

(19)



(11)

**EP 3 653 884 A1**

(12)

## EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:  
**20.05.2020 Patentblatt 2020/21**

(51) Int Cl.:  
**F04D 19/04** <sup>(2006.01)</sup> **F04D 29/059** <sup>(2006.01)</sup>  
**F04D 29/66** <sup>(2006.01)</sup>

(21) Anmeldenummer: **19202987.4**

(22) Anmeldetag: **14.10.2019**

(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**

- **Wissner, Jürgen**  
**35466 Rabenau (DE)**
- **Bader, Florian**  
**35625 Hüttenberg (DE)**

(71) Anmelder: **PFEIFFER VACUUM GMBH**  
**35614 Asslar (DE)**

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

(72) Erfinder:  
• **Sieben, Daniel**  
**35440 Linden (DE)**

(54) **VAKUUMPUMPE**

(57) Die Erfindung betrifft eine Vakuumpumpe, insbesondere Turbomolekularpumpe, umfassend eine Primärstruktur, welche im Betrieb der Pumpe vibriert, und eine Dämpfungseinrichtung zur Dämpfung der Vibration

der Primärstruktur, wobei die Dämpfungseinrichtung eine Dämpfungsmasse aufweist, welche mittels eines Federelements mit der Primärstruktur verbunden ist.

**EP 3 653 884 A1**

## Beschreibung

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft eine Vakuumpumpe, insbesondere Turbomolekularpumpe, umfassend eine Primärstruktur, welche im Betrieb der Pumpe vibriert.

**[0002]** Ein möglichst geringes Niveau an Vibration und Schallemission ist ein immer wichtiger werdendes Sekundärmerkmal von Vakuumpumpen, insbesondere von Turbomolekularpumpen, insbesondere in analytischen Anwendungen, wie beispielsweise Elektronen- oder Rasterkraftmikroskopen. Hierbei ist neben einer etwaigen Resonanzdurchfahrt insbesondere der Dauerzustand nach Erreichen der Enddrehzahl ausschlaggebend.

**[0003]** Die Schwingungsanregung eines Turbomolekularpumpen-Gehäuses erfolgt z.B. primär durch die Unwucht des Rotors. Die Wuchtgüte ist jedoch durch den notwendigen Transfer des Rotors aus der Wuchtmaschine in das Gehäuse nach Abschließen des Wuchtvorgangs limitiert. Es ist daher opportun, nach anderen Methoden zur Schwingungsminderung als eine weitere Verbesserung der Wuchtgüte zu suchen.

**[0004]** Gängige Dämpfungsmethoden umfassen den Einsatz eines viskoelastischen Materials, wie z.B. von sogenannten Schwingringen von Lagerfassungen oder von Dämpfungskörpern zwischen Vakuumpumpe und Rezipient. Auch Dämpfungskörper, die die Trägheit einer großen Zusatzmasse einsetzen, sind eine bewährte Dämpfungsmethode. Beide Ansätze bieten Schwingungsminderung über einen großen Frequenzbereich, sind technisch einfach umzusetzen, beanspruchen allerdings ein größeres Volumen und sind hinsichtlich der erreichbaren Dämpfungsgüte beschränkt.

**[0005]** Ein weiterer Ansatz sind aktive Systeme, die über zeitlich hochauflösende Sensorik den Schwingungszustand der Vakuumpumpe bestimmen, um über geeignete Aktorik eine gegenphasige Schwingung zu erzeugen und somit die Schwingung des Gehäuses zu verringern. Aktive Systeme bieten eine starke Verringerung der Vibration über ein breiteres Frequenzband, sind jedoch technisch sehr aufwendig und teuer.

**[0006]** Es ist eine Aufgabe der Erfindung, eine Primärstruktur einer Vakuumpumpe mit einfachen Mitteln wirksam zu dämpfen.

**[0007]** Diese Aufgabe wird durch eine Vakuumpumpe mit den in Anspruch 1 genannten Merkmalen gelöst, und insbesondere durch eine Dämpfungseinrichtung, welche eine Dämpfungsmasse aufweist, die mittels eines Federelements mit der Primärstruktur, bevorzugt frei schwingend, verbunden ist.

**[0008]** Dies stellt eine technisch besonders einfache Lösung zur Dämpfung der Primärstruktur dar. Die Dämpfungseinrichtung lässt sich hinsichtlich ihrer Eigenfrequenz und ihres wirksam dämpfenden Frequenzbandes besonders einfach für die Vakuumpumpe auslegen, nämlich insbesondere durch einfache Wahl der Federkonstante des Federelements und der Masse der Dämpfungsmasse.

fungsmasse.

**[0009]** In diesem Zusammenhang ist festzustellen, dass sich der Begriff Federelement nicht auf ein ideales Federelement ohne jegliche Dämpfung bezieht, sondern auf ein reales Bauteil, welches eine Elastizität aufweist, die ein, insbesondere freies, Schwingen der Dämpfungsmasse relativ zur Primärstruktur ermöglicht. Ein solches reales Bauteil weist eine gewisse Dämpfung auf.

**[0010]** Das Federelement, die Dämpfungsmasse und die Primärstruktur können beispielsweise als separate Teile ausgebildet sein. Alternativ können wenigstens zwei dieser Elemente einteilig verbunden sein. Auch können grundsätzlich beispielsweise alle drei Teile einteilig verbunden sein.

**[0011]** Insbesondere kann die Dämpfungseinrichtung passiv ausgebildet sein, d.h. die Dämpfungseinrichtung weist keine aktiv angetriebenen Schwingkörper auf.

