschleiß des Fanglagers hinzugefügt werden. Die anfängliche Schätzung des Verschleißinkrements wird somit an den Verlauf der Maßnahmen angepasst, die entweder zur Stabilisierung des Rotors oder zu einem Herunterfahren der Vakuumpumpe führen. Dadurch kann der tatsächliche Verschleiß des Fanglagers auf genauere Weise mittels der Variablen für den Gesamtverschleiß dokumentiert werden.

[0032] Gemäß einer noch weiteren Ausführungsform kann das Fanglager mehrere Lagerstellen aufweisen. Gemäß dem Verfahren kann in diesem Fall ein jeweiliges Verschleißinkrement für jede Lagerstelle ermittelt und zu einer jeweiligen Variablen für den Gesamtverschleiß an der jeweiligen Lagerstelle hinzugefügt werden. Bei dieser Ausführungsform erfolgt somit eine noch detailliertere Dokumentation des Verschleißes des Fanglagers pro Lagerstelle innerhalb des Fanglagers und nicht nur für das Fanglager als Ganzes. Dabei kann das Herunterfahren der Vakuumpumpe und/oder das Ausgeben einer Fehlermeldung dann erfolgen, wenn zumindest eine der Variablen für den Gesamtverschleiß an einer der Lager-

stellen einen vorgegebenen Schwellenwert überschreitet.

[0033] Weiterer Gegenstand der Erfindung ist eine Vakuumpumpe mit einem Rotor, einem Stator, einem aktiv geregelten Magnetlager zum Lagern des Rotors und einem Fanglager für den Rotor. Die Vakuumpumpe umfasst ferner zumindest ein Mittel zum Detektieren eines Störungsereignisses, bei welchem der Rotor bezogen auf den Stator einen für den Rotor vorgesehenen Raumbereich derart verlässt, dass ein Verschleiß an dem Fanglager auftritt. Außerdem umfasst die Vakuumpumpe eine Steuerungseinrichtung und einen Speicher, der eine Variable für den Gesamtverschleiß des Fanglagers umfasst. Die Steuerungseinrichtung ist ausgebildet, um ein Verfahren auszuführen, wie es vorstehend beschrieben ist.

[0034] Die vorstehend genannten Vorteile und die Offenbarung, die für das erfindungsgemäße Verfahren und dessen Ausführungsformen beschrieben sind, gelten folglich sinngemäß auch für die erfindungsgemäße Vakuumpumpe.

[0035] Der Speicher, der die Variable für den Gesamtverschleiß des Fanglagers umfasst, ist somit dem Fanglager direkt zugeordnet, d.h. der Speicher bildet mit dem Fanglager eine Einheit, die bei einer Wartung der Vakuumpumpe gemeinsam mit dem Fanglager ausgetauscht werden kann. Der Speicher kann in das Fanglager integriert sein oder eine weitere Einrichtung darstellen, die dennoch beispielsweise räumlich eine Einheit mit dem Fanglager bildet. In beiden Fällen ist der Speicher jedoch eine separate Einheit bezogen auf die Steuerungseinrichtung, mit welcher der Betrieb der Vakuumpumpe und insbesondere die magnetische Lagerung des Rotors geregelt werden und die bezogen auf die Wartung der Vakuumpumpe unabhängig von dem Fanglager und dem Speicher für die Variable des Gesamtverschleißes zu behandeln ist.

[0036] Der Speicher ermöglicht somit eine Dokumentation des Verschleißes des Fanglagers, beispielsweise über dessen gesamte Lebensdauer und unabhängig von der restlichen Steuerelektronik der Vakuumpumpe. Dabei kann der Speicher ausgebildet sein, um nur das Hinzufügen von Verschleißinkrementen für das Fanglager zu der Variablen für den Gesamtverschleiß des Fanglagers zu ermöglichen und die Variable für den Gesamtverschleiß des Fanglagers ansonsten während der gesamten Lebensdauer des Fanglagers unverändert beizubehalten.

[0037] Das zumindest eine Mittel zum Detektieren des Störungsereignisses kann einen Sensor, der zum Erfassen der räumlichen Lage des Rotors ausgebildet ist, und/oder einen Schwingungs- und/oder Beschleunigungssensor, der an dem Stator angebracht ist, umfassen. Mit Hilfe eines solchen Sensors ist es möglich, in einer frühen Phase Hinweise auf den Beginn eines Störungsereignisses zu erhalten. Dies gilt insbesondere dann, wenn der Sensor als Schwingungs- und/oder Beschleunigungssensor an dem Stator der Vakuumpumpe

angebracht ist.

[0038] Bei der Vakuumpumpe kann es sich ferner um eine Turbomolekularpumpe oder eine Vakuumpumpe mit Siegbahn-Pumpstufen handeln, bei denen der Rotor mittels des aktiv geregelten Magnetlagers gelagert ist.

[0039] Nachfolgend wird die Erfindung beispielhaft anhand vorteilhafter Ausführungsformen unter Bezugnahme auf die beigefügten Figuren beschrieben. Es zeigen, jeweils schematisch:

- Fig. 1 eine perspektivische Ansicht einer Turbomolekularpumpe,
- Fig. 2 eine Ansicht der Unterseite der Turbomolekularpumpe von Fig. 1,
- Fig. 3 einen Querschnitt der Turbomolekularpumpe längs der in Fig. 2 gezeigten Schnittnlinie A-A,
- Fig. 4 eine Querschnittsansicht der Turbomolekularpumpe längs der in Fig. 2 gezeigten Schnittnlinie B-B,
- Fig. 5 eine Querschnittsansicht der Turbomolekularpumpe längs der in Fig. 2 gezeigten Schnittnlinie C-C,
- Fig. 6 eine Vakuumpumpe mit aktiv geregelter Magnetlagerung,
- Fig. 7 eine Radialsensoranordnung, und
- Fig. 8 ein Flussdiagramm eines erfindungsgemäßen Verfahrens zum Betreiben einer Vakuumpumpe.

[0040] Die in Fig. 1 gezeigte Turbomolekularpumpe 111 umfasst einen von einem Einlassflansch 113 umgebenen Pumpeneinlass 115, an welchen in an sich bekannter Weise ein nicht dargestellter Rezipient angeschlossen werden kann. Das Gas aus dem Rezipienten kann über den Pumpeneinlass 115 aus dem Rezipienten gesaugt und durch die Pumpe hindurch zu einem Pumpenauslass 117 gefördert werden, an den eine Vorvakuumpumpe, wie etwa eine Drehschieberpumpe, angeschlossen sein kann.

[0041] Der Einlassflansch 113 bildet bei der Ausrichtung der Vakuumpumpe gemäß Fig. 1 das obere Ende des Gehäuses 119 der Vakuumpumpe 111. Das Gehäuse 119 umfasst ein Unterteil 121, an welchem seitlich ein Elektronikgehäuse 123 angeordnet ist. In dem Elektronikgehäuse 123 sind elektrische und/oder elektronische Komponenten der Vakuumpumpe 111 untergebracht, z. B. zum Betreiben eines in der Vakuumpumpe angeordneten Elektromotors 125 (vgl. auch Fig. 3). Am Elektronikgehäuse 123 sind mehrere Anschlüsse 127 für Zubehör vorgesehen. Außerdem sind eine Datenschnittstelle 129, z.B. gemäß dem RS485-Standard, und ein Strom-

versorgungsanschluss 131 am Elektronikgehäuse 123 angeordnet.

[0042] Es existieren auch Turbomolekularpumpen, die kein derartiges angebrachtes Elektronikgehäuse aufweisen, sondern an eine externe Antriebselektronik angeschlossen werden.

[0043] Am Gehäuse 119 der Turbomolekularpumpe 111 ist ein Fluteinlass 133, insbesondere in Form eines Flutventils, vorgesehen, über den die Vakuumpumpe 111 geflutet werden kann. Im Bereich des Unterteils 121 ist ferner noch ein Sperrgasanschluss 135, der auch als Spülgasanschluss bezeichnet wird, angeordnet, über welchen Spülgas zum Schutz des Elektromotors 125 (siehe z.B. Fig. 3) vor dem von der Pumpe geförderten Gas in den Motorraum 137, in welchem der Elektromotor 125 in der Vakuumpumpe 111 untergebracht ist, eingelassen werden kann. Im Unterteil 121 sind ferner noch zwei Kühlmittelanschlüsse 139 angeordnet, wobei einer der Kühlmittelanschlüsse als Einlass und der andere Kühlmittelanschluss als Auslass für Kühlmittel vorgesehen ist, das zu Kühlzwecken in die Vakuumpumpe geleitet werden kann. Andere existierende Turbomolekularvakuumumpen (nicht dargestellt) werden ausschließlich mit Luftkühlung betrieben.

[0044] Die untere Seite 141 der Vakuumpumpe kann als Standfläche dienen, sodass die Vakuumpumpe 111 auf der Unterseite 141 stehend betrieben werden kann. Die Vakuumpumpe 111 kann aber auch über den Einlassflansch 113 an einem Rezipienten befestigt werden und somit gewissermaßen hängend betrieben werden. Außerdem kann die Vakuumpumpe 111 so gestaltet sein, dass sie auch in Betrieb genommen werden kann, wenn sie auf andere Weise ausgerichtet ist als in Fig. 1 gezeigt ist. Es lassen sich auch Ausführungsformen der Vakuumpumpe realisieren, bei der die Unterseite 141 nicht nach unten, sondern zur Seite gewandt oder nach oben gerichtet angeordnet werden kann. Grundsätzlich sind dabei beliebige Winkel möglich.

[0045] Andere existierende Turbomolekularvakuumumpen (nicht dargestellt), die insbesondere größer sind als die hier dargestellte Pumpe, können nicht stehend betrieben werden.

[0046] An der Unterseite 141, die in Fig. 2 dargestellt ist, sind noch diverse Schrauben 143 angeordnet, mittels denen hier nicht weiter spezifizierte Bauteile der Vakuumpumpe aneinander befestigt sind. Beispielsweise ist ein Lagerdeckel 145 an der Unterseite 141 befestigt.

[0047] An der Unterseite 141 sind außerdem Befestigungsbohrungen 147 angeordnet, über welche die Pumpe 111 beispielsweise an einer Auflagefläche befestigt werden kann. Dies ist bei anderen existierenden Turbomolekularvakuumumpen (nicht dargestellt), die insbesondere größer sind als die hier dargestellte Pumpe, nicht möglich.

[0048] In den Figuren 2 bis 5 ist eine Kühlmittleitung 148 dargestellt, in welcher das über die Kühlmittelanschlüsse 139 ein- und ausgeleitete Kühlmittel zirkulieren kann.

[0049] Wie die Schnittdarstellungen der Figuren 3 bis 5 zeigen, umfasst die Vakuumpumpe mehrere Prozessgaspumpstufen zur Förderung des an dem Pumpeneinlass 115 anstehenden Prozessgases zu dem Pumpenauslass 117.

[0050] In dem Gehäuse 119 ist ein Rotor 149 angeordnet, der eine um eine Rotationsachse 151 drehbare Rotorwelle 153 aufweist.

[0051] Die Turbomolekularpumpe 111 umfasst mehrere pumpwirksam miteinander in Serie geschaltete turbomolekulare Pumpstufen mit mehreren an der Rotorwelle 153 befestigten radialen Rotorscheiben 155 und zwischen den Rotorscheiben 155 angeordneten und in dem Gehäuse 119 festgelegten Statorscheiben 157. Dabei bilden eine Rotorscheibe 155 und eine benachbarte Statorscheibe 157 jeweils eine turbomolekulare Pumpstufe. Die Statorscheiben 157 sind durch Abstandsringe 159 in einem gewünschten axialen Abstand zueinander gehalten.

[0052] Die Vakuumpumpe umfasst außerdem in radialer Richtung ineinander angeordnete und pumpwirksam miteinander in Serie geschaltete Holweck-Pumpstufen. Es existieren andere Turbomolekularvakuumumpen (nicht dargestellt), die keine Holweck-Pumpstufen aufweisen.

[0053] Der Rotor der Holweck-Pumpstufen umfasst eine an der Rotorwelle 153 angeordnete Rotornabe 161 und zwei an der Rotornabe 161 befestigte und von dieser getragene zylindermantelförmige Holweck-Rotorhülsen 163, 165, die koaxial zur Rotationsachse 151 orientiert und in radialer Richtung ineinander geschachtelt sind. Ferner sind zwei zylindermantelförmige Holweck-Statorhülsen 167, 169 vorgesehen, die ebenfalls koaxial zu der Rotationsachse 151 orientiert und in radialer Richtung gesehen ineinander geschachtelt sind.

[0054] Die pumpaktiven Oberflächen der Holweck-Pumpstufen sind durch die Mantelflächen, also durch die radialen Innen- und/oder Außenflächen, der Holweck-Rotorhülsen 163, 165 und der Holweck-Statorhülsen 167, 169 gebildet. Die radiale Innenfläche der äußeren Holweck-Statorhülse 167 liegt der radialen Außenfläche der äußeren Holweck-Rotorhülse 163 unter Ausbildung eines radialen Holweck-Spalts 171 gegenüber und bildet mit dieser die der Turbomolekularpumpen nachfolgende erste Holweck-Pumpstufe. Die radiale Innenfläche der äußeren Holweck-Rotorhülse 163 steht der radialen Außenfläche der inneren Holweck-Statorhülse 169 unter Ausbildung eines radialen Holweck-Spalts 173 gegenüber und bildet mit dieser eine zweite Holweck-Pumpstufe. Die radiale Innenfläche der inneren Holweck-Statorhülse 169 liegt der radialen Außenfläche der inneren Holweck-Rotorhülse 165 unter Ausbildung eines radialen Holweck-Spalts 175 gegenüber und bildet mit dieser die dritte Holweck-Pumpstufe.

[0055] Am unteren Ende der Holweck-Rotorhülse 163 kann ein radial verlaufender Kanal vorgesehen sein, über den der radial außenliegende Holweck-Spalt 171 mit dem mittleren Holweck-Spalt 173 verbunden ist. Außer-

dem kann am oberen Ende der inneren Holweck-Statorhülse 169 ein radial verlaufender Kanal vorgesehen sein, über den der mittlere Holweck-Spalt 173 mit dem radial innenliegenden Holweck-Spalt 175 verbunden ist. Dadurch werden die ineinander geschachtelten Holweck-Pumpstufen in Serie miteinander geschaltet. Am unteren Ende der radial innenliegenden Holweck-Rotorhülse 165 kann ferner ein Verbindungskanal 179 zum Auslass 117 vorgesehen sein.

[0056] Die vorstehend genannten pumpaktiven Oberflächen der Holweck-Statorhülsen 167, 169 weisen jeweils mehrere spiralförmig um die Rotationsachse 151 herum in axialer Richtung verlaufende Holweck-Nuten auf, während die gegenüberliegenden Mantelflächen der Holweck-Rotorhülsen 163, 165 glatt ausgebildet sind und das Gas zum Betrieb der Vakuumpumpe 111 in den Holweck-Nuten vorantreiben.

[0057] Zur drehbaren Lagerung der Rotorwelle 153 sind ein Wälzlager 181 im Bereich des Pumpenauslasses 117 und ein Permanentmagnetlager 183 im Bereich des Pumpeneinlasses 115 vorgesehen.

[0058] Im Bereich des Wälzlagers 181 ist an der Rotorwelle 153 eine konische Spritzmutter 185 mit einem zu dem Wälzlager 181 hin zunehmenden Außendurchmesser vorgesehen. Die Spritzmutter 185 steht mit mindestens einem Abstreifer eines Betriebsmittelspeichers in gleitendem Kontakt. Bei anderen existierenden Turbomolekularvakuumumpen (nicht dargestellt) kann anstelle einer Spritzmutter eine Spritzschraube vorgesehen sein. Da somit unterschiedliche Ausführungen möglich sind, wird in diesem Zusammenhang auch der Begriff "Spritzspitze" verwendet.

[0059] Der Betriebsmittelspeicher umfasst mehrere aufeinander gestapelte saugfähige Scheiben 187, die mit einem Betriebsmittel für das Wälzlager 181, z.B. mit einem Schmiermittel, getränkt sind.

[0060] Im Betrieb der Vakuumpumpe 111 wird das Betriebsmittel durch kapillare Wirkung von dem Betriebsmittelspeicher über den Abstreifer auf die rotierende Spritzmutter 185 übertragen und in Folge der Zentrifugalkraft entlang der Spritzmutter 185 in Richtung des größeren werdenden Außendurchmessers der Spritzmutter 185 zu dem Wälzlager 181 hin gefördert, wo es z.B. eine schmierende Funktion erfüllt. Das Wälzlager 181 und der Betriebsmittelspeicher sind durch einen wannenförmigen Einsatz 189 und den Lagerdeckel 145 in der Vakuumpumpe eingefasst.