**[0012]** Insbesondere kann die Dämpfungseinrichtung derart ausgebildet sein, dass sie der Primärstruktur durch Resonanz Schwingungsenergie entzieht und/oder gegenphasig zu dieser schwingt.

**[0013]** Bei einigen Ausführungsformen ist vorgesehen, dass eine Eigenfrequenz der Dämpfungseinrichtung größer ist als eine Betriebsdrehzahl eines Rotors der Vakuumpumpe. Hierdurch wird eine besonders wirksame Dämpfung erreicht. Beispielsweise kann die Eigenfrequenz der Dämpfungseinrichtung leicht größer sein als die Betriebsdrehzahl des Rotors. Das Verhältnis von Betriebsdrehzahl des Rotors zu Eigenfrequenz der Dämpfungseinrichtung kann bevorzugt wenigstens 0,99, insbesondere wenigstens 0,995 betragen. Grundsätzlich kann die Eigenfrequenz in Abhängigkeit der Betriebsdrehzahl dimensioniert werden. Alternativ oder zusätzlich ist es möglich, die Betriebsdrehzahl in Abhängigkeit von der Eigenfrequenz einzustellen und/oder die Betriebsdrehzahl an die Eigenfrequenz anzupassen.

**[0014]** Es kann mit Vorteil vorgesehen sein, dass das Massenverhältnis von der Dämpfungsmasse zur Primärstruktur zwischen 5% und 10% beträgt. Dieses Verhältnis bietet einen besonders vorteilhaften Kompromiss zwischen Dämpfungswirkung und notwendigem Bauraum.

**[0015]** Die Pumpe kann gemäß einem weiteren Beispiel einen Sensor zur Erfassung der Vibration der Primärstruktur umfassen. Dabei kann eine Steuerungseinrichtung der Vakuumpumpe dazu ausgebildet sein, eine Betriebsdrehzahl eines Rotors der Pumpe in Abhängigkeit von einer erfassten Vibration einzustellen. Hierdurch kann auf besonders einfache Weise eine äußerst wirksame Dämpfung erreicht werden. Bei verschiedenen Arten von Vakuumpumpen, insbesondere bei Turbomolekularpumpen, hat zumindest eine geringe Veränderung der Betriebsdrehzahl einen geringen, insbesondere zu vernachlässigenden, Effekt auf die Pumpleistung. Dies steht einer erheblichen Verbesserung der Vibrationsdämpfung entgegen, d.h. durch eine z.B. geringfügige Reduzierung der Betriebsdrehzahl wird die Pumpleistung praktisch nicht reduziert, die Dämpfung aber signifikant verbessert. Zudem ist die nötige Veränderung der

Betriebsdrehzahl bei sachgemäßer Wahl der Eigenfrequenz der Dämpfungseinrichtung auch gering. Bei der Fertigung einer erfindungsgemäßen Dämpfungseinrichtung lässt sich die Eigenfrequenz grundsätzlich nicht mit beliebig hoher Genauigkeit dimensionieren. Gewisse Abweichungen nach der Fertigung von einer gewünschten Eigenfrequenz sind also möglich. Insbesondere zum Ausgleich derartiger Fertigungstoleranzen kann also eine geringe Anpassung der Betriebsdrehzahl vorgenommen werden, wobei insbesondere die Pumpleistung aber nur marginal beeinflusst wird.

**[0016]** Grundsätzlich muss der Sensor die Vibration der Primärstruktur nicht unmittelbar messen, auch wenn dies in Bezug auf die Messgenauigkeit vorteilhaft ist. Vielmehr kann der Sensor die Vibration beispielsweise auch mittelbar erfassen, zum Beispiel indem der Sensor an einem Bauteil angebracht ist, welches mit der Primärstruktur zwar nicht starr verbunden ist, an welches die Vibration der Primärstruktur jedoch in irgendeiner Weise übertragen wird.

**[0017]** Bei einer weiteren Ausführungsform ist vorgesehen, dass die Steuerungseinrichtung dazu ausgebildet ist, die Vibration während eines Beschleunigungsvorgangs des Rotors zu beobachten. Dabei kann z.B. ein bestimmter Anstieg der Vibration als das Erreichen und/oder Überschreiten der Eigenfrequenz der Dämpfungseinrichtung gewertet werden. Hierdurch kann insbesondere auf die Eigenfrequenz geschlossen werden. Die Betriebsdrehzahl kann anschließend kleiner als die Eigenfrequenz der Dämpfungseinrichtung eingestellt werden. Grundsätzlich unabhängig von einer konkreten Ermittlung der Eigenfrequenz kann die Betriebsdrehzahl auch auf ein ermitteltes Vibrationsminimum eingestellt werden.

**[0018]** Bei einigen Ausführungsformen ist es vorgesehen, dass eine Federkonstante des Federelements fest definiert und/oder nicht einstellbar ist. Alternativ oder zusätzlich kann zum Beispiel die Eigenfrequenz der Dämpfungseinrichtung fest definiert und/oder nicht einstellbar sein. Hierdurch kann die Dämpfungseinrichtung besonders einfach ausgeführt werden, wobei vorteilhaft ausgenutzt wird, dass viele Arten von Vakuumpumpen, insbesondere Turbomolekularpumpen, meist mit einer im Wesentlichen festen Betriebsdrehzahl betrieben werden bzw. dass die Betriebsdrehzahl während des Betriebes nicht wesentlich verändert wird. Somit können Federkonstante und Eigenfrequenz vorab dimensioniert werden, wobei die Dämpfungseinrichtung technisch besonders einfach aufgebaut ist. Grundsätzlich können Eigenfrequenz und/oder Federkonstante aber auch veränderbar sein.