[0061] Das Permanentmagnetlager 183 umfasst eine rotorseitige Lagerhälfte 191 und eine statorseitige Lagerhälfte 193, welche jeweils einen Ringstapel aus mehreren in axialer Richtung aufeinander gestapelten permanentmagnetischen Ringen 195, 197 umfassen. Die Ringmagnete 195, 197 liegen einander unter Ausbildung eines radialen Lagerspalts 199 gegenüber, wobei die rotorseitigen Ringmagnete 195 radial außen und die statorseitigen Ringmagnete 197 radial innen angeordnet sind. Das in dem Lagerspalt 199 vorhandene magnetische Feld ruft magnetische Abstoßungskräfte zwischen

den Ringmagneten 195, 197 hervor, welche eine radiale Lagerung der Rotorwelle 153 bewirken. Die rotorseitigen Ringmagnete 195 sind von einem Trägerabschnitt 201 der Rotorwelle 153 getragen, welcher die Ringmagnete 195 radial außenseitig umgibt. Die statorseitigen Ringmagnete 197 sind von einem statorseitigen Trägerabschnitt 203 getragen, welcher sich durch die Ringmagnete 197 hindurch erstreckt und an radialen Streben 205 des Gehäuses 119 aufgehängt ist. Parallel zu der Rotationsachse 151 sind die rotorseitigen Ringmagnete 195 durch ein mit dem Trägerabschnitt 201 gekoppeltes Deckelelement 207 festgelegt. Die statorseitigen Ringmagnete 197 sind parallel zu der Rotationsachse 151 in der einen Richtung durch einen mit dem Trägerabschnitt 203 verbundenen Befestigungsring 209 sowie einen mit dem Trägerabschnitt 203 verbundenen Befestigungsring 211 festgelegt. Zwischen dem Befestigungsring 211 und den Ringmagneten 197 kann außerdem eine Tellerfeder 213 vorgesehen sein.

[0062] Innerhalb des Magnetlagers ist ein Not- bzw. Fanglager 215 vorgesehen, welches im normalen Betrieb der Vakuumpumpe 111 ohne Berührung leer läuft und erst bei einer übermäßigen radialen Auslenkung des Rotors 149 relativ zu dem Stator in Eingriff gelangt, um einen radialen Anschlag für den Rotor 149 zu bilden, damit eine Kollision der rotorseitigen Strukturen mit den statorseitigen Strukturen verhindert wird. Das Fanglager 215 ist als ungeschmiertes Wälzlager ausgebildet und bildet mit dem Rotor 149 und/oder dem Stator einen radialen Spalt, welcher bewirkt, dass das Fanglager 215 im normalen Pumpbetrieb außer Eingriff ist. Die radiale Auslenkung, bei der das Fanglager 215 in Eingriff gelangt, ist groß genug bemessen, sodass das Fanglager 215 im normalen Betrieb der Vakuumpumpe nicht in Eingriff gelangt, und gleichzeitig klein genug, sodass eine Kollision der rotorseitigen Strukturen mit den statorseitigen Strukturen unter allen Umständen verhindert wird.

[0063] Die Vakuumpumpe 111 umfasst den Elektromotor 125 zum drehenden Antreiben des Rotors 149. Der Anker des Elektromotors 125 ist durch den Rotor 149 gebildet, dessen Rotorwelle 153 sich durch den Motorstator 217 hindurch erstreckt. Auf den sich durch den Motorstator 217 hindurch erstreckenden Abschnitt der Rotorwelle 153 kann radial außenseitig oder eingebettet eine Permanentmagnetanordnung angeordnet sein. Zwischen dem Motorstator 217 und dem sich durch den Motorstator 217 hindurch erstreckenden Abschnitt des Rotors 149 ist ein Zwischenraum 219 angeordnet, welcher einen radialen Motorspalt umfasst, über den sich der Motorstator 217 und die Permanentmagnetanordnung zur Übertragung des Antriebsmoments magnetisch beeinflussen können.

[0064] Der Motorstator 217 ist in dem Gehäuse innerhalb des für den Elektromotor 125 vorgesehenen Motorraums 137 festgelegt. Über den Sperrgasanschluss 135 kann ein Sperrgas, das auch als Spülgas bezeichnet wird, und bei dem es sich beispielsweise um Luft oder um Stickstoff handeln kann, in den Motorraum 137 ge-

langen. Über das Sperrgas kann der Elektromotor 125 vor Prozessgas, z.B. vor korrosiv wirkenden Anteilen des Prozessgases, geschützt werden. Der Motorraum 137 kann auch über den Pumpenauslass 117 evakuiert werden, d.h. im Motorraum 137 herrscht zumindest annäherungsweise der von der am Pumpenauslass 117 angeschlossenen Vorvakuumpumpe bewirkte Vakuumdruck.

[0065] Zwischen der Rotornabe 161 und einer den Motorraum 137 begrenzenden Wandung 221 kann außerdem eine sog. und an sich bekannte Labyrinthdichtung 223 vorgesehen sein, insbesondere um eine bessere Abdichtung des Motorraums 217 gegenüber den radial außerhalb liegenden Holweck-Pumpstufen zu erreichen.

[0066] Die vorstehend beschriebene und in Fig. 1 bis 5 dargestellte, beispielhafte Turbomolekularpumpe 111 weist das passive Permanentmagnetlager 183 und das Fanglager 215 auf. Da sich das erfindungsgemäße Verfahren, von dem in Fig. 8 ein Ausführungsbeispiel dargestellt ist, auf eine Vakuumpumpe mit einer aktiven Magnetlagerung eines Rotors bzw. mit einem aktiv geregelten Magnetlager bezieht, welches mit einem Fanglager wie beispielsweise dem Fanglager 215 (vgl. Fig. 3) versehen ist, ist in Fig. 6 zusätzlich eine solche Vakuumpumpe 10 mit aktiver Magnetlagerung dargestellt, die im Folgenden beschrieben wird. Diese Vakuumpumpe 10 kann - abgesehen von den Komponenten zur Lagerung des Rotors 149 - sämtliche Merkmale der vorstehend beschriebenen Vakuumpumpe 111 umfassen.

[0067] Fig. 6 zeigt die Vakuumpumpe 10 in einer schematischen und stark reduzierten Darstellung. Die Vakuumpumpe 10 umfasst einen Rotor 12, welcher eine Mehrzahl an Turborotorscheiben 14 trägt und mittels eines Motors 16 zu einer Drehbewegung um die Rotorachse 18 antreibbar ist, sodass die relativ zu nicht dargestellten Statorscheiben rotierenden Turborotorscheiben 14 eine Pumpwirkung erzeugen. In Fig. 6 verläuft die Pumpwirkung von oben nach unten.

[0068] Der Rotor 12 ist durch mehrere Magnetlager gelagert. Ein erstes Radiallager 20 für den Rotor 12 ist an einem auslassseitigen Ende des Rotors 12 angeordnet. Am selben Rotorende ist ein Axiallager 22 angeordnet. Am einlassseitigen Ende des Rotors 12 ist ein zweites Radiallager 24 angeordnet.

[0069] Das erste Radiallager 20 und das Axiallager 22 sind aktiv geregelt ausgebildet. Sie können also einer radialen bzw. axialen Auslenkung des Rotors 12 von seiner Idealposition aktiv entgegenwirken, beispielsweise über Elektromagnete. Zu diesem Zweck ist bei dem Radiallager 20 eine Radialsensoranordnung 26 angeordnet, mittels derer die radiale Auslenkung des Rotors 12 in einem ersten Axialbereich in zwei zur Rotorachse 16 senkrechten Raumrichtungen messbar ist. Eine Axialsensoranordnung ist ebenfalls vorgesehen, hier aber der Einfachheit halber nicht dargestellt.

[0070] Das zweite Radiallager 24 ist passiv ausgebildet, d.h. es umfasst keinen Aktor zur Beeinflussung des Rotors 12. Vielmehr weist das zweite Radiallager 24 zum Beispiel rotor- und statorseitig eine Mehrzahl von Per-

manentmagneten auf.

[0071] Es ist eine zweite Radialsensoranordnung 28 vorgesehen, mittels derer die Auslenkung des Rotors 12 in einem zweiten Axialbereich messbar ist. Die zweite Radialsensoranordnung 28 ist in dieser Ausführungsform sowohl zwischen dem ersten Radiallager 20 und dem zweiten Radiallager 24 als auch zwischen dem Motor 16 und dem zweiten Radiallager 24 angeordnet ist. Zu diesem Zweck ist die zweite Radialsensoranordnung 28 an einem Bauteil 30 befestigt, welches einen Motorraum 32 des Motors 16 definiert.

[0072] Die erste und die zweite Radialsensoranordnung 26 bzw. 28 sind in axialer Richtung deutlich voneinander beanstandet. Wenn durch sie unterschiedliche Auslenkungen des Rotors 12 im entsprechenden Axialbereich gemessen werden, kann darauf geschlossen werden, dass der Rotor 12 geneigt ist, dass also die Rotorachse 18 des Rotors 12 nicht parallel ist zu einer idealen Rotorachse, welche auch als Nullachse bezeichnet werden kann. Sobald eine Neigung erkannt wird, kann das aktive, erste Radiallager 20 dieser entgegenwirken. Hierzu kann das erste Radiallager 20 beispielsweise den Rotor 12 impulsartig beeinflussen, um den Rotor 12 gewissermaßen in seine aufrechte Lage zurückzustößen. Diese Art der Regelung lässt sich mit derjenigen eines inversen Pendels vergleichen. Wenn ein oberer Bereich des Rotors 12 zu kippen beginnt, wird unten ein Impuls in den Rotor 12 eingebracht, der dem Kippen entgegenwirkt und den Rotor 12 bestenfalls direkt oder nach und nach in seine aufrechte Lage zurückbringt, sodass die Rotorachse 18 parallel zur Nullachse ist. Beispielsweise zeitgleich wird aber nicht nur die Neigung geregelt, sondern die radiale Position des Rotors 12 wird ebenfalls geregelt. Neigungs- und Positionsregelung werden insbesondere einander überlagert.

[0073] Um eine Berührung des Rotors 12 mit einem nicht dargestellten Stator zu vermeiden, beispielsweise bei einer Störung der aktiven Magnetlagerung, sind die Radiallager 20, 24 und das Axiallager 22 jeweils mit einem nicht dargestellten Fanglager versehen, beispielsweise einem Fanglager 215, wie es in Fig. 3 dargestellt ist.

[0074] Eine beispielhafte Radialsensoranordnung 34 ist in Fig. 7 gezeigt. Eine oder beide der ersten und zweiten Radialsensoranordnungen 26 bzw. 28 können entsprechend ausgebildet sein.

[0075] Die Radialsensoranordnung 34 umfasst eine ringförmige Platine 36, auf der mehrere Spulen 38 aufgebracht sind. Ein in seiner Auslenkung zu messender Rotor würde sich durch den Ring hindurch und mit einer Rotorachse senkrecht zur Bildebene erstrecken. Wenn der Rotor ausgelenkt wird, sich also in Fig. 7 entlang der Bildebene verschiebt, verändert dies die in den Spulen 38 induzierte Spannung, was zu einem veränderten Messsignal führt. Von diesem Messsignal kann also auf die Auslenkung geschlossen werden. Dabei sind für jede Bewegungsrichtung x und y zwei Spulen gegenüberliegend vorgesehen.

[0076] Für Vakuumpumpen, wie beispielsweise für die in Fig. 1 bis 6 dargestellten Vakuumpumpen 10, 111, sind prinzipiell unterschiedliche Lagerkonfigurationen mit verschiedenen Varianten und Anordnungen einer aktiven Magnetlagerung möglich. Es kann eine fünfachsige aktive Magnetlagerung erfolgen, die den Rotor 12, 149 mit Ausnahme der Rotationsachse vollständig aktiv geregelt und berührungslos lagert. Weiterhin können eine oder zwei Lagerachsen und/oder eine axiale oder eine von zwei radialen, zweiachsigen Lagerebenen statt mit einem aktiven mit einem passiv wirkenden Permanentmagnetlager, einem berührenden Spitzen-Gleitlager oder einem Wälzlager, bei dem es sich beispielsweise um ein Kugellager handelt, ausgeführt sein. Passiv wirkende Permanentmagnetlager weisen typischerweise auch Fanglager auf (vgl. das Fanglager 215 von Fig. 3), berührende Gleit- oder Wälzlager hingegen meist nicht. Im Folgenden sind mit dem Begriff "Fanglager" stets die verschiedenen möglichen Konfigurationen von ein-, drei-, vier- oder fünfachsigen wirkenden Fanglagern in ihrer Gesamtheit gemeint.

[0077] Die Fanglager 215 der Vakuumpumpen 10, 111 weisen räumlich getrennte Lagerstellen auf, die als einreihige Vollkugellager oder als gepaarte, also auf geringstes Lagerspiel aufeinander abgestimmte oder selektierte Vollkugellagerpaare in O- oder X-Anordnung ausgeführt sind. Einreihige Kugellager werden vor allem für rein radial wirkende Lagerstellen eingesetzt. Bei niedrigen Anforderungen an die Haltbarkeit und/oder geringer Lagerlast eines Fanglagers 215 ist auch die Verwendung eines einreihigen Kugellagers für rein axiale oder kombiniert radial und axial wirkende Lagerstellen möglich. Höhere Anforderungen an eine axiale oder kombiniert radial und axial wirkende Lagerstelle können durch die Verwendung abgestimmter Kugellagerpaare erfüllt werden.

[0078] Die Bestandteile der Kugellager bestehen aus verschiedenen Materialien. Die Innen- und Außenringe der Kugellager sind aus Stahl, Edelstahl oder speziell hochvergüteten Stahlsorten für die Anwendung in Wälzlagern hergestellt. Die Wälzkörper können ebenso aus einer speziell hochvergüteten Stahlsorte oder aus keramischen Materialien bestehen. Ein gegebenenfalls vorhandener Lagerkäfig kann ebenso aus speziell hochvergüteten Stahlsorten oder aus einem verschleißfesten, mit selbstschmierenden Eigenschaften ausgerüsteten Kunststoff mit oder ohne Faseranteilen zur Erhöhung der Festigkeit bestehen. In allen Fällen können Stahlkomponenten abschnitts- oder bereichsweise, komplett oder gezielt auf einzelnen Oberflächen durch verschiedene Arten von Wärmebehandlungen gehärtet sein.

[0079] Vollkugellager weisen kein Führungselement für die Wälzkörper wie etwa einen Lagerkäfig oder andere Formen von Wälzkörper-Abstandshaltern auf. Das Kugellager wird mit so vielen Kugeln wie möglich gefüllt. Ein spezieller Einfüllausschnitt in Lagerring-Wandungen kann den Vorgang des Einfüllens der Kugeln unterstützen. Die gegenüber einer Ausführung mit Lagerkäfig grö-

ßere Anzahl möglicher Wälzkörper ermöglicht eine höhere absolute Traglast des Lagers bei gleichbleibender Baugröße. Weiterhin sind Lagerkäfige üblicherweise nicht ausreichend robust, um die im Einsatzfall hohen Beschleunigungen des Lagers unbeschadet zu überstehen.

[0080] Das Fanglager 215 ist auf der Seite des Stators bzw. an diesem fest eingespannt, und es steht im Normalbetrieb der Vakuumpumpe 10, 111 vollständig still. Das Fanglager 215 kann jedoch alternativ auch auf der Seite des Rotors 149 bzw. an diesem fest eingespannt sein und mit dem Rotor 149 im Normalbetrieb der Vakuumpumpe 10, 111 vollständig mitdrehen. "Vollständig Stillstehen" und "Vollständig Mitdrehen" bedeuten jeweils, dass alle Komponenten des Fanglagers 215 ohne Einwirkung von Lagerlasten während des Normalbetriebs der Vakuumpumpe 10, 111 untereinander nahezu keine Relativbewegungen ausführen.

[0081] Unabhängig davon, ob das Fanglager 215 rotor- oder statorseitig eingespannt ist, ist die andere, frei drehbare Hälfte des Fanglagers 215 so mit einem freibleibenden Spalt zur Gegenseite angeordnet, dass nur bei einer Auslenkung des Rotors 12, 149, die über das im Normalbetrieb des aktiven Magnetlagers übliche Maß hinausgeht, ein berührender Kontakt zwischen dem Fanglager 215 und einer Kontaktfläche im Stator und damit die Not-Lagerung, welche die Auslenkung mechanisch begrenzt, hergestellt wird. Nur im Fanglagerbetrieb findet eine Drehung zwischen Innen- und Außenring des Fanglagers 215 statt, die einen Verschleiß des Fanglagers 215 verursacht. Das verbleibende Spiel zwischen den Kontaktflächen wird als Fanglagerspiel bezeichnet. Üblicherweise wird das Fanglagerspiel als das absolute Gesamtspiel des Systems in einer Bewegungsachse oder -ebene angesehen. Bei Radiallagern ist dies die absolute Differenz der Durchmesser beider Kontaktflächen und nicht die Differenz der beiden Radien, die die Größe des eigentlichen, im Normalbetrieb durchschnittlich am Umfang der Kontaktflächen herrschenden, umlaufenden absoluten Spalts beschreiben würde. Dies gilt analog für ein Axiallager, bei denen entsprechende lineare Maßstrecken zwischen den Kontaktflächen vorzufinden sind.

[0082] Im Betrieb der aktiven Magnetlager 20, 22 können parasitäre Schleppeffekte dazu führen, dass die frei drehbare Hälfte des Fanglagers 215 selbstständig beginnt, mit der frei beabstandeten Gegenseite des Fanglagers 215 mitzudrehen. Die parasitären Schleppeffekte sind beispielsweise durch elektromagnetische Wechselwirkungen oder durch Gasreibung in einem engen Spalt bei sehr hohen Drehzahldifferenzen bzw. Geschwindigkeitsunterschieden zwischen den Hälften des Fanglagers 215 bedingt. Für den Fall eines Fanglagers 215, das am Rotor 12, 149 befestigt ist und sich mit diesem dreht, bewirken die parasitäre Schleppeffekte umgekehrt, dass die frei drehbare Hälfte des Fanglagers 215 bei Beobachtung in einem globalen Bezugssystem auf der Statorseite stehenzubleiben scheint.

[0083] Wenn das unerwünschte Mitdrehen dauerhaft auftritt, ist damit ein unnötiger Verschleiß des Fanglagers 215 verbunden. Um diesem unnötigen Verschleiß entgegenzuwirken, erfolgt eine derartige Einwirkung auf die frei drehbare Hälfte des Fanglagers 215, dass das unerwünschte Mitdrehen unterdrückt oder ausreichend gehemmt wird. Die Einwirkung erfolgt beispielsweise mittels mechanisch berührender, elektromagnetisch wirkender Bremsen oder mittels spezieller Lagerkonfigurationen, wie etwa mittels klemmend eingesetzter Wälzkörper oder bewusst unrund ausgeführter bzw. nicht perfekter Lagerelemente.

[0084] Im Gegensatz zum unerwünschten Mitdrehen erfolgt bei einer Störung oder einem Ausfall der Magnetlagerung eine Auslenkung des Rotors 12, 149 aus seinem vorbestimmten Bewegungsbereich heraus. Diese Auslenkung ist durch den Kontakt der frei drehbaren Hälfte des Fanglagers 215 mit der Gegenseite räumlich begrenzt. Durch Gleit- und Haftreibungseffekte wird eine sehr schnelle, nahezu vollständige Angleichung der Rotationsgeschwindigkeiten der frei drehbaren Hälfte und deren Gegenseite in dem Fanglager 215 bewirkt. Die dadurch auftretende Notlagerung verhindert weitergehende Schäden an der Vakuumpumpe 10, 111 durch unerwünschte Kontakte zwischen Rotor- und Statorelementen. Die Vakuumpumpe 10, 111 befindet sich im Fanglagerbetrieb.

[0085] Je nach Art der Störung wird entweder der Fanglagerbetrieb durch eine Wiederaufnahme der aktiven Magnetlagerung beendet, oder die Pumpe bleibt bis zum Stillstand des Rotors 12, 149 im Fanglagerbetrieb. Die Wiederaufnahme der aktiven Magnetlagerung wird auch als Wiederaufstarten, Wiederaufnahme oder Restabilisierung bezeichnet. Der Vorgang des Auslaufens, Verlangsamens oder Herunterlaufens des Rotors 12, 149 bis zum Stillstand während eines Fanglagerbetriebs, insbesondere von einer Betriebsdrehzahl der Vakuumpumpe 10, 111 bis zum Stillstand, wird allgemein als Vollauslauf bezeichnet. Erfolgt eine Restabilisierung während eines Fanglagerbetriebs, bevor der Rotor 12, 149 den Stillstand erreicht, wird dies als Teilauslauf mit einer bestimmten Anfangs- und Enddrehzahl bezeichnet. Der Teilauslauf erfolgt beispielsweise von der Betriebsdrehzahl der Vakuumpumpe 10, 111 bis zu einer Restabilisierungsdrehzahl, die zwar geringer als die Betriebsdrehzahl, aber annähernd gleich dieser ist. All diese Vorgänge umfassen einen zwischen einem Anfangs- und Endzeitpunkt liegenden und verschiedenen langen Zeitraum des Fanglagerbetriebs, welcher auch als Laufzeit im Fanglagerbetrieb bezeichnet wird.

[0086] Die Art der Störung kann durch die Berücksichtigung zusätzlicher Sensoren an, in oder in der Nähe der Vakuumpumpe 10, 111 detailliert ermittelt werden, zum Beispiel mit Hilfe eines oder mehrerer Schwingungs- und/oder Beschleunigungssensoren, die eine oder mehrere Wirkrichtungen erfassen. Wenn Störungsereignisse mittels solcher Sensoren am Stator der Vakuumpumpe 10, 111 erfasst werden, sind einsetzende Störungen frühzeitig zu erkennen.

her erkennbar als ausschließlich mittels der Überwachung der Positionssignale der Radialsensoranordnungen 26, 28 für den Rotor 12, 149 innerhalb der aktiven Magnetlagerung. Mechanische Störungen gehen üblicherweise von der Anlagen- bzw. Statorseite aus und führen zu einer Verlagerung des Stators im Raum. Bei beginnender Auslenkung wird der Rotor 12, 149 als stabilisierter Kreisel dem Stator durch die aktive Magnetlagerung in seiner Position verzögert nachgeführt. Eine sofortige und vollumfängliche Kenntnis der extern einwirkenden Beschleunigungen und der Bewegungen des Stators kann durch die aktive Magnetlagerung einerseits zur Optimierung der Lageregelung genutzt werden. Andererseits ermöglicht diese Kenntnis eine Vorhersage des entstehenden Fanglagerschleißes und eine Vorhersage für das Andauern der Störung.

[0087] Eine mögliche Ursache für eine Störung der Magnetlagerung ist der Ausfall der Versorgungsspannung. In diesen Fall kann der Fanglagerbetrieb auf verschiedene Weise vermeiden oder herausgezögert werden. Einerseits kann ein Element oder eine Steuerung der Vakuumpumpe 10, 111 bzw. der aktiven Magnetlagerung einen Energiespeicher aufweisen, zum Beispiel einmalig verwendbare Batterie- bzw. Primärzellen und/oder Akkumulatoren und/oder Kondensatoren hoher Kapazität, die eine Notversorgung der aktiven Magnetlagerung sicherstellen. Andererseits kann der in der Vakuumpumpe 10, 111 enthaltene Antrieb derart ausgelegt sein, dass er nicht nur antreiben, sondern auch generatorisch wirken kann. Dadurch wird Rotationsenergie zurück in elektrische Energie umgewandelt, die dann eine Notversorgung der aktiven Magnetlagerung ermöglicht.

[0088] Sollte eines oder eine Kombination verschiedener solcher Sicherungsmittel vorhanden sein, tritt bis zum Versagen des letzten Sicherungsmittels kein Fanglagerbetrieb ein. Der Rotor 12, 149 kann jedoch bei einem Ausfall der Versorgungsspannung nicht weiter angetrieben werden, so dass er aktiv gelagert entweder frei oder generatorisch gebremst bis zum Stillstand ausläuft. Solch ein Auslaufen des Rotors 12, 149 kann zwischen wenigen Sekunden und mehreren Stunden andauern, was von der Qualität und der Aufrechterhaltung des Vakuums in der Vakuumpumpe 10, 111, der Höhe elektromagnetischer Verlusten der Komponenten, die zum Beispiel durch Wirbelströme und Ummagnetisierungsverluste hervorgerufen werden, dem Energieverbrauch der aktiven Magnetlagerung und einer optionalen aktiven Bremsung durch einen zusätzlichen Lastwiderstand abhängt. Wenn alle Sicherungsmittel zur Aufrechterhaltung der Spannungsversorgung der aktiven Magnetlagerung vor dem Stillstand des Rotors 12, 149 versagen, setzt der Fanglagerbetrieb ein. Dies geschieht üblicherweise als Teilauslauf ohne Möglichkeit eines Versuchs zur Restabilisierung von einer mittleren bis niedrigen Drehzahl von weniger als 15 bis 20 % der Enddrehzahl bis zum Stillstand des Rotors 12, 149.

[0089] Der im Fanglagerbetrieb auftretende Verschleiß des Fanglagers 215 hängt von mehreren Fakto-

ren ab, von denen die Laufzeit und die Drehzahl des Rotors 12, 149 im Fanglagerbetrieb primäre Einflussfaktoren darstellen. Ein weiterer Einflussfaktor ist die Relativgeschwindigkeit zwischen der frei drehbaren Hälfte des Fanglagers und deren Gegenseite zu Anfang eines Fanglagerbetriebs, d.h. im Moment des Kontakts der Hälften des Fanglagers, da im Moment des Kontakts eine sofortige, schlagartige Beschleunigung des Fanglagers stattfindet. In dem extrem kurzen Zeitraum der Beschleunigung befinden sich die frei drehbare Hälfte des Fanglagers 215 und deren Gegenseite mit dem Rotor 12, 149 in einer chaotischen, nicht stabilen Betriebsphase.

[0090] Stark vereinfacht teilt sich diese Betriebsphase in mehrere Schritte auf. Zuerst reißt die in Kontakt kommende Gegenseite den frei drehenden Ring des Fanglagers 215 mit, und dieser Ring reißt dann die Wälzkörper des Fanglagers 215 mit. Währenddessen finden eine jeweilige Relativbewegung mit Gleitreibung zwischen allen Elementen statt, also der Gegenseite, dem frei drehenden Ring des Fanglagers, den Wälzkörpern des Fanglagers 215 und dem feststehenden Ring des Fanglagers 215. Alle Elemente erreichen anschließend einen stabilen Betriebszustand, in welchem eine überwiegend nicht chaotische Abwälzung und damit eine bestimmungsgemäße Funktion der Elemente erfolgen. Während des kurzzeitig chaotischen Betriebszustands sowohl zwischen Fanglager und Gegenseite als auch und zwischen Elementen im Inneren des Fanglagers entstehen verschiedene Reibungszustände, Losbrechkkräfte und Belastungsspitzen der Traglast, die umso höher sind, je höher die auftretende Beschleunigung ist.

[0091] Auch nach dem Erreichen des stabilen Betriebszustands des Fanglagerbetriebs verbleiben Restanteile von chaotischem Verhalten, da sich der Rotor 12, 149 in dem Bereich des zwingend vorhandenen Fanglagerspiels während des Fanglagerbetriebs frei bewegen und jederzeit seine Position oder seinen Kontaktpunkt im Fanglager 215 verlagern kann. Dies geschieht typischerweise durch verschiedene Eigenbewegungsmoden und die Kreiselkräfte des Rotors 12, 149 und ist auch Folge der während des Fanglagerbetriebs durch das Fanglagerspiel verlagerten mechanischen Drehachse des Systems aus Fanglager 215 und Rotor 12, 149 gegenüber der geometrischen wie inertialen Hauptachse des Rotors 12, 149. Im Bewegungsbereich des Fanglagerspiels finden unregelmäßig und je nach Konfiguration und/oder Einbauorientierung der Vakuumpumpe 10, 111, d.h. in Abhängigkeit von der Lage des Schwerpunkts des Rotors 12, 149 in Relation zu den Fanglagerpositionen und/oder in Abhängigkeit von der räumlichen Ausrichtung des Rotors 12, 149 zur Schwerkraft, unterschiedlich häufig Verkippungen, Torkelbewegungen oder allgemein chaotische, unregelmäßige Verlagerungen des Rotors 12, 149 im Fanglager 215 statt.

[0092] Das Fanglagerspiel bedingt auch, dass abhängig von der Konfiguration und/oder Einbauorientierung der Vakuumpumpe 10, 111 die frei drehende Hälfte des Fanglagers 215 und deren Gegenseite während des

Fanglagerbetriebs zeitweise oder dauerhaft eine abwälzende Bewegung zueinander ausführen. Aus dem Bereich der Rotationslagertechnik ist dieses Phänomen bei falsch ausgelegten Lagerstellen bekannt. Dort bezeichnet man diese Konstellation als drehende Welle mit Spielpassung am Innenring und Umfangslast. In diesem Fall entspricht die Umlaufdrehzahl des frei drehenden Rings bzw. der frei drehende Hälfte des Fanglagers 215 nicht der Drehzahl des Rotors 12, 149, sondern weicht geringfügig von dieser ab, da die Abwälzung zueinander ein zusätzliches Übersetzungsverhältnis bewirkt.

[0093] Ferner können auch elastische Verformungen der Fanglager 215, des Rotors 12, 149 und des Stators durch die hohen Betriebslasten während aller Phasen des Fanglagerbetriebs als zusätzlicher Einflussfaktor auftreten und die verschiedenen vorstehend beschriebenen Effekte verstärken. Die Eigenfrequenzen dieser Verformungen sollten derart gewählt werden, dass diese nicht zu Resonanzereignissen und damit zu einer Zerstörungen an Komponenten der Vakuumpumpe 10, 111 führen. Durch dynamisch auftretenden Verformungen entstehen möglicherweise auch unerwartete und unerwünschte Kontaktstellen zwischen dem Rotor 12, 149 und dem Stator, die bei rein statischer Toleranzbetrachtung der Maßketten in jedem Fall ausreichend Spiel oder Abstand zueinander aufweisen würden, im dynamischen Fall aber Kontaktstellen bilden und zu einer Zerstörung von Komponenten der Vakuumpumpe 10, 111 führen können.

[0094] Da das Fanglager 215 nicht für einen dauerhaften Betrieb ausgelegt ist und die Lebensdauer eines Fanglagers 215 während des Fanglagerbetriebs üblicherweise nur einige Minuten bis hin zu wenigen Stunden beträgt, ist der Fanglagerbetrieb so kurz wie möglich zu halten. Jeder Fanglagerbetrieb führt zu einem Verschleiß des Fanglagers 215, sowohl zwischen den Kontaktflächen als auch innerhalb des Fanglagers 215 zwischen den einzelnen Elementen, d.h. den Wälzkörpern sowie Innen- und Außenringen. Im Extremfall ist eine Vakuumpumpe 10, 111 bereits nach einem schweren Störungsereignis mit Fanglagerbetrieb nicht mehr betriebsbereit und muss vor der nächsten Inbetriebnahme repariert werden.

[0095] In Fig. 8 ist ein schematisches Blockdiagramm eines erfindungsgemäßen Verfahrens dargestellt, das zum Betreiben einer Vakuumpumpe 10, 111 (vgl. Fig. 1 bis 6) vorgesehen ist, die ein aktiv geregeltes Magnetlager 20, 22 zum Lagern des Rotors 12, 149 und ein entsprechendes Fanglager 215 aufweist. Das Verfahren kann jedoch auch bei anderen Vakuumpumpen verwendet werden, die eine aktiv geregelte Magnetlagerung und ein Fanglager aufweisen. Beispielsweise kann das Verfahren bei einer Vakuumpumpe mit Siegbahn-Pumpstufen verwendet werden.

[0096] Das Verfahren 300 beginnt bei 310 damit, dass ein Störungsereignis detektiert wird, bei welchem der Rotor 12, 149 bezogen auf den Stator einen Raumbereich verlässt, der für den Rotor 12, 149 im Normalbetrieb vor-

gesehen ist. Das Störungsereignis wird beispielsweise mittels der Magnetlager-Positionssensoren 26, 28 nachgewiesen, welche die radiale und axiale Lage des Rotors 12, 149 erfassen.

[0097] Durch das Störungsereignis kann ein Verschleiß an dem Fanglager 215 auftreten. Daher wird gemäß dem Verfahren bei 310 ein Verschleißinkrement 315-1 geschätzt, das dem detektierten Störungsereignis zugeordnet ist. Das geschätzte Verschleißinkrement 315 kann beispielsweise anhand der Messdaten der Magnetlager-Positionssensoren 26, 28 geschätzt werden, die angeben, wie weit sich der Rotor 12, 149 von der für diesen Normalbetrieb vorgesehenen Position entfernt hat. Das Verschleißinkrement 315-1 wird anhand dieser Messdaten und anhand von Erfahrungswerten geschätzt, die diesen Messwerten zugeordnet sind.

[0098] Das Verschleißinkrement 315-1 wird anschließend an einen Speicher 320 übertragen, der eine Variable für den Gesamtverschleiß des Fanglagers 215 umfasst und somit zur Dokumentation des Verschleißes des Fanglagers 215 vorgesehen ist. Der Speicher 320 gehört daher zur Vakuumpumpe 10, 111 und kann in der Nähe des Fanglagers 215 angeordnet sein (vgl. Fig. 3).

[0099] Das Verschleißinkrement 315-1 wird zu der Variablen 325 für den Gesamtverschleiß des Fanglagers 215 hinzugefügt bzw. addiert. Die Variable 325 für den Gesamtverschleiß des Fanglagers 215 wird bei der Installation bzw. Inbetriebnahme der Vakuumpumpe 10, 111 mit Null initialisiert. Das Verschleißinkrement 315-1 und die Variable 325 für den Gesamtverschleiß des Fanglagers 215 werden jeweils als Prozentanteil dargestellt, der sich auf den maximal zulässigen Verschleiß des Fanglagers 215 bezieht, bei welchem eine Wartung der Vakuumpumpe 10, 111 mit Austausch des Fanglagers 215 erforderlich ist. Mit anderen Worten beziehen sich das Verschleißinkrement 315-1 und die Variable 325 für den Gesamtverschleiß des Fanglagers 215 jeweils auf einen Prozentanteil der gesamten Lebensdauer des Fanglagers 215.

[0100] Gemäß dem Verfahren wird ferner ein Satz 330 von Betriebsvorgaben für die Vakuumpumpe 10, 111 bereitgestellt. Der Satz 330 von Betriebsvorgaben umfasst Betriebszustände der Vakuumpumpe 10, 111, die bei dem Auftreten des Störungsereignisses, das bei 310 detektiert wird, erreicht werden sollen. Die zu erreichenden Betriebszustände sind beispielsweise "Vakuum unbedingt aufrechterhalten" und "den Rotor der Turbomolekularpumpe möglichst schnell zum Stillstand bringen". Der Satz 330 von Betriebsvorgaben für die Vakuumpumpe 10, 111 kann jedoch weitere zu erreichende Betriebszustände der Vakuumpumpe 10, 111 umfassen, die zwischen den "Extremzuständen" einzuordnen sind, d.h. zwischen "Vakuum aufrechterhalten" und "Stillstand des Rotors".