**[0019]** Die Primärstruktur kann z.B. ein Gehäuse der Vakuumpumpe oder ein separates, mit einem Gehäuse der Pumpe starr verbundenes Bauteil umfassen. Die Primärstruktur kann z.B. auch eine Vakuumkammer oder ein Zwischenflanschelement zwischen Vakuumkammer und Pumpengehäuse umfassen. Insoweit sich hier und im Folgenden auf eine "starre Verbindung" oder ein "star-

res Bauteil" bezogen wird, versteht es sich, dass diese nicht im mathematischen Sinn absolut starr sind. Als starr werden hier vielmehr insbesondere solche Elemente bezeichnet, die eine deutlich höhere Federkonstante als das Federelement der Dämpfungseinrichtung aufweisen.

**[0020]** Bei einer Ausführungsform ist vorgesehen, dass die Dämpfungseinrichtung außen an der Primärstruktur, z.B. außen am Gehäuse, angebracht ist. Die Anbringung außen ermöglicht eine besonders einfache Montage und/oder Nachrüstung der Dämpfungseinrichtung. Die Dämpfungseinrichtung kann zum Beispiel mit der Primärstruktur verschraubt und/oder an diese angeschraubt sein.

**[0021]** Bei einigen Ausführungsformen umfasst die Vakuumpumpe ein Dämpfungsmodul mit einem Basiselement, wobei das Basiselement starr mit einem Gehäuse der Vakuumpumpe verbunden ist. Die Dämpfungsmasse kann mittels des Federelements an dem Basiselement angebracht und/oder gehalten sein. Bei dem Basiselement kann es sich beispielsweise um ein Bauteil handeln, welches an dem Gehäuse der Pumpe angeschraubt ist. Bei einem weiteren Beispiel ist das Basiselement scheibenförmig ausgebildet, insbesondere zur Anbringung an einem auslassseitigen Ende des Pumpengehäuses, an einem Pumpenunterteil und/oder senkrecht zum Pumpenrotor.

**[0022]** Die Dämpfungseinrichtung kann z.B. innerhalb eines Gehäuses der Pumpe und/oder in der Pumpe integriert angeordnet sein. Dies ermöglicht einen kompakten Aufbau.

**[0023]** Die Primärstruktur kann z.B. vom Gehäuse der Pumpe entkoppelt sein, beispielsweise durch wenigstens ein Federelement, wie etwa ein Elastomerelement. Z.B. können zur Entkopplung sogenannte Schwingringe eingesetzt werden. Das Gehäuse weist üblicherweise eine recht große Masse auf. Durch die Entkopplung kann die Dämpfungsmasse hinsichtlich eines vorteilhaften Massenverhältnisses zur Primärstruktur klein gewählt werden, da die Masse des Gehäuses nicht zur Masse der Primärstruktur zählt. Die Dämpfungseinrichtung lässt sich hierdurch besonders kompakt ausführen, wobei dennoch eine wirksame Dämpfung möglich ist.

**[0024]** Die Dämpfungseinrichtung kann bei einem weiteren Ausführungsbeispiel an einem statischen Teil eines Lagerelements für einen Rotor der Pumpe oder einem Bauteil angebracht sein, welches mit einem statischen Teil eines Lagerelements für einen Rotor der Pumpe starr verbunden ist. Zum Beispiel kann es sich bei dem Lagerelement um ein Wälzlager, insbesondere Kugellager, handeln. Der statische Teil kann beispielsweise ein Außenring des Wälzlagers sein. Ein mit dem statischen Teil des Lagerelements verbundenes Bauteil kann beispielsweise eine Lagerfassung sein. Der Außenring und/oder die Lagerfassung können beispielsweise vom Gehäuse der Pumpe entkoppelt sein.

**[0025]** Bei einer weiteren Ausführungsform ist vorgesehen, dass die Primärstruktur vom Rotor, insbesondere

von Gehäuse und Rotor, entkoppelt ist. Insbesondere kann die Primärstruktur von einem statischen Lagerteil entkoppelt sein. Die Primärstruktur kann insbesondere ein Zwischenstück sein oder umfassen, welches zum Beispiel elastisch aufgehängt ist, zum Beispiel zwischen einem statischen Lagerteil oder einem hiermit starr verbundenen Bauteil einerseits und dem Gehäuse oder einem hiermit starr verbundenen Bauteil andererseits. Die Entkopplung vom Rotor und/oder eine Verwendung eines Zwischenstücks vermeidet eine Beeinflussung der Rotordynamik durch die Dämpfungseinrichtung.

**[0026]** Die Dämpfungseinrichtung kann bevorzugt in einem Vakuum- oder Unterdruckbereich der Pumpe angeordnet sein. Hierdurch werden Schwingungen der Dämpfungseinrichtung nicht als Schall an die Umgebung übertragen.

**[0027]** Das Federelement und/oder die Dämpfungsmasse können z.B. aus Metall hergestellt sein. Hierdurch können bei geringem Bauraum eine hohe Steifigkeit und eine hohe Eigenfrequenz erreicht werden. Zudem weist Metall eine relativ geringe Dämpfungskonstante auf. Dies ist für die erfindungsgemäße Dämpfungseinrichtung vorteilhaft, weil der Effekt der Schwingungsreduzierung maßgeblich durch ein zumindest teilweise gegenphasiges Schwingen der Dämpfungsmasse bewirkt wird. Damit dies vorteilhaft stattfinden kann, ist eine geringe Dämpfungskonstante im Federelement bzw. in der Dämpfungseinrichtung vorteilhaft. Grundsätzlich können Federelement und/oder Dämpfungsmasse aber auch aus anderen Materialien, wie etwa Kunststoff, insbesondere einem Polymer, hergestellt sein. Dies kann sich zum Beispiel auf Materialkosten positiv auswirken.

**[0028]** Bei einer technisch besonders einfachen Weiterbildung ist das Federelement als Hebelarm und/oder als Biegearm ausgeführt. Der Arm kann sich z.B. radial, axial oder in Umfangsrichtung, jeweils in Bezug zum Rotor, erstrecken. Das Federelement kann allgemein z.B. unmittelbar an der Primärstruktur angebracht, insbesondere angeschraubt werden. Das Federelement kann allgemein z.B. ein Flachmaterial, wie z.B. Blech, umfassen.

**[0029]** Es kann z.B. vorgesehen sein, dass das Federelement in einer Richtung federnd und in zwei hierzu und zueinander senkrechten Richtungen starr ausgebildet ist. Hierdurch lassen sich Schwingungen der Primärstruktur in der entsprechenden Richtung gezielt dämpfen. Alternativ kann das Federelement zum Beispiel auch in zwei zueinander senkrechten Richtungen federnd ausgebildet sein, insbesondere wobei das Federelement in der dritten Richtung starr ist. Grundsätzlich kann es auch vorgesehen sein, dass das Federelement in einer Raumrichtung nicht federnd, nicht starr, sondern im Wesentlichen frei beweglich oder zumindest mit äußerst niedriger Federkonstante ausgebildet sind.

**[0030]** Grundsätzlich können ein oder mehrere Dämpfungseinrichtungen, jeweils mit mindestens einem Federelement und einer Dämpfungsmasse vorgesehen sein. Beispielsweise kann das Federelement in nur einer ersten Richtung federnd ausgebildet sein, wobei eine

zweite Dämpfungseinrichtung vorgesehen ist, deren Federelement in einer anderen Richtung federnd ausgebildet ist, die insbesondere senkrecht zur ersten Richtung ist. Generell können zum Beispiel auch mehrere Dämpfungseinrichtungen für die gleiche Raumrichtung vorgesehen sein. Allgemein kann z.B. auch ein Dämpfungsmodul mit mehreren Dämpfungseinrichtungen vorgesehen sein. Beispielsweise kann das Dämpfungsmodul ein, insbesondere scheibenförmiges, Basiselement umfassen, an dem die Dämpfungseinrichtungen angebracht sind.

**[0031]** Es kann z.B. auch vorgesehen sein, dass eine Dämpfungseinrichtung mit wenigstens einer Dämpfungsmasse und wenigstens einem Federelement vorgesehen ist, wobei die Dämpfungseinrichtung in zwei zueinander senkrechten Raumrichtungen dämpfend wirkt. Es kann dabei z.B. ein Federelement vorgesehen sein, das in den zwei Raumrichtungen federnd wirkt. Die Dämpfungseinrichtung kann auch wenigstens zwei Federelemente umfassen, die jeweils in verschiedenen Raumrichtungen federnd wirken. Dabei kann insbesondere vorgesehen sein, dass die Federelemente in der federnden Raumrichtung des jeweils anderen Federelements nicht federnd, nicht starr, sondern im Wesentlichen frei beweglich oder zumindest mit äußerst niedriger Federkonstante ausgebildet sind. So wird sichergestellt, dass das jeweilige Federelement in seiner federnden Raumrichtung zuverlässig federt, ohne von dem anderen Federelemente gestört zu werden. Nach diesem Prinzip können auch mehr als zwei Federelemente vorgesehen werden, insbesondere vier oder acht, wobei insbesondere die Hälfte der Federelemente in einer Raumrichtung federnd ausgebildet sind und die andere Hälfte der Federelemente in einer anderen Raumrichtung federnd ausgebildet sind.

**[0032]** Die Dämpfungsmasse kann bevorzugt ringförmig ausgebildet sein und/oder die Primärstruktur umgeben. Eine derartige Dämpfungsmasse kann z.B. durch ein oder mehrere Federelemente mit der Primärstruktur verbunden sein.

**[0033]** Ein Federelement kann grundsätzlich ringförmig ausgebildet sein und/oder die Primärstruktur umgeben. Das Federelement kann dabei bevorzugt zur Federung in wenigstens zwei senkrechten Raumrichtungen und/oder in mehreren, insbesondere im Wesentlichen allen, radialen Raumrichtungen ausgebildet sein. Generell betrifft die Erfindung auch ein Verfahren zum Betreiben einer Vakuumpumpe und/oder zur Dämpfung von Vibrationen einer Primärstruktur einer Vakuumpumpe, bei dem eine Dämpfungseinrichtung zur Dämpfung der Vibration der Primärstruktur bereitgestellt wird, wobei die Dämpfungseinrichtung eine Dämpfungsmasse aufweist, welche mittels eines Federelements mit der Primärstruktur, insbesondere frei schwingend, verbunden ist. Weiterbildungen des Verfahrens entsprechen den hierin beschriebenen Weiterbildungen der Vakuumpumpe. Ausdrücklich wird hervorgehoben, dass die Erfindung auch ein Verfahren zum Betreiben einer Vakuumpumpe be-

trifft, welches die in Anspruch 4 beschriebenen, von der Steuerungseinrichtung durchgeführten Maßnahmen umfasst, bevorzugt auch die Maßnahmen nach Anspruch 5.