[0101] Bei 340 erfasst eine Steuerungseinrichtung der Vakuumpumpe 10, 111, welche in dem Elektronikgehäuse 123 (vgl. Fig. 1 bis 3) untergebracht ist, die Information von Schritt 310, dass ein Störungsereignis für den Rotor

12, 149 der Vakuumpumpe 10, 111 detektiert wurde. Außerdem erfasst die Steuerungseinrichtung bei 340 die Variable 325 für den Gesamtverschleiß des Fanglagers 215 aus dem Speicher 320 und den Satz 330 der Betriebsvorgaben für die Vakuumpumpe 10, 111. Bei 340 wird ferner zwischen der Variablen 325 für den Gesamtverschleiß des Fanglagers 215 und dem Satz 330 der Betriebsvorgaben für die Vakuumpumpe 10, 111 "vermittelt". Konkret wird anhand des Wertes der Variablen 325 für den Gesamtverschleiß des Fanglagers 215 entschieden, welche der Betriebsvorgaben des Satzes 330 umgesetzt werden sollte, d.h. welcher der Betriebszustände des Satzes 330 für das vorliegende Störungsereignis zu erreichen ist. Anhand des ausgewählten zu erreichenden Betriebszustands wird ferner bei 350 ermittelt, ob eine Maßnahme zur Stabilisierung des Rotors 12, 149 ausgeführt wird. Eine solche Maßnahme umfasst, dass der Rotor 12, 149 mittels der aktiven Magnetlagerung wieder in eine vorgegebene Raumposition für den Normalbetrieb der Vakuumpumpe 10, 111 zurückgebracht wird.

[0102] Wenn bei 350 ermittelt wird, dass keine Maßnahme zur Stabilisierung des Rotors 12, 149 ausgeführt werden soll, wird die Vakuumpumpe 10, 111 bei 360 heruntergefahren, wobei ein Vollaustausch des Rotors 12, 149 bis zum Stillstand erfolgt. Für den Vollaustausch des Rotors 12, 149 wird bei 360 ein weiteres Verschleißinkrement 315-2 ermittelt, das von der Drehzahl des Rotors zu Beginn des Vollaustauschs und von Erfahrungswerten für den Verschleiß bei einem Vollaustausch abhängt. Das Verschleißinkrement 315-2 für den Vollaustausch wird an den Speicher 320 übertragen und anstelle des geschätzten Verschleißinkrements 315-1 zu der Variablen 325 für den Gesamtverschleiß des Fanglagers 215 hinzugefügt. Das geschätzte Verschleißinkrement 315-1 wird somit mittels des für den Vollaustausch ermittelten Verschleißinkrements 315-2 aktualisiert, wobei beispielsweise eine Differenz zwischen den Verschleißinkrementen 315-2 und 315-1 der Variablen 325 für den Gesamtverschleiß des Fanglagers 215 hinzugefügt wird.

[0103] Wenn bei 350 ermittelt wird, dass eine Maßnahme zur Stabilisierung des Rotors 12, 149 ausgeführt werden soll, erfolgt die tatsächliche Ausführung dieser Maßnahme. Die Maßnahme soll somit die vorstehend beschriebene "Restabilisierung" des Rotors 12, 149 bewirken, der vor dem bei 310 detektierten Störungsereignis bereits stabil war. Bei 370 wird überprüft, ob die Maßnahme zur Stabilisierung bzw. Restabilisierung des Rotors 12, 149 erfolgreich ist. Ist dies der Fall, kehrt die Vakuumpumpe 10, 111 bei 380 zum Normalbetrieb zurück, da sich der Rotor 12, 149 wieder in der gewünschten räumlichen Lage für den Normalbetrieb befindet.

[0104] Wenn bei 370 ermittelt wird, dass die Stabilisierung des Rotors 12, 149 nicht erfolgreich ist, wird bei 390 eine bestimmte Wartezeit abgewartet, bevor das Verfahren zu 340 zurückkehrt, um zu ermitteln, ob eine Maßnahme zur Stabilisierung des Rotors 12, 149 noch mal ausgeführt werden soll. Gleichzeitig wird bei 390 ein

aktualisiertes Verschleißinkrement 315-3 ermittelt, das dem fehlgeschlagenen Versuch zur Stabilisierung des Rotors 12, 149 zugeordnet ist. Ähnlich wie das Verschleißinkrement 315-2 wird das aktualisierte Verschleißinkrement 315-3 anstelle des geschätzten Verschleißinkrements 315-1 der Variablen 325 für den Gesamtverschleiß der Vakuumpumpe 10, 111 hinzugefügt. Dabei kann wiederum lediglich eine Differenz zwischen den Verschleißinkrementen 315-3 und 315-1 nachträglich zu der Variablen 325 für den Gesamtverschleiß der Vakuumpumpe 10, 111 addiert werden, d.h. nachdem das geschätzte Verschleißinkrement 315-1 bereits zu der Variablen 325 für den Gesamtverschleiß der Vakuumpumpe 10, 111 addiert wurde.

[0105] Nach der Wartezeit bei 390 werden die Schritte 340 bis 380 wiederholt, d.h. es wird zunächst bei 340 ermittelt, ob ein erneuter Versuch zur Stabilisierung des Rotors 12, 149 erfolgen soll. Bei der erneuten Ausführung der Verfahrensschritte 340 bis 380 wird zusätzlich überprüft, ob das bei 310 detektierte Störungsereignis weiterhin vorliegt. Ist dies nicht der Fall, nimmt die Wahrscheinlichkeit erheblich zu, dass eine Stabilisierung des Rotors 12, 149 erfolgreich sein wird. Dementsprechend wird in diesem Fall bei 350 ermittelt, dass eine Stabilisierung des Rotors 12, 149 durchgeführt werden soll. Wenn die Stabilisierung des Rotors 12, 149 jedoch erneut fehlschlägt, was bei 370 ermittelt wird, können die Schritte 390, 340, 350 und 370 iterativ wiederholt werden, wobei die Wartezeit bei 390 für jeden fehlgeschlagenen Versuch zur Stabilisierung des Rotors 12, 149 verlängert wird.

[0106] Zusätzlich ist es möglich, dass mittels der Verschleißdokumentation für das Fanglager 215 im Speicher 320, d.h. mittels der Variablen 325 für den Gesamtverschleiß der Vakuumpumpe 10, 111, der Satz 330 von Betriebsvorgaben für die Turbomolekularpumpe beeinflusst wird, wie dies durch den Pfeil 395 angedeutet ist. Beispielsweise kann eine Priorisierung zwischen den zu erreichenden Betriebszuständen der Vakuumpumpe 10, 111 bei einem Störungsereignis anhand des Werts der Variablen 325 für den Gesamtverschleiß der Vakuumpumpe 10, 111 verändert werden. Der Satz 330 von Betriebsvorgaben für die Vakuumpumpe 10, 111 umfasst in diesem Fall nicht nur die zu erreichenden Betriebszustände an sich, sondern auch Werte zur Priorisierung zwischen diesen Betriebszuständen, die bei 340 und 350 verwendet werden können, um zu entscheiden, ob eine Maßnahme zur Stabilisierung des Rotors 12, 149 ausgeführt werden soll.

[0107] Im Folgenden wird die Dokumentation des Verschleißes für das Fanglager 215 anhand von Zahlenbeispielen für das Verschleißinkrement 315-1 und die Variable 325 für den Gesamtverschleiß im Detail erläutert. Die Zahlenwerte sind für eine Vakuumpumpe 10, 111 repräsentativ, bei der es sich um eine Turbomolekularpumpe handelt. Sie können jedoch je nach Typ der Vakuumpumpe unterschiedlich sein und andere als die angegebenen Werte annehmen.

[0108] Wie vorstehend erwähnt ist, beziehen sich das Verschleißinkrement 315-1 und die Variable 325 für den Gesamtverschleiß des Fanglagers 215 jeweils auf einen Prozentanteil der gesamten Lebensdauer des Fanglagers 215. Die Dokumentation des Verschleißes erfolgt derart, dass die Variable 325 für den Gesamtverschleiß des Fanglagers 215 zunächst mit Null initialisiert und anschließend bei jedem detektierten Störungsereignis (vgl. Schritt 310 in Fig. 8) mit einem Verschleißinkrement 315-1 erhöht wird. Erreicht die Variable 325 für den Gesamtverschleiß des Fanglagers 215 den Wert von 100%, wird eine Fehlermeldung ausgegeben. Der Wert von 100% für den Gesamtverschleiß entspricht somit der zu erwartenden Lebensdauer des Fanglagers 215.

[0109] Falls die Variable 325 für den Gesamtverschleiß des Fanglagers 215 diesen Wert von 100% beispielsweise während eines Auslaufens der Vakuumpumpe 10, 111 erreicht, wird die Variable 325 für den Gesamtverschleiß des Fanglagers 215 dennoch bis zum Stillstand der Vakuumpumpe 10, 111 weiterhin mit Verschleißinkrementen 315-1 erhöht, um den Verschleiß des Fanglagers 215 möglichst vollständig zu dokumentieren. Dadurch ist es möglich, dass die Variable 325 beim Stillstand der Vakuumpumpe 10, 111 einen Wert größer als 100% aufweist, beispielsweise 130%.

[0110] Umgekehrt ist jedoch auch möglich, dass die Variable 325 für den Gesamtverschleiß des Fanglagers 215 mit einem Wert von 100% initialisiert wird. In diesem Fall wird die Variable 325 bei jedem Störungsereignis um ein jeweiliges Verschleißinkrement 315-1 verringert. Eine Fehlermeldung wird bei dieser "negativen Zählweise" der Verschleißinkremente dann ausgegeben, wenn die Variable 325 den Wert von 0% erreicht. Zur vollständigen Verschleißdokumentation kann die Variable 325 entsprechend dem vorstehenden Beispiel bis zum Stillstand der Vakuumpumpe 10, 111 einen negativen Wert annehmen, beispielsweise -30%.

[0111] Wie in Fig. 8 zu erkennen ist, verursachen die verschiedenen Vorgänge bzw. Verfahrensschritte 310, 360, 390 verschiedene Verschleißinkremente 315-1, 315-2, 315-3. Zum Beispiel bewirkt bei Schritt 360 ein Vollausschlag von der Betriebsdrehzahl der Vakuumpumpe 10, 111, d.h. von deren erreichbarer Enddrehzahl, bis zum Stillstand unter Beibehaltung des Vakuums ein Verschleißinkrement 315-2 von 41 %. Dieses Verschleißinkrement 315-2 setzt sich vereinfacht dargestellt aus zwei Komponenten zusammen. Die erste Komponente resultiert aus der initialen Beschleunigung des frei drehenden Teils des Fanglagers 215 und beträgt im vorliegenden Beispiel 1 %, während die zweite Komponente aus dem eigentlichen Auslauf des Rotors 12, 149 im Fanglagerbetrieb bis zum Stillstand resultiert und im vorliegenden Beispiel 40 % beträgt. Wenn jedoch die Zeit des Auslaufs des Rotors 12, 149 durch Fluten der Vakuumanlage, in der sich die Vakuumpumpe 10, 111 befindet, oder durch generatorisches Bremsen der Vakuumpumpe 10, 111 beispielsweise halbiert werden kann, so halbiert sich in erster Näherung auch das Verschleißinkrement 315-2

auf einen Wert von etwa 20 %. In diesem Fall führt der Vollausschlag des Rotors 12, 149 nach Summierung beider Komponenten zu einem Verschleißinkrement 315-2 von 21 %.

[0112] Ein Störungsereignis, das bei Schritt 310 (vgl. Fig. 8) zum Fanglagerbetrieb führt, kann entweder kurzzeitig oder dauerhaft wirken. Entfällt das Störungsereignis nach kurzer Zeit, wird kein kompletter Vollausschlag des Rotors 12, 149 ausgeführt, da ein direkt ausgeführter Versuch der Restabilisierung der aktiven Magnetlagerung und des Rotors 12, 149 sofort gelingen kann. Für einen solchen Fall des nur kurzzeitigen Fanglagerbetriebs mit Restabilisierung setzt sich das Verschleißinkrement 315-3 typischerweise aus drei Komponenten zusammen. Die erste Komponente resultiert wiederum aus der initialen Beschleunigung des Fanglagers 215 und beträgt 1 %, während die zweite Komponente aus dem eigentlichen Vorgang der Restabilisierung resultiert und zu dem Verschleißinkrement 315-3 etwa 1,5 % beiträgt. Die dritte Komponente betrifft den freien Auslauf des Fanglagers 215 bis zu dessen Stillstand mit einem Beitrag zu dem Verschleißinkrement 315-3 von etwa 0,5 %. Eine singulär auftretende, kurzzeitige Störung mit kurzzeitigem Fanglagerbetrieb in einer Zeitspanne von wenigen Sekunden führt folglich im optimalen Fall, bei dem die Restabilisierung des Rotors 12, 149 mittels des aktiven Magnetlagers sofort erfolgreich ist, insgesamt zu einem Verschleißinkrement 315-3 von 3 %.

[0113] Sollte dieser erste Versuch der Restabilisierung des Rotors 12, 149 nicht erfolgreich sein, beispielsweise aufgrund einer weiter andauernden Störung, entstehen weitere bzw. andersartige Verschleißinkremente 315-3 während des fortdauernden Fanglagerbetriebs. Wenn sich an den nicht erfolgreichen Versuch der Restabilisierung ein Vollausschlag des Rotors 12, 149 anschließt, leistet dieser Vollausschlag, wie vorstehend erläutert, je nach Dauer bis zum Stillstand des Rotors einen Beitrag von 20 % bis 40 % zum Verschleißinkrement 315-2. Andererseits entfällt jedoch der Beitrag für den Auslauf des Fanglagers 215 nach dem Ende der Restabilisierung, da dieser Auslauf nicht stattfindet. Zusammenfassend setzt sich somit das Verschleißinkrement 315-2 für eine länger andauernde Störung, während der ein Versuch der Restabilisierung erfolglos ist und anschließend ein gefluteter Vollausschlag der Vakuumpumpe 10, 111 von deren Betriebsdrehzahl bis zum Stillstand erfolgt, aus folgenden Komponenten zusammen: i) 1 % aufgrund der Beschleunigung des Fanglagers 215, ii) 1,5 % aufgrund des Restabilisierungsversuchs und iii) 20 % aufgrund des schnellen Vollausschlags mit Fluten der Vakuumpumpe 10, 111. In Summe beträgt das Verschleißinkrement 315-2 folglich für das vorliegende Beispiel 22,5 %.

[0114] Anstelle des Vollausschlags mit Fluten der Vakuumpumpe 10, 111 kann jedoch nach einer vordefinierten Zeitdauer oder bei Unterschreiten einer vordefinierten Drehzahl während des Auslaufens der Vakuumpumpe 10, 111 ein weiterer Versuch der Restabilisierung erfolgen. Die vordefinierte Zeitdauer beträgt beispielsweise

zwei, eine oder eine halbe Minute ab dem Beginn des Fanglagerbetriebs, während die vordefinierte Drehzahl zum Beispiel die halbe Betriebsdrehzahl ist. Der erneute Versuch der Restabilisierung des Rotors 12, 149 kann entweder gelingen, da die Störung zwischenzeitlich abgeklungen ist oder da der Rotor 12, 149 bei der niedrigeren verbleibenden Drehzahl aufgrund geringerer Kreiselkräfte besser restabilisierbar sein kann. Unabhängig vom Erfolg der erneuten Restabilisierung ist diese mit einem weiteren Beitrag zum Verschleißinkrement 315-2 bzw. 315-3 von beispielsweise 0,9 % verbunden. Bei einem Misserfolg beider Restabilisierungsversuche bewirkt die Störung, die bei 310 (vgl. Fig. 8) detektiert wird, insgesamt ein Verschleißinkrement 315-2 von 23,4 % anstelle von 22,5 %, die für das vorstehende Beispiel mit einem einzigen Restabilisierungsversuch und anschließendem Vollaustausch der Vakuumpumpe 10, 111 ermittelt wurden. Bei einem Erfolg des zweiten Restabilisierungsversuchs hingegen entfällt der Beitrag des Teilauslaufs von der halben Betriebsdrehzahl des Rotors 12, 149 bis Stillstand, was zu einer Verringerung des Verschleißinkrements 315-3 um etwa 6 % führt. Hinzu kommt allerdings ein Beitrag für den freien Auslauf des Fanglagers 215, der aufgrund der bereits verringerten Drehzahl des Rotors 12, 149 etwa 0,2 % beträgt. Für den Fall, dass nach einer Störung ein erster Restabilisierungsversuch fehlschlägt und ein zweiter Restabilisierungsversuch erfolgreich ist, beträgt das Verschleißinkrement 315-3 folglich insgesamt etwa 17,6 %.