**[0034]** 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 Schnittrlinie A-A,
- Fig. 4 eine Querschnittsansicht der Turbomolekularpumpe längs der in Fig. 2 gezeigten Schnittrlinie B-B,
- Fig. 5 eine Querschnittsansicht der Turbomolekularpumpe längs der in Fig. 2 gezeigten Schnittrlinie C-C,
- Fig. 6 eine erfindungsgemäße Dämpfungseinrichtung als mechanisches Schaltbild,
- Fig. 7 und 8 Auftragungen einer Schwingungsmin-  
derung durch eine erfindungsgemäße  
Dämpfungseinrichtung in Abhängig-  
keit von unterschiedlichen Parametern,
- Fig. 9 bis 11 verschiedene Anordnungen von  
Dämpfungseinrichtungen an einer Va-  
kuumpumpe,
- Fig. 12 und 13 eine Ausführungsform mit einem  
Dämpfungsmodul,
- Fig. 14 und 15 Ausführungsformen von innen im Ge-  
häuse angeordneten Dämpfungsein-  
richtungen,
- Fig. 16 und 17 eine Ausführungsform einer Dämp-  
fungseinrichtung in verschiedenen  
Ansichten,
- Fig. 18 und 19 eine weitere Ausführungsform einer  
Dämpfungseinrichtung,
- Fig. 20 eine Ausführungsform eines Federele-  
ments.

**[0035]** 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.

**[0036]** 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. Am Elektronikgehäuse 123 sind mehrere Anschlüsse 127 für Zubehör vorgesehen. Außerdem sind eine Datenschnittstelle 129, z.B. gemäß dem RS485-Standard, und ein Stromversorgungsanschluss 131 am Elektronikgehäuse 123 angeordnet.

**[0037]** 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, gebracht 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.

**[0038]** 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.

**[0039]** 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.

**[0040]** An der Unterseite 141 sind außerdem Befesti-

gungsbohrungen 147 angeordnet, über welche die Pumpe 111 beispielsweise an einer Auflagefläche befestigt werden kann.

**[0041]** In den Figuren 2 bis 5 ist eine Kühlmittleitung 148 dargestellt, in welcher das über die Kühlmittelschlüsse 139 ein- und ausgeleitete Kühlmittel zirkulieren kann.

**[0042]** 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.

**[0043]** In dem Gehäuse 119 ist ein Rotor 149 angeordnet, der eine um eine Rotationsachse 151 drehbare Rotorwelle 153 aufweist.

**[0044]** 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.

**[0045]** Die Vakuumpumpe umfasst außerdem in radialer Richtung ineinander angeordnete und pumpwirksam miteinander in Serie geschaltete Holweck-Pumpstufen. 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.

**[0046]** 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.

**[0047]** 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. Außerdem 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.

**[0048]** Die vorstehend genannten pumpaktiven Oberflächen der Holweck-Statorhülsen 163, 165 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.

**[0049]** 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.

**[0050]** 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. Der Betriebsmittelspeicher umfasst mehrere aufeinander gestapelte saugfähige Scheiben 187, die mit einem Betriebsmittel für das Wälzlager 181, z.B. mit einem Schmiermittel, getränkt sind.

**[0051]** 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.

**[0052]** 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 203 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.

**[0053]** 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, da 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.

**[0054]** 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.

**[0055]** 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 gelangen. 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.

**[0056]** 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.

**[0057]** Die nachstehend beschriebenen Vakuumpumpen können vorteilhaft durch die beschriebenen Einzelmerkmale der Pumpe der Fig. 1 bis 5 weitergebildet werden.

**[0058]** Fig. 6 zeigt ein mechanisches Schaltbild eines Systems mit einer Primärstruktur 20 und einer Dämpfungseinrichtung umfassend ein Federelement 22 und eine Dämpfungsmasse 24. Die Primärstruktur 20 wird als starr angenommen, das heißt, dass keine Eigenfrequenz unter oder nahe der Betriebsdrehzahl des Rotors und damit unter oder nahe einer Schwingungsfrequenz  $\omega$  der Primärstruktur 20 im Betrieb liegt.

**[0059]** Das Federelement 22 ist durch ein Federsymbol und ein Dämpfungssymbol angedeutet, um zu verdeutlichen, dass das reale Federelement 22 auch eine Dämpfung aufweist. Insbesondere ist kein zusätzliches Dämpfungselement vorgesehen.

**[0060]** Die Dämpfungseinrichtung entzieht der Primärstruktur 20 durch Resonanz Schwingungsenergie. Z.B. entsprechend einem aktiven Schwingungsdämpfungssystem schwingt die erfindungsgemäße Dämpfungseinrichtung insbesondere gegenphasig zur Primärstruktur 20. Im Unterschied zum aktiven System geschieht dies jedoch nicht durch eine aktive Ansteuerung, sondern passiv durch Resonanz.

**[0061]** Auf Grund der passiven Natur der Dämpfungseinrichtung tritt die Schwingungsminderung nur in einem schmalen Frequenzband auf. Sind der Mittelpunkt des Frequenzbands und/oder die Eigenfrequenz der Dämpfungseinrichtung auf die Schwingungsfrequenz der Primärstruktur 20 abgestimmt, hier die Rotordrehzahl der Vakuumpumpe, wird die Schwingung wirksam gedämpft. Eine derartige Dämpfungseinrichtung kommt im Allgemeinen mit besonders wenig Bauraum aus, zeichnet sich aber durch eine besonders starke Reduzierung der Vibration der Primärstruktur aus.

**[0062]** Fig. 7 zeigt eine Auftragung von erzielten Schwingungsminderungen  $D$  für beispielhafte Dämpfungseinrichtungen. Auf der Abszisse ist ein Verhältnis der Schwingungsfrequenz  $\omega$  der Primärstruktur zur Eigenfrequenz  $\omega_D$  der Dämpfungseinrichtung aufgetragen. Die Ordinate zeigt die Schwingungsminderung  $D$  in dB. Die Auftragung umfasst drei Frequenzgänge 26, 28, 30 mit unterschiedlichem Dämpfungskoeffizient  $c$  bzw. für unterschiedlich gedämpfte Dämpfungseinrichtungen.

**[0063]** Die Frequenzgänge haben qualitativ die gleiche Form. Eine schwache Minderung der Schwingungsamp-

litude der Primärstruktur tritt bereits relativ weit vor Erreichen der Eigenfrequenz  $\omega_D$  der Dämpfungseinrichtung auf. Die maximale Schwingungsminderung  $D$  tritt kurz vor Erreichen der Eigenfrequenz auf. Liegt die Schwingungsfrequenz  $\omega$  der Primärstruktur über der Eigenfrequenz  $\omega_D$ , kommt es zu einer Verstärkung der Schwingung bzw. der Vibration.

**[0064]** Je höher der Dämpfungskoeffizient  $c$  ist, desto geringer ist die Schwingungsminderung und desto größer ist eine Halbwertsbreite des Dämpfungsmaximums. Für eine optimale Performance der Dämpfungseinrichtung kann daher bevorzugt der Dämpfungskoeffizient der Dämpfungseinrichtung möglichst gering sein, wobei allerdings insbesondere eine präzise Anpassung der Eigenfrequenz der Dämpfungseinrichtung an die Betriebsdrehzahl vorzunehmen ist.

**[0065]** Ein weiterer wichtiger Parameter der Dämpfungseinrichtung ist das Verhältnis der Masse  $m_D$  der Dämpfungsmasse zur Masse  $m_P$  der Primärstruktur. Der Zusammenhang ist für ein beispielhaftes System in Fig. 8 aufgetragen.

**[0066]** Ein hohes Massenverhältnis ermöglicht eine höhere Schwingungsminderung. Im Gegensatz zum Dämpfungskoeffizienten hat es allerdings keinen Einfluss auf die Bandbreite. Bevorzugt wird ein Massenverhältnis von 5% bis 10% verwendet.

**[0067]** Durch die Toleranz der Maße, Schwankungen in den Materialeigenschaften oder Umwelteinflüsse kann sich die Eigenfrequenz  $\omega_D$  der Dämpfungseinrichtung um einige Hz von der angestrebten Eigenfrequenz unterscheiden. Da, wie Fig. 7 zeigt, die Halbwertsbreite des Dämpfungsmaximums nur wenige Hz beträgt, kann sich bei einer ungünstigen Paarung der zuvor genannten Parameter die Eigenfrequenz  $\omega_D$  der Dämpfungseinrichtung so weit von der Betriebsdrehzahl der Pumpe verschieben, dass nur eine geringe Schwingungsminderung  $D$  auftritt oder es sogar zu einer Verstärkung der Schwingungen bei  $\omega/\omega_D > 1$  kommt.

**[0068]** Bei Vorhandensein eines Beschleunigungssensors in der Pumpe kann die Antriebselektronik beispielsweise die optimale Betriebsdrehzahl selbstständig ermitteln und anpassen. Hierzu kann z.B. ab einer bestimmten Drehzahl nahe der regulären Enddrehzahl, beispielsweise 990 Hz für eine Turbomolekularpumpe mit 1000 Hz Enddrehzahl, eine Messung der Vibrationen der Pumpe durchgeführt werden oder die Vibration beobachtet werden. Die Messung wird bei langsamer Erhöhung der Drehzahl fortgesetzt, bis ein starker Anstieg der Vibrationen bei oder nahe  $\omega/\omega_D = 1$  detektiert wird. Die Drehzahl der Pumpe kann dann auf das zuvor ermittelte Minimum der Schwingungen angepasst werden. Die resultierende geringe Unter- oder Überdrehzahl von wenigen Hz ist insbesondere unproblematisch hinsichtlich der vakuumtechnischen Kennzahlen oder der Materialermüdung.

**[0069]** Die Fig. 9 bis 11 zeigen verschiedene Ausführungsformen von Vakuumpumpen 31, die hier jeweils beispielhaft als Turbomolekularpumpen ausgebildet sind

und bei denen die Dämpfungseinrichtungen 22, 24 jeweils außen an der Primärstruktur 20 bzw. außen am Gehäuse angeordnet sind. In Fig. 9 sind die Dämpfungseinrichtungen 22, 24 an einem Unterteil eines Pumpengehäuses angeordnet. Dabei können die Dämpfungseinrichtung einen 22, 24 zum Beispiel in konstruktiv ohnehin vorhandene Gewinde eingeschraubt sein. Fig. 10 zeigt die Anbringung radial am Gehäuse. In Fig. 11 ist ein Zwischenelement oder Zwischenflansch vorgesehen, welches als Primärstruktur 20 gekennzeichnet ist und zwischen der Vakuumpumpe 31 und einer nicht dargestellten Vakuumkammer angeordnet ist. Die Dämpfungseinrichtungen 20, 24 sind an dem Zwischenelement angebracht.

**[0070]** Die Anbringung der Dämpfungseinrichtung an der Außenseite des Gehäuses ist mit einem besonders geringen konstruktiven Aufwand verbunden, da die Pumpe selbst nicht modifiziert werden muss. Zur Montage können z.B. Bohrungen an der Unterseite des Gehäuses oder Bohrungen mit radialer Ausrichtung eingesetzt werden. Die Bohrungen können z.B. ohnehin vorgesehen sein, z.B. zu einem anderen Zweck, oder für die Dämpfungseinrichtungen eingebracht werden, und zwar entweder bei Herstellung der Pumpe oder auch nachträglich. Auch der Einsatz eines Zwischenelements, wie etwa eines kurzen Rohrstücks und/oder Zwischenflansches zwischen Pumpe und Rezipient bzw. Kammer mit Dämpfungseinrichtung kann eine einfache Nachrüstung einer Vakuumanlage ermöglichen.