[0115] Der Betrag der Verschleißinkremente 315-1, 315-2, 315-3 hängt von Betriebsparametern der Vakuumpumpe 10, 111 ab, beispielsweise von der momentanen Drehzahl des Rotors 12, 149 der Vakuumpumpe 10, 111, der Einbaulage der Vakuumpumpe 10, 111 und der Beschaffenheit des Fanglagers 215. Wie vorstehend beschrieben, beträgt der Beitrag eines Restabilisierungsversuchs zum Verschleißinkrement 315-3 bei der Betriebsdrehzahl der Vakuumpumpe 10, 111 etwa 1,5 %, während ein entsprechender Beitrag bei der Hälfte der Betriebsdrehzahl lediglich etwa 0,9 % beträgt. Der Beitrag der initialen Beschleunigung bei Eintritt in den Fanglagerbetrieb beträgt etwa 1,0 % bei der Betriebsdrehzahl der Vakuumpumpe 10, 111 und 0,4 % bei der Hälfte der Betriebsdrehzahl. Für den freien Auslauf des Fanglagers 215 ergibt sich ein Beitrag von etwa 0,5 % bei der Betriebsdrehzahl der Vakuumpumpe 10, 111 und von 0,2 % bei der Hälfte der Betriebsdrehzahl.

[0116] Weiterhin ist durch die Art des Störungsereignisses, das bei Verfahrensschritt 310 von Fig. 8 detektiert wird, die Bewegungsform des Rotors 12, 149 und des Stators zueinander festgelegt, die den Kontakt der Hälften des Fanglagers 215 und damit den Fanglagerbetrieb auslöst. Dadurch beeinflusst die Art des Störungsereignisses den bei der initialen Beschleunigung des Fanglagers auftretenden Beitrag zum Verschleißinkrement 315-1, 315-2, 315-3 sowie die Wahrscheinlichkeit, eine erfolgreiche Restabilisierung durchzuführen. Ist die Bewegungsform langsam wachsend oder zumindest konti-

nuierlich, stetig und gegebenenfalls sogar anhaltend, dann verläuft ein erster Fanglagerkontakt eher langsam. Dadurch erhält das Fanglager 215 mehr Zeit, die initiale Beschleunigung bei noch niedriger Lagerlast zu vollführen. Ist die Bewegungsform hingegen chaotisch, impulsartig, mit hohen Gradienten und gegebenenfalls mit Vorzeichenwechseln versehen, so ist auch die Reaktion der aktiven Magnetlagerung komplex und entspricht dem chaotischen Gesamtbild. Der erste Fanglagerkontakt erfolgt in diesem Fall eher zufällig während eines starken Impulses und führt entsprechend zu schnellem Fanglagerkontakt mit hohen Traglasten. Dies bedingt ein erhöhtes Verschleißinkrement 315-1, 315-2, 315-3 im Vergleich zu einer Störung mit anschließender langsamer, nicht chaotischer Bewegungsform des Rotors 12, 149 und des Stators zueinander.

[0117] Näherungsweise wird angenommen, dass die Verschleißinkremente 315-1, 315-2, 315-3 linear von der Rotationsenergie des Rotors 12, 149 und somit quadratisch von dessen Drehzahl abhängen. Im Detail können Beiträge zum Verschleißinkrement 315-1, 315-2, 315-3 durch verschiedene Vorgänge in Abhängigkeit von der jeweiligen Drehzahl des Rotors 2, 149 und/oder direkt in Abhängigkeit von der jeweils aktuell vorhandenen Rotationsenergie oder von dem über eine Zeitdauer entstehenden Verlust von Rotationsenergie durch den Fanglagerbetrieb ermittelt werden. Es können auch Energiemengen berücksichtigt werden, die dem Rotor 12, 149 auf andere Weise als durch den Fanglagerbetrieb entnommen oder zugeführt werden. Solche Energiemengen sind beispielsweise Antriebs- und/oder Bremsenergien in oder aus dem Antrieb des Rotors 12, 149 oder auch fiktiv berechnete Abschlüsse auf Grund von auftretender Gasreibung des Rotors 12, 149 bei den jeweils vorliegenden, bekannten Vakuumdrücken und/oder durchströmenden Gasmengen.

[0118] Der Beitrag zum Verschleißinkrement 315-1, 315-2, 315-3, der durch die initiale Beschleunigung des Fanglagers zu Beginn einer Störung mit Fanglagerbetrieb entsteht, lässt sich als singuläres Ereignis mit der Drehzahl und/oder der Rotationsenergie des Rotors 12, 149 als Parameter abschätzen. Bei den weiteren, vorstehend beschriebenen Vorgängen, die nach dem Beginn einer Störung auftreten und eine gewisse Zeitdauer andauern, sind diese Zeitdauer und die Rotordrehzahl zu Beginn und am Ende der Zeitdauer sowie gegebenenfalls der Verlauf der Rotordrehzahl über die Zeitdauer Berechnungskomponenten für Beiträge zum Verschleißinkrement 315-1, 315-2, 315-3. Beispielsweise wird eine bekannte Zeitdauer des freien Auslaufs des Fanglagers 215 nach Ende einer Störung verwendet, um dessen jeweils verbleibende Relativ- bzw. Restdrehzahl abzuschätzen. Treten mehrere Störungen mit Fanglagerbetrieb in kurzzeitiger Abfolge auf, kann durch die Berücksichtigung der notwendigen Beschleunigung und damit der Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Fanglager und Gegenseite ein angepasstes, reduziertes Verschleißinkrement 315-1, 315-2, 315-3 ermittelt werden.

Beiträge zum Verschleißinkrement 315-1, 315-2, 315-3, die durch Vorgänge mit ausreichend langer Zeitdauer von mehreren Sekunden oder sogar Minuten entstehen, können mit Hilfe der Drehzahl und/oder der Rotationsenergie des Rotors 12, 149 als Parameter genauer ermittelt werden, wenn eine zeit- und/oder drehzahlabhängige Berechnungsformel für das Verschleißinkrement 315-1, 315-2, 315-3 vorliegt und diese über die Zeitdauer und/oder die Drehzahlspanne des jeweiligen Vorgangs integriert wird.

[0119] Die Vorgänge, die einen Beitrag zum Verschleißinkrement 315-1, 315-2, 315-3 leisten, hängen auf unterschiedliche Weise von der Drehzahl und/oder von der Rotationsenergie des Rotors 12, 149 sowie der Komponenten des Fanglagers 215 und/oder von momentan auftretenden Lagerlasten ab. Die Vorgänge sind beispielsweise von den Start- und Enddrehzahlen oder dem Verlauf der Drehzahl der jeweiligen Komponente und den währenddessen wirkenden Lagerlasten und/oder der vorhandenen Rotationsenergie sowie von dem kontinuierlichen Verlauf dieser Parameter während des jeweiligen Vorgangs abhängig.

[0120] Die jeweils vorhandenen Lagerlasten sind vereinfacht dargestellt wiederum linear von der Rotationsenergie und somit quadratisch von der Drehzahl abhängig. Je nach Konfiguration und/oder Einbauorientierung können generell unterschiedliche Lagerlasten oder Verhältnisse von Teil-Lagerlasten zwischen verschiedenen Lagerstellen vorliegen. Zum Beispiel können durch eine auskragende Lagerung des Rotors 12, 149 mit dessen Schwerpunkt außerhalb aller Lagerstellen in allen Einbauorientierungen der Vakuumpumpe 10, 111, vor allem aber bei einer überwiegend im Raum horizontal, d.h. rechtwinklig zur Schwerkraft angeordneten Rotationsachse des Rotors 12, 149, erhöhte gegenläufig wirkende Lagerkräfte an zumindest zwei in Richtung der Rotationsachse des Rotors 12, 149 voneinander entfernten Lagerstellen hervorgerufen werden.

[0121] Wenn die Geometrieparameter des Rotors 12, 149 und des Stators der Vakuumpumpe 10, 111 bekannt sind, zum Beispiel die Abstände von Lagerstellen, die Schwerpunkte, die Massenträgheitsmomente oder auch die Eigenfrequenzen und/oder die biegekritischen Moden, ist es möglich, Verhältnisse der Verschleißinkremente 315-1, 315-2, 315-3 pro Lagerstelle zu ermitteln. Wenn ferner die Ausrichtung der Vakuumpumpe 10, 111 im Raum bekannt ist, d.h. die Richtung der auf die Komponenten der Vakuumpumpe 10, 111 wirkenden Schwerkraft, können die Verschleißinkremente 315-1, 315-2, 315-3 entsprechend angepasst werden, da zum Beispiel in bestimmten Ausrichtungen gegenüber einer Standardausrichtung erhöhte oder niedrigere Belastungen einzelner Lagerstellen vorliegen können.

[0122] Wenn zu erwarten ist, dass der Verschleiß der Fanglager 215 an verschiedenen Lagerstellen stark unterschiedlich ist, wird der Fanglagerverschleiß alternativ nicht mittels einer einzigen Variablen 325 für den Gesamtverschleiß, sondern einzeln je Lagerstelle, je Lager-

stellen-Wirkrichtung oder sogar je Lagerstellen-Teilsegment ermittelt und dokumentiert. Eine feste Lagerstelle kann zum Beispiel bei einer horizontal im Raum angeordneten Rotationsachse während des Fanglagerbetriebs hohe radiale Belastungen und damit verbundenen Verschleiß erfahren, während die axialen Belastungen und der damit verbundene Verschleiß hingegen minimal sind, da das Rotorgewicht in dieser Raumausrichtung der Vakuumpumpe 10, 111 keine axialen Traglasten erzeugt.

[0123] Durch die aktive Positionserfassung (vgl. Fig. 6 und 7) aller Achsen der aktiven Magnetlagerung ist es ferner möglich, die Reihenfolge der Kontakte in der Lagerstelle bzw. in den Lagerstellen und/oder die erste Kontaktstelle bzw. ersten Kontaktstellen bezogen auf ihre Position am Umfang der Vakuumpumpe 10, 111 zu ermitteln. Je nach Reihenfolge können unterschiedliche Verschleißinkremente je Lagerstelle ermittelt und dokumentiert werden. Ein lokal begrenztes Verschleißinkrement der Lagerring-Laufflächen kann für die erste Kontaktstelle, die am Umfang der feststehenden Seite des Fanglagers 215 immer am selben Ort verbleibt, und damit für die erste Wirkrichtung der vollen Traglast ortsauflöst gespeichert werden.

[0124] Eine solche auf die Lagerstelle und/oder Lagerachsen bezogene Speicherung der Verschleißinkremente 315 und des resultierenden Gesamtverschleißes pro Fanglager 215 kann sowohl dem Anwender direkt kommuniziert werden als auch durch eine formelbasierte Berechnung zu einem Gesamtverschleißbetrag oder mehreren Teilverschleißbeträgen verrechnet werden. Zum Beispiel kann bei einer reinen Maximal- oder Minimalbetrachtung nur der höchste oder niedrigste aller Verschleißwerte pro Fanglager, also der schlechteste oder beste aller Teilwerte, als Gesamtverschleiß definiert und kommuniziert werden. Weiterhin kann der Gesamtverschleiß durch eine Gewichtung der verschiedenen Teilwerte ausgewogener berechnet und kommuniziert werden.

[0125] Eine Fehlermeldung und/oder sichere Stillsetzung der Vakuumpumpe bei Überschreiten von Grenzwerten für den Verschleiß kann entsprechend nicht nur auf Grund der Höhe des Gesamtverschleißes, sondern auch oder ausschließlich anhand einzelner oder eines der Teilwerte erfolgen. Eine interne Speicherung der verschiedenen Teilwerte ermöglicht generell bei einer späteren Revision der Vakuumpumpe 10, 111, dass ein Servicetechniker nur die wirklich verschlissenen Elemente und/oder die am stärksten von Verschleiß betroffenen Elemente austauscht und angrenzende oder üblicherweise betroffene Bauteile einer tiefergehenden Kontrolle unterzieht, um die Qualität und Effizienz der Revision bzw. Wartung zu optimieren.

[0126] Fällt die Versorgungsspannung der Vakuumpumpe 10, 111 aus, kann die vorstehend beschriebene Notversorgung zumindest für einen begrenzten Zeitraum den Weiterbetrieb der aktiven Magnetlagerung sicherstellen. Durch den Ausfall der Versorgungsspannung

wird die Speicherung des jeweiligen Verschleißinkrements 315-1, 315-2, 315-3 im Speicher 320 möglicherweise gestört oder verhindert. Ein bevorstehender Ausfall der Versorgungsspannung kann jedoch rechtzeitig erkannt werden, z.B. durch Beobachtung des beginnenden Abfalls der Versorgungsspannung vor einem mit einer Diode gegen Energierückfluss gesicherten Zwischenspeicher, zum Beispiel einem Kondensator. Ist die Aktivierung einer Notversorgung möglich, zum Beispiel durch generatorische Speisung, so kann diese direkt nach dem Ausfall der Versorgungsspannung erfolgen. Ein Fanglagerbetrieb tritt in diesem Fall nicht ein.

[0127] Während der Notversorgung oder schon zu Beginn des Ausfalls der Versorgungsspannung reichen die verbleibende Restdrehzahl des Rotors 12, 149 oder andere Betriebsparameter, wie zum Beispiel die Restladung einer Notbatterie, möglicherweise nicht mehr für eine Notversorgung und Aufrechterhaltung der aktiven Magnetlagerung aus. Zum Herauszögern eines solchen Zustands kann zu jedem Zeitpunkt während des Ausfalls eine Teilabschaltung von für die aktive Magnetlagerung nicht notwendigen elektrischen Verbrauchern erfolgen, und zwar in Abhängigkeit von den Betriebsparametern wie beispielsweise der verbleibenden Restdrehzahl oder der aktuellen generatorischen Rückspeisespannung. Die für die Teilabschaltung in Frage kommenden elektrischen Verbraucher sind beispielsweise Schnittstellenmodule oder Zubehörbauteile. Die Reihenfolge und damit Wichtigkeit der einzelnen Elemente kann vorab oder dynamisch auf Grundlage von Betriebsparametern festgelegt werden. Zum Beispiel kann ein Schnittstellenmodul später abgeschaltet werden, falls es eine aktive Datenverbindung aufweist.

[0128] Sind alle den Ausfall der aktiven Magnetlagerung aufschiebenden Möglichkeiten ausgeschöpft, kann vor dem Zusammenbruch der Notversorgung eine geordnete Abschaltung der aktiven Magnetlagerung durchgeführt werden, beispielsweise eine kontrollierte, langsame und schonende Absenkung des Rotors 12, 149 in das Fanglager 215 und/oder eine letzte Speicherung des Verschleißinkrements 315-1, 315-2, 315-3. In diesem Fall wird für den restlichen Auslauf des Rotors 12, 149 ein vorbestimmtes oder ein auf Basis bekannter Betriebsparameter dynamisch angepasstes Verschleißinkrement noch vor der eigentlichen Beendigung des Auslaufs gespeichert oder zumindest in einem nicht-flüchtigen Zwischenspeicher abgelegt, so dass die endgültige Speicherung bei erneuter Verfügbarkeit bzw. Wiederkehr der Versorgungsspannung nachträglich erfolgen kann.

[0129] Die Steuerungseinrichtung der Vakuumpumpe 10, 111 oder der aktiven Magnetlagerung kann ferner bei jeder Wiederkehr der Versorgungsspannung prüfen, ob die vorherige Abschaltung der aktiven Magnetlagerung bei Stillstand des Rotors 12, 149 erfolgt ist. Hierfür kann ein Datenkenner in einem nicht-flüchtigen Speicher vorgesehen sein, dem bei einem Auslauf des Rotors 12, 149 im Normalbetrieb der aktiven Magnetlagerung ein erster Wert für das Ereignis der Stillsetzung im Normalbetrieb

zugewiesen wird. Der Datenkenner wird bei jedem Beginn einer Drehung des Rotors auf einen zweiten Wert zurückgesetzt. Wenn der Datenkenner bei Wiederkehr der Versorgungsspannung nicht den ersten Wert aufweist, ist offensichtlich, dass die letzte Stillsetzung nicht im Normalbetrieb erfolgt sein kann.

[0130] Wenn die Betriebsparameter der Vakuumpumpe 10, 111 kontinuierlich oder zumindest regelmäßig in bestimmten Zeitabständen nicht-flüchtig gespeichert werden, ist es möglich, nach einem Ausfall der Versorgungsspannung nachträglich Verschleißinkremente 315-1, 315-2 315-3 zu berechnen und im Speicher 320 zu den Variablen 325 für den Gesamtverschleiß hinzuzufügen. Dieses Vorgehen stellt allerdings hohe Anforderungen an den Speicher 320, der einerseits nicht-flüchtig und andererseits stetig oder zumindest sehr häufig Daten abspeichern muss. Die zu erwartende Lebensdauer des Speichers 320 muss daher ausreichend lang sein, damit diese nicht die gesamte Lebensdauer der Vakuumpumpe 10, 111 stärker begrenzt als der Fanglagerverschleiß oder die Alterung weiterer Komponenten der Vakuumpumpe 10, 111.