**[0071]** Eine weitere Ausführungsform stellt die in den Fig. 12 und 13 illustrierte Verwendung eines, insbesondere scheibenförmigen, Basiselements 32 dar, insbesondere eines solchen mit mehreren integrierten Dämpfungseinrichtungen 22, 24. Das Basiselement 32 bildet zusammen mit den Dämpfungseinrichtungen 22, 24 ein Dämpfungsmodul 34, welches in dieser Ausführungsform an einem axialen Ende des Pumpengehäuses bzw. der Primärstruktur 20 angebracht, insbesondere verschraubt, ist. Insbesondere kann das Dämpfungsmodul 34 an einem Unterteil der Pumpe 31 angebracht sein.

**[0072]** Bei einigen Ausführungsformen ist die Dämpfungseinrichtung 22, 24 in der Pumpe 31 bzw. im Gehäuse integriert angeordnet. Zwei solcher Ausführungsformen sind in den Fig. 14 und 15 gezeigt.

**[0073]** Darin ist jeweils ein Kugellageraußenring 36 dargestellt, der einen statischen Teil eines Lagerelements für den Rotor der Pumpe bildet. Dieser ist durch seine Rotationsachse 38 angedeutet. Der Kugellageraußenring 36 ist starr mit einer Lagerfassung 40 verbunden, welche durch zwei axiale Schwingringe 42 und einen radialen Schwingring 44 gegenüber einem Gehäuse 46 der Pumpe bzw. einem mit dem Gehäuse 46 starr verbundenen Bauteil 45 abgestützt und von diesen entkoppelt ist.

**[0074]** Bei der Ausführungsform der Fig. 14 ist die Dämpfungseinrichtung 22, 24 an der Lagerfassung 40 befestigt. Die Lagerfassung 40 ist über die Schwingringe 42 und 44 von dem Gehäuse 46 entkoppelt. Die Masse



des Gehäuses 46 zählt somit nicht zur Masse der Primärstruktur 20 im Hinblick auf ein anzustrebendes Massenverhältnis zwischen Dämpfungsmasse 24 und Primärstruktur 20.

**[0075]** Die Ausführungsform der Fig. 15 zeichnet sich unter anderem dadurch aus, dass die Dämpfungseinrichtung 22, 24 an einem Zwischenstück 47 befestigt ist, welches sowohl vom Gehäuse 46 als auch von der mit dem Rotor gekoppelten Struktur 36, 40 entkoppelt ist, was hier durch radiale Schwingringe 44 realisiert ist. Auch hier ist das Gehäuse 46 nicht Teil der Masse der Primärstruktur. Außerdem wird in der Ausführungsform der Fig. 15 durch die Entkopplung vom Rotor bzw. der damit gekoppelten Struktur 36, 40 eine Beeinflussung der Rotordynamik vermieden.

**[0076]** Eine jeweilige Dämpfungseinrichtung kann durch Entkopplung vom Gehäuse 46 beispielsweise mit einer etwa 80 % geringeren Masse ausgelegt werden, als bei einer Anbringung, insbesondere außen, am Pumpengehäuse. Die Dämpfungseinrichtung 22, 24 trägt außerdem bei einer Anordnung in einem Vakuum- oder Unterdruckbereich nicht zur Schallemission bei.

**[0077]** Eine Dämpfungseinrichtung umfasst generell ein Federelement mit Steifigkeit bzw. Federkonstante und Dämpfung sowie eine daran angebrachten Dämpfungsmasse. Für Federelement und Dämpfungsmasse können verschiedene Materialien verwendet werden. So können zum Beispiel Metalle und/oder Kunststoffe, insbesondere Polymere, verwendet werden. Insbesondere bei Turbomolekularpumpen, deren Betriebsdrehzahlen meist im Bereich von 500 bis 1500 Hz liegen, also eine recht hohe Frequenz aufweisen, ist eine metallische Ausführung von Federelement und Dämpfungsmasse insbesondere im Hinblick auf den nötigen Bauraum vorteilhaft.

**[0078]** Grundsätzlich vorteilhaft ist es, wenn weitere Eigenfrequenzen der Dämpfungseinrichtung, soweit vorhanden, nicht nahe derjenigen Eigenfrequenz liegen, mit welcher die Dämpfungseinrichtung an die Pumpendrehzahl angepasst ist. Insbesondere zu diesem Zweck kann, wie bei dem in den Fig. 16 und 17 veranschaulichten Beispiel, das Federelement 22 als Hebelarm 48 ausgeführt sein. An diesem Hebelarm 48 ist an einem ersten Ende eine Dämpfungsmasse 24 angebracht, in dem gezeigten Beispiel mittels einer Schraube 50. Das Federelement 22 bzw. 48 ist mit seinem anderen, der Dämpfungsmasse 24 gegenüberliegenden Ende mit einer Durchgangsbohrung für eine Schraube 50 versehen, so dass das Federelement 22, 48 bzw. die Dämpfungseinrichtung an einer Primärstruktur angeschraubt werden kann.

**[0079]** Der Hebelarm 48 ist in nur einer ersten Richtung schwingend bzw. elastisch ausgebildet, nämlich in der in Fig. 17 horizontal verlaufenden Richtung. In der in Fig. 16 horizontal verlaufenden, zur ersten Richtung senkrechten, zweiten Richtung ist der Hebelarm 48 durch seine deutlich größere Breite im Vergleich zur ersten Richtung im Wesentlichen starr. Auch in seiner Längsrich-

tung, welche in den Fig. 16 und 17 senkrecht verläuft, ist der Hebelarm 48 im Wesentlichen starr. Die hier gezeigte Dämpfungseinrichtung dämpft eine Primärstruktur also nur in einer Raumrichtung. Zur Dämpfung in mehreren Raumrichtungen können beispielsweise mehrere derartige Dämpfungseinrichtungen in unterschiedlichen Orientierungen eingesetzt werden.