[0131] Bei der Ausführung des Verfahrens 300 können für jeden der vorstehend beschriebenen Vorgänge, die zum Fanglagerverschleiß beitragen, jeweils einzelne Teil-Verschleißinkremente möglichst direkt im Speicher 320 abgespeichert werden. Dadurch ist zu jedem Zeitpunkt ein aktueller Zustand des gesamten Fanglagerverschleißes gespeichert, der kommuniziert werden kann. Dies ist auch dann von Vorteil, wenn zu dem eigentlichen Fanglagerbetrieb ein vollständiger Ausfall der Versorgungsspannung hinzukommt, beispielsweise wenn ein Anwender per Not-Aus der Anlage einen unerwünschten Fehlerbehebungsversuch unternimmt und dann gegebenenfalls keine ausreichende Restlaufzeit des Rotors 12, 149 bzw. Energie zum Abspeichern des aktuellen Verschleißinkrements bleibt.

[0132] Im Folgenden wird die iterative Ausführung der Verfahrensschritte 340, 350, 370 und 390 von Fig. 8 anhand eines Beispiels im Detail erläutert. Die iterative Ausführung dieser Verfahrensschritte entspricht einer wiederholten Ausführung von Restabilisierungsversuchen, zwischen denen die Wartezeit, die bei Schritt 390 auftritt, mit jeder Iteration zunimmt.

[0133] Die Steuerungseinrichtung der Vakuumpumpe 10, 111 umfasst zusätzlich zwei Zähler, die bei der Steuerung der iterativen Ausführung der Restabilisierungsversuche verwendet werden. Der erste Zähler definiert die Wartezeit 390 zwischen zwei Restabilisierungsversuchen, während der zweite Zähler einen Zahlenwert enthält, der die Anzahl der Restabilisierungsversuche nach der Detektion eines Störungsereignisses (Schritt 310 von Fig. 8) widerspiegelt. Im Normalbetrieb der Vakuumpumpe 10, 111, d.h. solange kein Störungsereignis auftritt, sind der erste und der zweite Zähler zunächst mit 0 initialisiert.

[0134] Dem ersten Zähler ist ein erster pumpenspezifischer Wert zugeordnet. Zu Beginn jedes Restabilisie-

rungsversuchs wird der erste pumpenspezifische Wert mit dem momentanen Wert des zweiten Zählers multipliziert und dem ersten Zähler zugewiesen. Da der zweite Zähler die Anzahl der Restabilisierungsversuche widerspiegelt, wird dadurch die Zeitdauer bzw. Verzögerung zwischen den Restabilisierungsversuchen sukzessive verlängert, wie nachstehend näher erläutert wird.

[0135] Der erste pumpenspezifische Wert liegt beispielsweise im Bereich von 10 bis 99 und soll im vorliegenden Zahlenbeispiel 10 betragen. Somit wird die Wartezeit zwischen Restabilisierungsversuchen im vorliegenden Beispiel ab dem zweiten Restabilisierungsversuch sukzessive um ein Vielfaches von 10 s verlängert.

[0136] Nach einer Inkrementierung wird der erste Zähler pro Sekunde um 1 verringert, und ein Restabilisierungsversuch erfolgt prinzipiell nur dann, wenn der erste Zähler gleich 0 ist. Dadurch steuert der erste Zähler die Verzögerung bzw. die Wartezeit 390 zwischen Restabilisierungsversuchen.

[0137] Sobald bei 310 (vgl. Fig. 8) ein Störungsereignis detektiert wird, versucht die Steuerungseinrichtung, nach einer jeweiligen kurzen Zeitdauer, beispielsweise jede Sekunde, einen Restabilisierungsversuch auszuführen. Da der jeweilige Restabilisierungsversuch jedoch nur dann ausgeführt wird, wenn der erste Zähler gleich 0 ist, kann der jeweilige Restabilisierungsversuch mittels des ersten Zählers verzögert werden.

[0138] Da der zweite Zähler mit 0 initialisiert ist und dem ersten Zähler das Produkt aus dem ersten pumpenspezifischen Wert und dem Wert des zweiten Zählers zugewiesen wird, ist der erste Zähler nach dem ersten Restabilisierungsversuch weiterhin gleich 0. Somit kann nach dem ersten Restabilisierungsversuch unmittelbar ein zweiter Restabilisierungsversuch erfolgen.

[0139] Anschließend wird der zweite Zähler mit einem zweiten pumpenspezifischen Wert inkrementiert, der beispielsweise im Bereich von 1 bis 9 liegt und im vorliegenden Zahlenbeispiel 1 betragen soll. Der zweite Zähler zählt im vorliegenden Beispiel somit die Restabilisierungsversuche nach einem Störungsereignis und ist folglich nach dem ersten Restabilisierungsversuch gleich 1.

[0140] Ist der erste Restabilisierungsversuch erfolgreich, geht die Vakuumpumpe 10, 111 in den Normalbetrieb über, wobei der erste und der zweite Zähler wieder auf 0 gesetzt werden. Wenn der erste Restabilisierungsversuch jedoch fehlschlägt, wird nach einer Sekunde ein zweiter Restabilisierungsversuch unternommen, da der erste Zähler immer noch gleich 0 ist. Zu Beginn des zweiten Restabilisierungsversuchs wird im vorliegenden Beispiel zunächst dem ersten Zähler der Wert 10 zugewiesen, d.h. der momentane Wert 1 des zweiten Zählers multipliziert mit dem ersten pumpenspezifischen Wert von 10, und anschließend wird der zweite Zähler auf 2 erhöht.

[0141] Ist der zweite Restabilisierungsversuch erfolgreich, geht die Vakuumpumpe wieder in den Normalbetrieb über, während der erste und der zweite Zähler wie-

derum auf 0 gesetzt werden. Wenn der zweite Restabilisierungsversuch jedoch fehlschlägt, beträgt die Wartezeit bis zum dritten Restabilisierungsversuch 10 Sekunden, da der Wert 10 des ersten Zählers pro Sekunde um 1 verringert wird und der nächste Restabilisierungsversuch erst dann erfolgt, wenn der erste Zähler wieder gleich 0 ist.

[0142] Wenn das Störungsereignis nach 10 Sekunden immer noch andauert, erfolgt ein dritter Restabilisierungsversuch, wobei dem ersten Zähler der Wert 20 zugewiesen wird und der zweite Zähler den Wert 3 erhält, wenn der dritte Restabilisierungsversuch fehlschlägt. Ansonsten sind beide Zähler wieder gleich 0.

[0143] Nach dem dritten fehlgeschlagenen Restabilisierungsversuch dauert es nunmehr 20 Sekunden, bis der erste Zähler gleich 0 ist und ein weiterer Restabilisierungsversuch erfolgen kann. Somit verlängert sich die Wartezeit 390 zwischen zwei weiteren Restabilisierungsversuchen mit jedem fehlgeschlagenen Restabilisierungsversuch um eine Anzahl Sekunden, die dem ersten pumpenspezifischen Wert entspricht. Mit anderen Worten wird ein erneuter Restabilisierungsversuch mit jedem fehlgeschlagenen Restabilisierungsversuch "unattraktiv".

[0144] Bei der iterativen Ausführung mehrerer Restabilisierungsversuche, die vorstehend beschrieben ist, wird ein bestimmter Satz 330 von Betriebsvorgaben (vgl. Fig. 8) für die Vakuumpumpe 10, 111 verwendet, der beispielsweise die Betriebsvorgaben "Betrieb der Vakuumpumpe aufrechterhalten" und "Restabilisierungsversuche sukzessive verzögern" umfasst. Entsprechend werden die Restabilisierungsversuche zwar iterativ ausgeführt, um einen Vollausschlag des Rotors 12, 149 zu verhindern, die Wartezeit bis zum nächsten Restabilisierungsversuch wird jedoch mit jedem fehlgeschlagenen Restabilisierungsversuch verlängert.

[0145] Als Alternative oder zusätzlich zu einer oder mehreren statischen Betriebsvorgaben, beispielsweise "Fanglagerbetrieb so lange wie möglich vermeiden, Zeitspanne des Fanglagerbetriebes so kurz wie möglich halten", kann der Satz 330 von Betriebsvorgaben eine Vielzahl dynamisch anpassbarer und auf Betriebszustände reagierender Betriebsvorgaben bzw. Regelsätze umfassen. Diese Betriebsvorgaben können vorab fest vorgegeben sein und je nach Betriebszustand der Vakuumpumpe 10, 111 oder Priorisierung durch Anwendervorgaben wechseln. Ferner können die Betriebsvorgaben auch durch adaptive oder selbstlernende Algorithmen ausgeführt und angepasst werden.

[0146] Zu Beginn des Fanglagerbetriebs herrscht für die Steuerungseinrichtung der Vakuumpumpe 10, 111 oder die Steuerung der aktiven Magnetlagerung Unklarheit über das Anhalten und den Verlauf des Störungsereignisses. Es ist jedoch bekannt, welches Verschleißinkrement 315-2 im schlimmsten Fall eines Vollausschlages des Rotors 12, 149 entstehen wird. Weiterhin können die durch Restabilisierungsversuche jeweils zusätzlich entstehenden Verschleißinkremente 315-3 ab-

geschätzt werden, wie vorstehend erläutert ist. Auch die Art und die Heftigkeit der Störung, die den Fanglagerbetrieb ausgelöst hat, können anhand von Sensordaten bekannt sein.

[0147] Beispielsweise als Vorgabe eines Anwenders kann der Satz 330 von Betriebsvorgaben ferner umfassen, ob ein Fluten und damit ein schnelles externes Abbremsen der Vakuumpumpe 10, 111 möglich ist, oder auch, ob eine Energierückspeisung in die Anlagen-Spannungsversorgung möglich ist, damit das generatorische Bremsen des Rotors 12, 149 ohne oder über einen integrierten Lastwiderstand erfolgen kann. Ein Teil des Satzes 330 von Betriebsvorgaben kann ferner durch die Beschaffenheit der Vakuumanlage, in der sich die Vakuumpumpe 10, 111 befindet, oder direkt durch den Anwender vorgegeben sein. Beispielsweise können die gegensätzlichen Vorgaben "Betrieb der Vakuumpumpe unbedingt aufrechterhalten" oder "Fanglagerverschleiß minimieren" umfasst sein, die von einem Anwender und/oder entsprechend dem momentanen Betriebszustand der Vakuumanlage oder der Vakuumpumpe 10, 111 priorisiert werden.

[0148] Für die Betriebsvorgabe "Betrieb der Vakuumpumpe unbedingt aufrechterhalten" kann es sinnvoll sein, den Antrieb des Rotors 12, 149 nicht wie sonst im Fanglagerbetrieb üblich zu stoppen, sondern den Rotor so lange wie nötig möglichst auf Betriebsdrehzahl zu halten, um beispielsweise den Abbruch einer Prozesscharge und dadurch entstehende Folgekosten zu vermeiden. Ferner kann eine Anlagensteuerung Zeit benötigen, um gegebenenfalls eine Reserve-Vakuumpumpe auf Betriebsdrehzahl zu bringen und/oder deren Ventilschieber zur Vakuumanlage zu öffnen und gleichzeitig die betroffene Vakuumpumpe abzuschlebern, um dadurch einen stabil bleibenden Vakuumdruck in der Vakuumanlage zu gewährleisten. Bei einem anhaltenden Störungsereignis wird die Betriebsvorgabe "Betrieb der Vakuumpumpe unbedingt aufrechterhalten" nach einer bestimmten Zeitdauer weniger relevant, und eine andere Betriebsvorgabe hat eine höhere Priorität, zum Beispiel "Anlage und Vakuumpumpe so schnell wie möglich stillsetzen".

[0149] Die Betriebsvorgabe "Vakuumpumpe so schnell wie möglich stillsetzen" bedingt, dass keine Restabilisierung erfolgt. Stattdessen stellen der Fanglagerbetrieb und die dadurch dem Rotor 12, 149 entziehbare Rotationsenergie auf Kosten des Fanglagerverschleißes eine Möglichkeit dar, die Bremswirkung am Rotor 12, 149 zu maximieren und eine Stillsetzung der Vakuumpumpe 10, 111 in kürzest möglicher Zeit durchzuführen.

[0150] Neben den vorstehend genannten Betriebsvorgaben, die Extrembeispiele darstellen, sind eine Vielzahl von weiteren Betriebsvorgaben möglich, zum Beispiel "Unbedingt so schnell wie möglich restabilisieren" oder "Mindestens halbe Rotordrehzahl bei minimalem Fanglagerverschleiß aufrecht erhalten". Gibt es jedoch keine besonderen Randbedingungen, wird üblicherweise ein "optimierter Standard" für den Satz 330 von Betriebsvorgaben definiert, dessen Primärziel ein geringer Fangla-

gerverschleiß ist. Im Folgenden sind Details eines solchen Satzes 330 der Betriebsvorgaben beschrieben.

[0151] Tritt ein Störungsereignis auf, wird zuerst geprüft, ob das Störungsereignis anhält oder wieder abgeklungen ist. Falls das Störungsereignis nicht mehr erkennbar ist, wird ein Restabilisierungsversuch unternommen. Dabei gilt die Regel, dass das Verschleißinkrement 315-3 des Restabilisierungsversuchs geringer als das das Verschleißinkrement 315-2 eines potentiellen Vollauslaufs sein muss. Bei bereits sehr niedrigen Drehzahlen des Rotors 12, 149, zum Beispiel während die Vakuumanlage abgeschaltet und aus Versehen noch vor dem Stillstand der Vakuumpumpe 10, 111 bereits bewegt wird, kann der Vollausschlag des Rotors 12, 149 günstiger bezüglich des Fanglagerverschleißes sein. Ein Restabilisierungsversuch kann hingegen bei sehr niedrigen Drehzahlen wieder zu einem weiteren Störungsereignis mit Fanglagerbetrieb führen, der weitere Verschleißinkremente 315-1, 315-2, 315-3 erzeugt.

[0152] War eine Restabilisierung nicht erfolgreich, besteht eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass der nächste Versuch umso eher auch misslingt, je weniger Zeit seit dem vorherigen Versuch vergangen ist, weil beispielsweise das Störungsereignis noch nicht abgeklungen ist oder der Rotor 12, 149 zu viel Rotationsenergie in einer ungünstigen Einbaulage der Vakuumpumpe 10, 111 aufweist und daher eine Stabilisierung mit den vorhandenen Mitteln der aktiven Magnetlagerung nicht durchführbar ist. In beiden Fällen ist es günstiger, das Ende des Störungsereignisses oder die Reduzierung der Drehzahl bzw. Rotationsenergie abzuwarten.

[0153] Ein Störungsende wird beispielsweise unter Verwendung der vorstehend beschriebenen Sensoren aktiv detektiert. Ferner kann die Reduktion der Drehzahl und damit der Rotationsenergie abgewartet werden, beispielsweise um einen vorgegebenen bzw. anteilig von der Betriebsdrehzahl ermittelten Wert. Außerdem kann die Wartezeit 390 zwischen Restabilisierungsversuchen vorgegeben sein oder abhängig von der Betriebsdrehzahl ermittelt werden. Eines oder eine Kombination der vorstehenden Ereignisse löst erneut einen Restabilisierungsversuch aus, der wiederum nur dann erfolgen kann, falls dessen zu erwartendes Verschleißinkrement 315-3 in diesem Moment geringer als das Verschleißinkrement 315-2 für den restlichen Auslauf des Rotors 12, 149 ist. Alternativ wird ein Restabilisierungsversuch sofort ausgelöst, wenn durch die Betriebssituation der Vakuumanlage oder durch den Anwender eine entsprechende Anforderung erfolgt.

Bezugszeichenliste

[0154]

10	Vakuumpumpe
12	Rotor
14	Turborotorscheibe
16	Motor

18 Rotorachse
 20 erstes Radiallager
 22 Axiallager
 24 zweites Radiallager
 26 erste Radialsensoranordnung
 28 zweite Radialsensoranordnung
 30 Bauteil
 32 Motorraum
 34 Radialsensoranordnung
 36 Platine
 38 Spule
 111 Turbomolekularpumpe
 113 Einlassflansch
 115 Pumpeneinlass
 117 Pumpenauslass
 119 Gehäuse
 121 Unterteil
 123 Elektronikgehäuse
 125 Elektromotor
 127 Zubehöranschluss
 129 Datenschnittstelle
 131 Stromversorgungsanschluss
 133 Fluteinlass
 135 Sperrgasanschluss
 137 Motorraum
 139 Kühlmittelanschluss
 141 Unterseite
 143 Schraube
 145 Lagerdeckel
 147 Befestigungsbohrung
 148 Kühlmittelleitung
 149 Rotor
 151 Rotationsachse
 153 Rotorwelle
 155 Rotorscheibe
 157 Statorscheibe
 159 Abstandsring
 161 Rotornabe
 163 Holweck-Rotorhülse
 165 Holweck-Rotorhülse
 167 Holweck-Statorhülse
 169 Holweck-Statorhülse
 171 Holweck-Spalt
 173 Holweck-Spalt
 175 Holweck-Spalt
 179 Verbindungskanal
 181 Wälzlager
 183 Permanentmagnetlager
 185 Spritzmutter
 187 Scheibe
 189 Einsatz
 191 rotorseitige Lagerhälfte
 193 statorseitige Lagerhälfte
 195 Ringmagnet
 197 Ringmagnet
 199 Lagerspalt
 201 Trägerabschnitt
 203 Trägerabschnitt

205 radiale Strebe
 207 Deckelelement
 209 Stützring
 211 Befestigungsring
 5 213 Tellerfeder
 215 Not- bzw. Fanglager
 217 Motorstator
 219 Zwischenraum
 221 Wandung
 10 223 Labyrinthdichtung
 300 Verfahren zum Betreiben der Vakuumpumpe
 310 Detektiere Störungsereignis
 315-1 geschätztes Verschleißinkrement
 315-2 aktualisiertes Verschleißinkrement
 15 315-3 aktualisiertes Verschleißinkrement
 320 Speicher
 325 Variable für den Gesamtverschleiß des Fanglagers
 330 Satz von Betriebsvorgaben für die Vakuumpumpe
 20 340 Vermittlung zwischen der Variablen für den Gesamtverschleiß und dem Satz der Betriebsvorgaben
 350 Stabilisierung des Rotors?
 25 360 Vakuumpumpe herunterfahren
 370 Stabilisierung erfolgreich?
 380 Normalbetrieb der Vakuumpumpe
 390 Wartezeit
 395 Pfeil

Patentansprüche

1. Verfahren zum Betreiben einer Vakuumpumpe (10, 111), die einen Rotor (12, 149), einen Stator, ein aktiv geregeltes Magnetlager (20, 22) zum Lagern des Rotors (12, 149) und ein Fanglager (215) für den Rotor (12, 149) aufweist, wobei das Verfahren umfasst, dass:
 - ein Satz (330) von Betriebsvorgaben für die Vakuumpumpe (10, 111) bereitgestellt wird, der zumindest einen bei einem Störungsereignis zu erreichenden Betriebszustand der Vakuumpumpe (10, 111) aufweist,
 - ein Störungsereignis detektiert wird, bei welchem der Rotor (12, 149) bezogen auf den Stator einen für den Rotor (12, 149) vorgesehenen Raumbereich derart verlässt, dass ein Verschleiß an dem Fanglager (215) auftritt,
 - anhand des detektierten Störungsereignisses ein Verschleißinkrement (315-1) für das Fanglager (215) geschätzt wird,
 - das Verschleißinkrement (315-1) zu einer Variablen (325) für den Gesamtverschleiß des Fanglagers (215) hinzugefügt wird, und
 - anhand des Satzes (330) von Betriebsvorgaben für die Vakuumpumpe (10, 111) und anhand der

- Variablen (325) für den Gesamtverschleiß des Fanglagers (215) ermittelt wird, ob eine Maßnahme zur Stabilisierung des Rotors (12, 149) ausgeführt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei dann, wenn ermittelt wird, dass die Maßnahme zur Stabilisierung des Rotors (12, 149) nicht ausgeführt wird, die Vakuumpumpe (10, 111) heruntergefahren wird. 5
 3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei überprüft wird, ob die Maßnahme zur Stabilisierung des Rotors (12, 149) erfolgreich ist, und dann, wenn die Maßnahme fehlschlägt, nach einer vorbestimmten Wartezeit (390) ermittelt wird, ob die Maßnahme zur Stabilisierung des Rotors (12, 149) erneut ausgeführt wird, wobei ein weiteres Verschleißinkrement (315-2, 315-3) ermittelt wird, das zu der Variablen (325) für den Gesamtverschleiß des Fanglagers (215) hinzugefügt wird. 10
 4. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei die Vakuumpumpe (10, 111) heruntergefahren wird und/oder eine Fehlermeldung ausgegeben wird, wenn die Variable (325) für den Gesamtverschleiß des Fanglagers (215) einen vorbestimmten Schwellenwert überschreitet. 15
 5. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei die Größe des Verschleißinkrements (315-1, 315-2, 315-3) anhand experimenteller Daten und/oder anhand von Erfahrungswerten geschätzt wird. 20
 6. Verfahren nach Anspruch 5, wobei die Größe des Verschleißinkrements (315-1, 315-2, 315-3) basierend auf Messwerten zumindest eines Sensors (26, 28) geschätzt wird, die während des Störungsereignisses ermittelt werden. 25
 7. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei die Größe des Verschleißinkrements (315-1, 315-2, 315-3) in Abhängigkeit von einer Drehzahl des Rotors (12, 149) bei Eintreten des Störungsereignisses und/oder in Abhängigkeit von einer Einbaulage der Vakuumpumpe (10, 111) geschätzt wird. 30
 8. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei das Verschleißinkrement (315-1, 315-2, 315-3) zumindest zwei Anteile umfasst, von denen ein erster Anteil auf einer anfänglichen Beschleunigung des Fanglagers (215) bei Eintreten des Störungsereignisses und ein zweiter Anteil auf einem zu erwartenden Verschleiß des Fanglagers (215) während des Stabilisierens des Rotors (12, 149) oder während eines Auslaufens des Rotors (12, 149) 35
 9. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei der Satz (330) von Betriebsvorgaben für die Vakuumpumpe (10, 111) zumindest zwei bei einem Störungsereignis zu erreichende Betriebszustände der Vakuumpumpe (10, 111) aufweist, die das Aufrechterhalten des Vakuums innerhalb der Vakuumpumpe (10, 111) und das Herunterfahren der Vakuumpumpe (10, 111) umfassen. 40
 10. Verfahren nach Anspruch 9, wobei die bei einem Störungsereignis zu erreichenden Betriebszustände durch einen Anwender der Vakuumpumpe (10, 111) und/oder durch einen Lernalgorithmus priorisiert werden. 45
 11. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei das anhand des detektierten Störungsereignisses geschätzte Verschleißinkrement (315-1) für das Fanglager (215) während der Maßnahme zur Stabilisierung des Rotors (12, 149) oder während des Herunterfahrens der Vakuumpumpe (10, 111) aktualisiert wird und das aktualisierte Verschleißinkrement (315-2, 315-3) anstelle des zuvor geschätzten Verschleißinkrements (315-1) zu der Variablen (325) für den Gesamtverschleiß des Fanglagers (325) hinzugefügt wird. 50
 12. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei das Fanglager (215) mehrere Lagerstellen aufweist und das Verfahren ferner umfasst, dass ein jeweiliges Verschleißinkrement (315-1, 315-2, 315-3) für jede Lagerstelle ermittelt und zu einer jeweiligen Variablen (325) für den Gesamtverschleiß an der jeweiligen Lagerstelle hinzugefügt wird. 55
 13. Vakuumpumpe (10, 111) mit
 - einem Rotor (12, 149),
 - einem Stator,
 - einem aktiv geregelten Magnetlager (20, 22) zum Lagern des Rotors (12, 149),
 - einem Fanglager (215) für den Rotor (12, 149),
 - zumindest einem Mittel zum Detektieren eines Störungsereignisses, bei welchem der Rotor (12, 149) bezogen auf den Stator einen für den Rotor (12, 149) vorgesehenen Raumbereich derart verlässt, dass ein Verschleiß an dem Fanglager (215) auftritt,
 - einer Steuerungseinrichtung, und
 - einem Speicher (320), der eine Variable (325) für den Gesamtverschleiß des Fanglagers (215) umfasst,
 - wobei die Steuerungseinrichtung ausgebildet ist, um ein Verfahren gemäß einem der vorstehenden Ansprüche auszuführen.

14. Vakuumpumpe (10, 111) nach Anspruch 13, wobei der Speicher (320) ausgebildet ist, um nur das Hinzufügen von Verschleißinkrementen für das Fanglager (215) zu der Variablen (325) für den Gesamtverschleiß des Fanglagers (215) zu ermöglichen und die Variable (325) für den Gesamtverschleiß des Fanglagers (215) ansonsten während der gesamten Lebensdauer des Fanglagers (215) unverändert beizubehalten. 5
- 10
15. Vakuumpumpe (10, 111) nach Anspruch 13 oder 14, wobei das zumindest eine Mittel zum Detektieren des Störungsereignisses einen Sensor (26, 28), der zum Erfassen der räumlichen Lage des Rotors (12, 149) ausgebildet ist, und/oder einen Schwingungs- und/oder Beschleunigungssensor, der an dem Stator angebracht ist, umfasst. 15
- 20
- 25
- 30
- 35
- 40
- 45
- 50
- 55

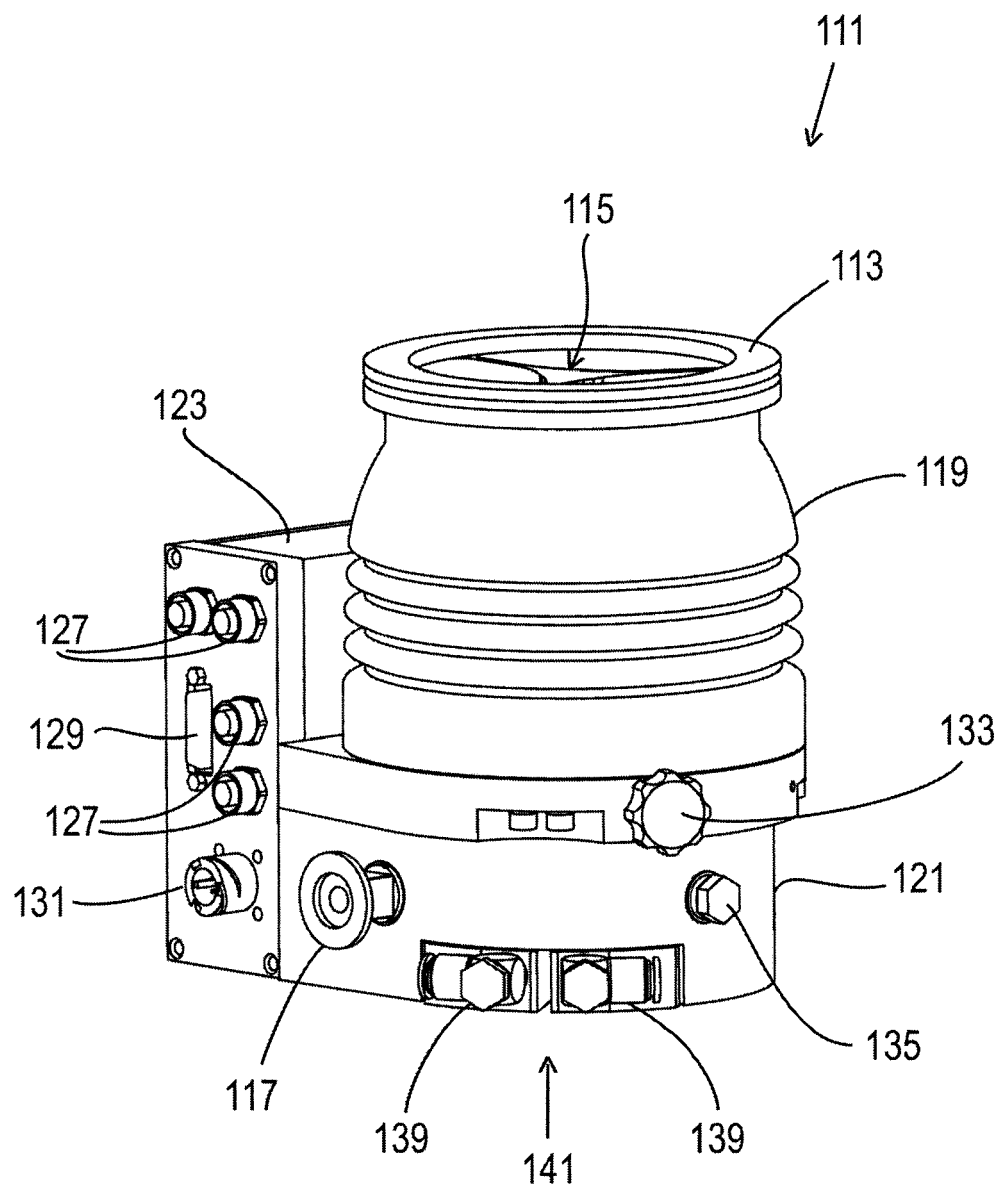


Fig. 1

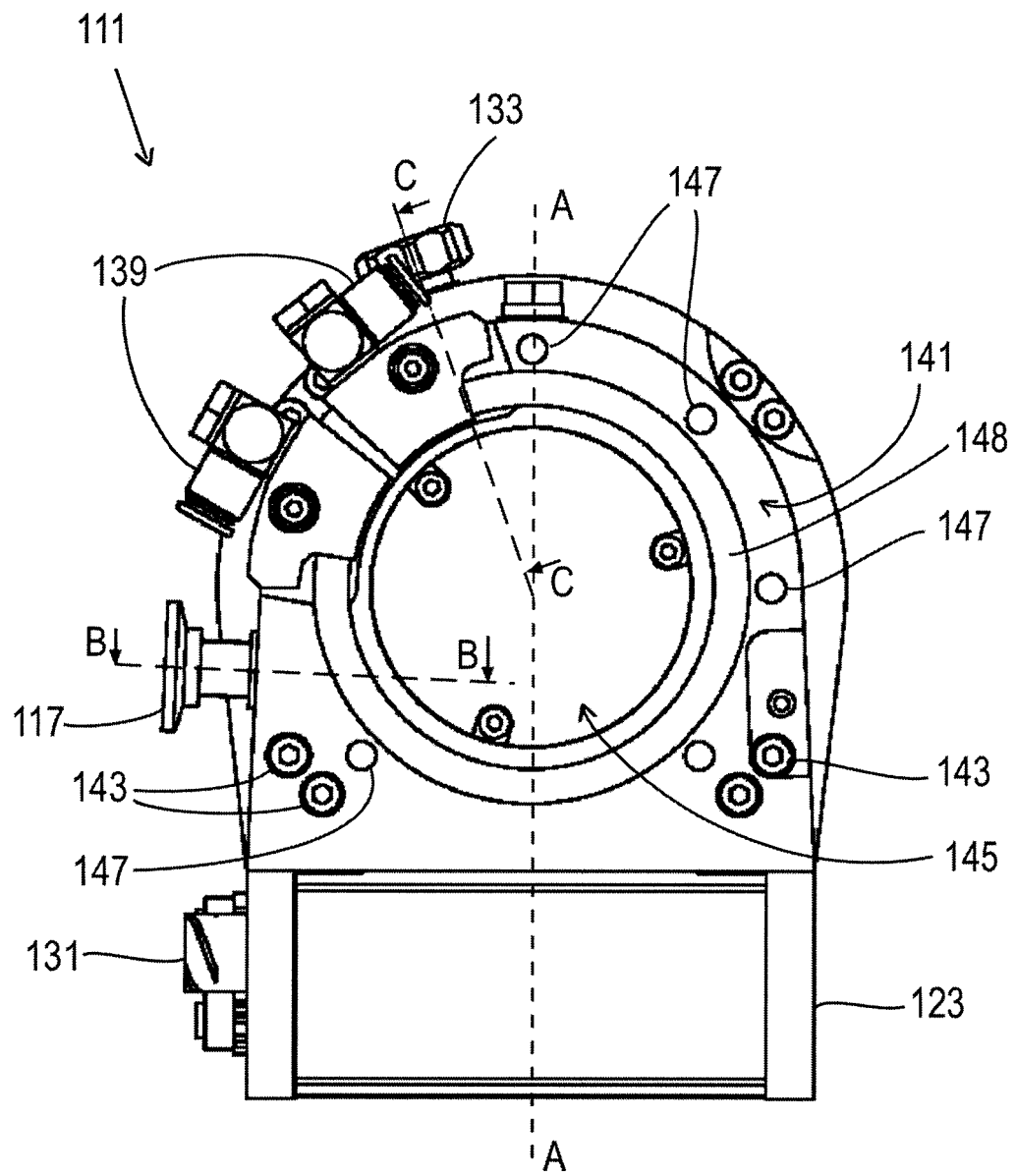


Fig. 2

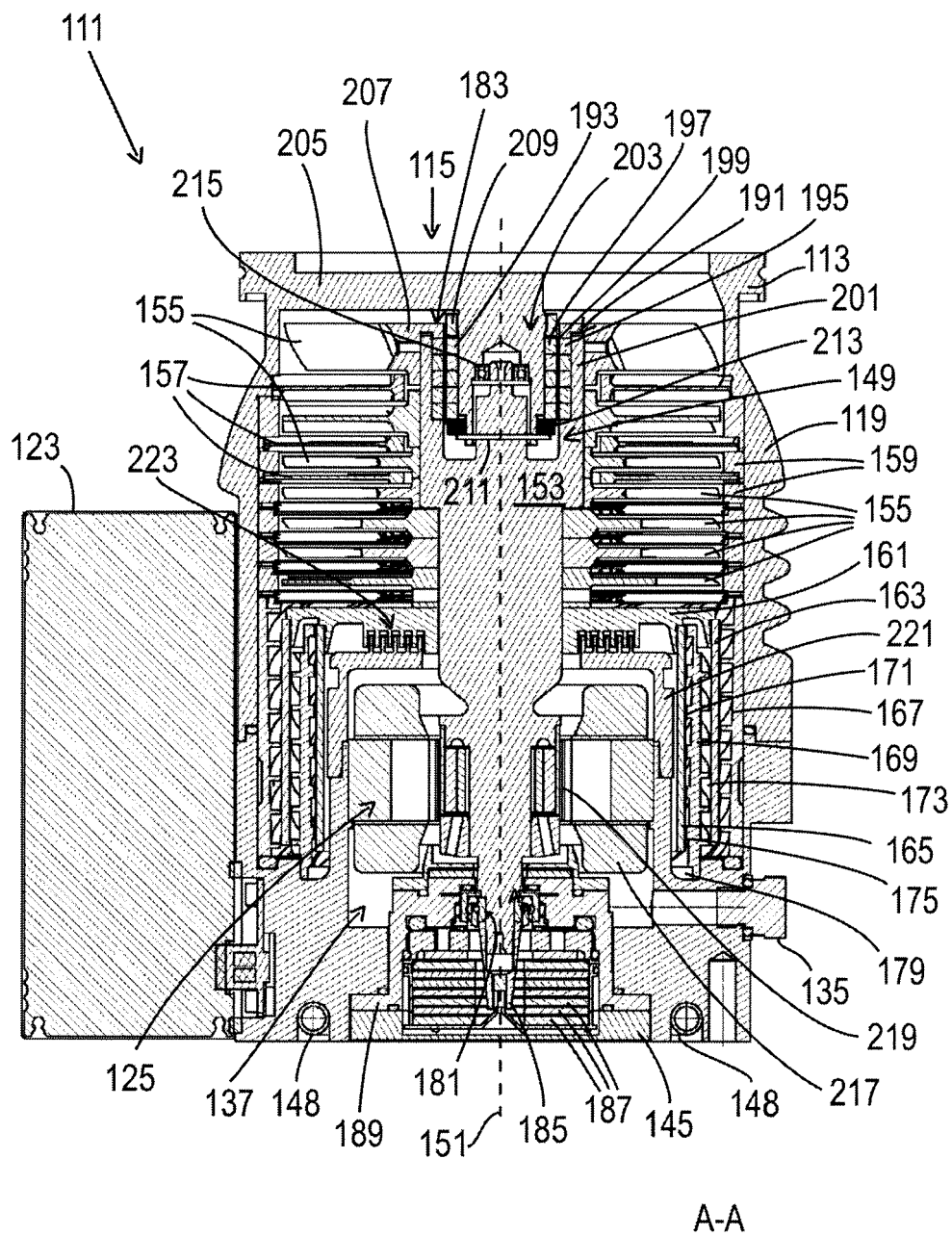


Fig. 3

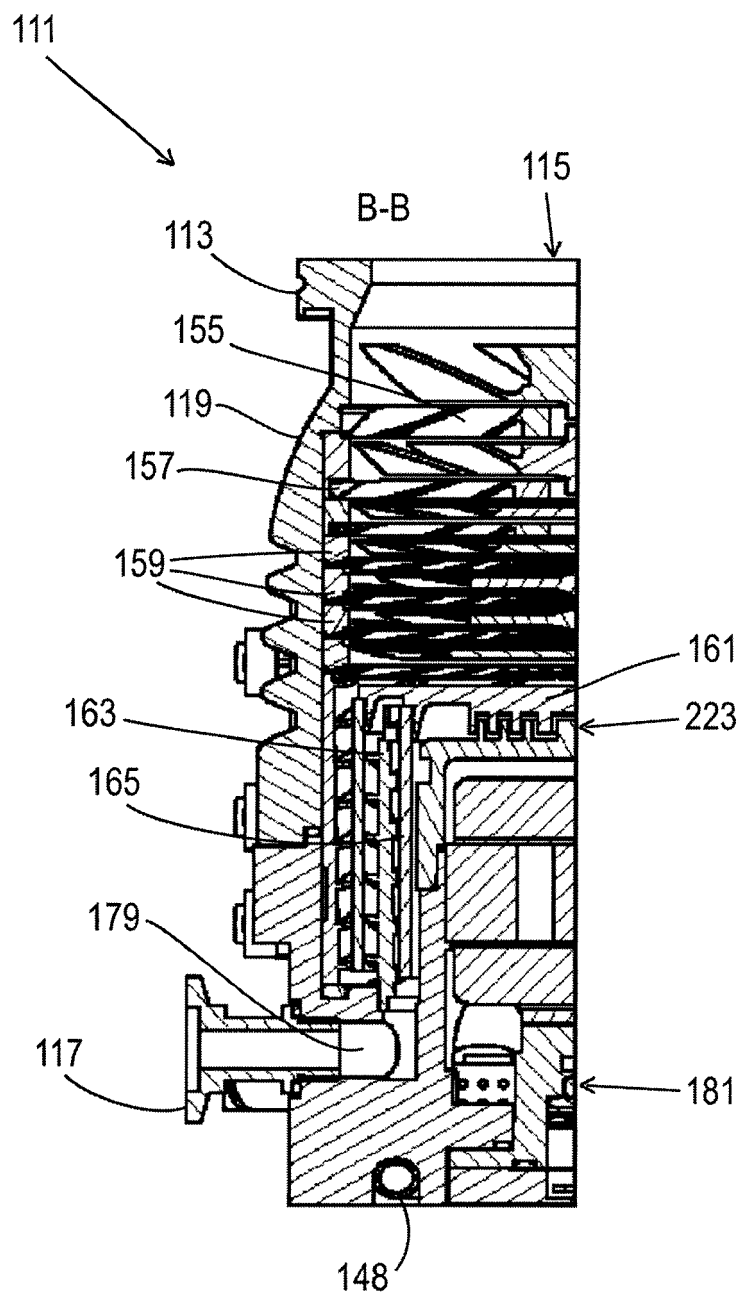


Fig. 4

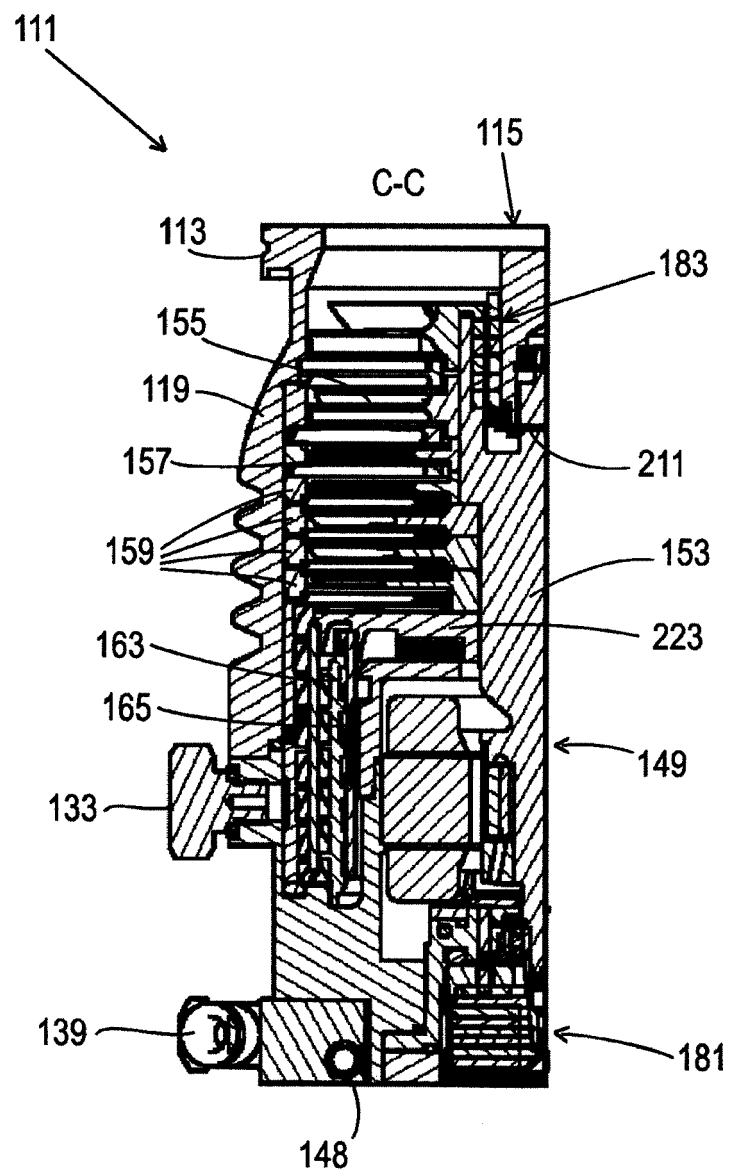


Fig. 5

Fig.6

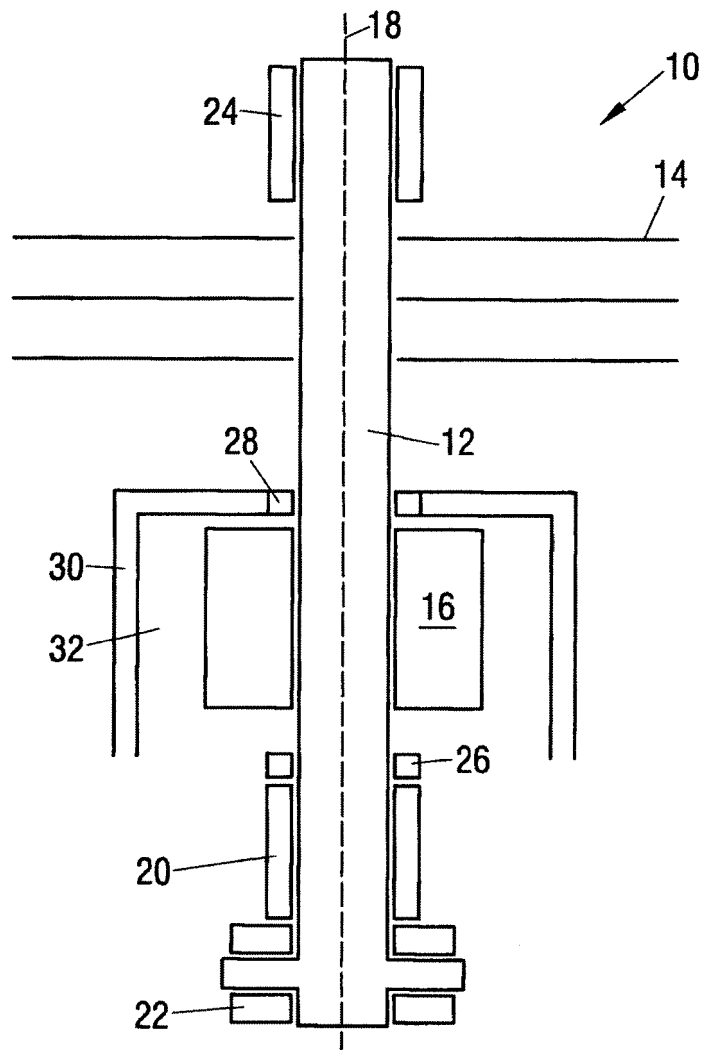
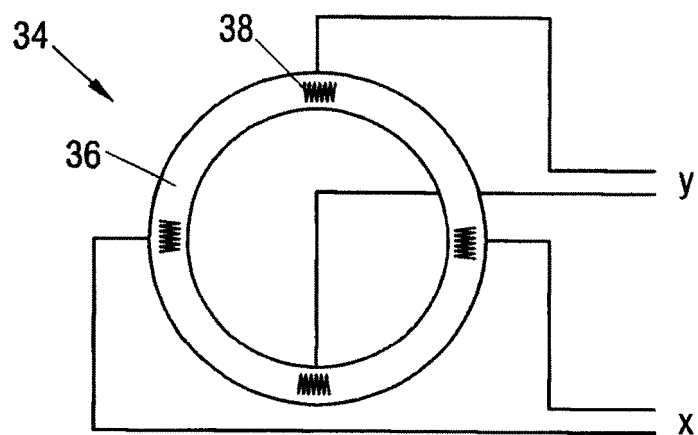


Fig.7



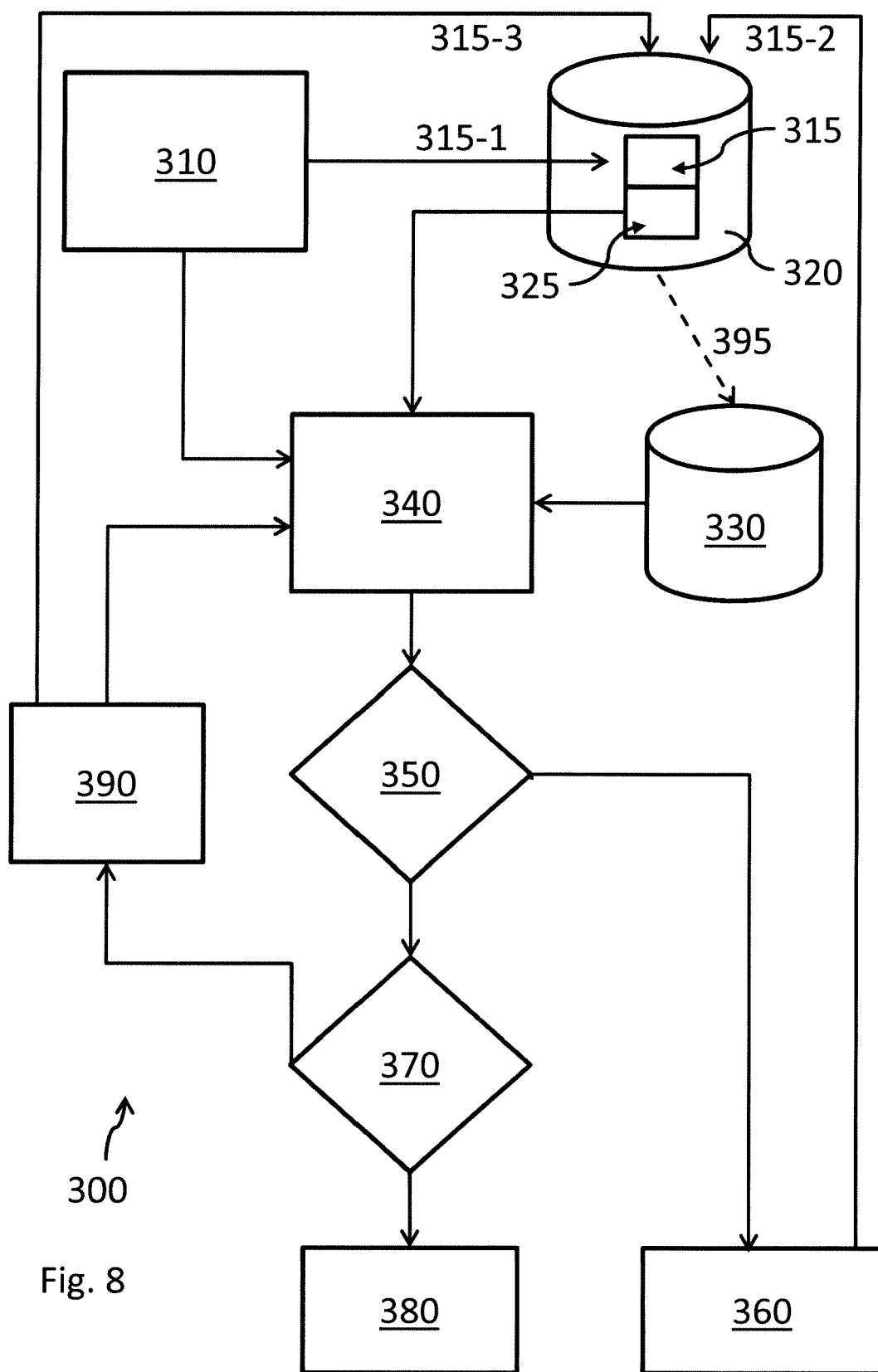


Fig. 8



EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

 Nummer der Anmeldung
EP 20 20 5911

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
A	US 2012/063918 A1 (DE LARMINAT PAUL [FR] ET AL) 15. März 2012 (2012-03-15) * Absatz [0029] - Absatz [0038]; Abbildungen 2,3 * * Zusammenfassung *	1-15	INV. F04D27/02 F04D27/00 F04D19/04 F04D29/058
A	EP 0 467 148 A1 (PFEIFFER VAKUUMTECHNIK [DE]) 22. Januar 1992 (1992-01-22) * Spalte 3, Zeile 3 - Spalte 5, Zeile 26; Abbildung 1 * * Zusammenfassung *	1-15	
A	EP 3 653 885 A1 (PFEIFFER VACUUM GMBH [DE]) 20. Mai 2020 (2020-05-20) * Absatz [0037] - Absatz [0063]; Abbildungen 1-5 * * Zusammenfassung *	1-15	
A	EP 3 473 858 A1 (PFEIFFER VACUUM GMBH [DE]) 24. April 2019 (2019-04-24) * Absatz [0031] - Absatz [0062]; Abbildungen 1-5 * * Zusammenfassung *	1-15	RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC) F04D
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort Den Haag		Abschlußdatum der Recherche 20. April 2021	Prüfer Hermens, Sjoerd
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : mündliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT
 ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 20 20 5911

5 In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentdokumente angegeben.
 Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am
 Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

20-04-2021

10	Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
15	US 2012063918 A1	15-03-2012	CA 2763218 A1 CN 102472685 A EP 2457076 A1 JP 2013500471 A KR 20120049895 A US 2012063918 A1 WO 2011011573 A1	27-01-2011 23-05-2012 30-05-2012 07-01-2013 17-05-2012 15-03-2012 27-01-2011
20	EP 0467148 A1	22-01-1992	DE 4022523 A1 EP 0467148 A1 JP 2786955 B2 JP H04232397 A US 5209631 A	23-01-1992 22-01-1992 13-08-1998 20-08-1992 11-05-1993
25	EP 3653885 A1	20-05-2020	KEINE	
30	EP 3473858 A1	24-04-2019	EP 3473858 A1 JP 6726720 B2 JP 2019074084 A	24-04-2019 22-07-2020 16-05-2019
35				
40				
45				
50				
55				

EPO FORM P0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82