**[0080]** Die Fig. 18 und 19 zeigen ein Kugellager mit einem Kugellageraußenring 36. Mit dem Kugellageraußenring 36 ist eine Dämpfungsmasse 24 über mehrere Federelemente 22, in dieser Ausführungsform über acht Federelemente 22, verbunden. Die Dämpfungsmasse 24 ist hier ringförmig ausgebildet und ist konzentrisch zum Kugellageraußenring 36 angeordnet. Die Federelemente 22 können grundsätzlich verschiedene Formen und Anzahlen aufweisen. Hier ist ein jeweiliges Federelement 22 durch ein Flachmaterial, insbesondere Blech, mit vier 90°-Knicken gebildet. So bilden die Federelemente 22 eine Art schwingfähiges Rechteck.

**[0081]** Die Dämpfungseinrichtung 22, 24 der Fig. 18 und 19 erlaubt eine Dämpfung in zwei zueinander senkrechten Richtungen, nämlich in Fig. 18 die senkrechte und die waagerechte Richtung der Bildebene. Wie sich aus Fig. 19 ergibt, weisen die Federelemente 22 eine gewisse Erstreckung entlang der zu diesen beiden Richtungen senkrechten Richtung bzw. senkrecht zur Bildebene der Fig. 18 auf. Hierdurch ist die Dämpfungsmasse 24 im Wesentlichen nicht schwingfähig in dieser Richtung. Hierdurch wird eine besonders zuverlässige und definierte Dämpfung in den zwei möglichen Dämpfungsrichtungen ermöglicht.

**[0082]** Die Fig. 20 zeigt ein Federelement 22 zur Verbindung einer Dämpfungsmasse mit einer Primärstruktur, insbesondere einer ringförmigen Dämpfungsmasse, wie sie zum Beispiel in den Fig. 18 und 19 gezeigt ist. Das Federelement 22 der Fig. 20 ist ringförmig ausgebildet. Entlang seiner Ringbahn ist es im Wesentlichen wellenförmig ausgebildet. Durch die wellenförmige Ausbildung wird eine Federwirkung in im Wesentlichen allen radialen Raumrichtungen bewirkt. Ein derartiges Federelement 22 kann auch als Radialfeder bezeichnet werden.

**[0083]** Zusammenfassend beruht das Funktionsprinzip der Dämpfungseinrichtung 22, 24 also insbesondere nicht auf innerer Dämpfung, sondern auf der Gegenphasigkeit der Schwingungen von Primärstruktur und Dämpfungsmasse. Dieser Effekt tritt insbesondere nur in einem schmalen Frequenzband auf, das auf die zu unterdrückende Frequenz der Primärstruktur abgestimmt wird. Hierzu ist die Dämpfungseinrichtung insbesondere so beschaffen, dass ihre erste Eigenfrequenz mit der Anregungsfrequenz der Primärstruktur, insbesondere der Betriebsdrehzahl, übereinstimmt. Ist die Anregungsfrequenz deutlich geringer als die Eigenfrequenz der Dämpfungseinrichtung, tritt nur eine geringe oder keine Schwingungsminderung auf. Ist sie hingegen größer, kommt es zu einer Verstärkung der Schwingungen der Primärstruktur. Für Primärstrukturen mit variablen Anre-

gungsfrequenzen, wie beispielsweise solchen mit Motoren, können die Eigenfrequenz der Dämpfungseinrichtung und/oder die Federkonstante des Federelements einstellbar sein. Bei einer Turbomolekularpumpe, die im Allgemeinen eine im Wesentlichen feste Betriebsdrehzahl aufweist, ist eine Dämpfungseinrichtung mit fester Eigenfrequenz bzw. Federkonstante besonders vorteilhaft, nämlich besonders einfach. Versuche mit zwei Dämpfungseinrichtungen an einem Unterteil einer Turbomolekularpumpe zeigten eine Verringerung der gemessenen Gehäuseschwingungen von 90%.

#### **Bezugszeichenliste**

##### **[0084]**

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  
5 203 Trägerabschnitt  
205 radiale Strebe  
207 Deckelelement  
209 Stützring  
211 Befestigungsring  
10 213 Tellerfeder  
215 Not- bzw. Fanglager  
217 Motorstator  
219 Zwischenraum  
221 Wandung  
15 223 Labyrinthdichtung  
20 Primärstruktur  
22 Federelement  
24 Dämpfungsmasse  
26 Frequenzgang  
20 28 Frequenzgang  
30 Frequenzgang  
31 Vakuumpumpe  
32 Basiselement  
34 Dämpfungsmodul  
25 36 Kugellageraußenring  
38 Rotationsachse  
40 Lagerfassung  
42 axialer Schwingring  
44 radialer Schwingring  
30 45 Bauteil  
46 Gehäuse  
47 Zwischenstück  
48 Hebelarm  
50 Schraube  
35

#### **Patentansprüche**

1. Vakuumpumpe (31), insbesondere Turbomolekularpumpe, umfassend:
  - eine Primärstruktur (20), welche im Betrieb der Pumpe vibriert, und
  - eine Dämpfungseinrichtung (22, 24) zur Dämpfung der Vibration der Primärstruktur (20), wobei die Dämpfungseinrichtung eine Dämpfungsmasse (24) aufweist, welche mittels eines Federelements (22) mit der Primärstruktur (20) verbunden ist.
2. Vakuumpumpe (31) nach Anspruch 1, wobei eine Eigenfrequenz der Dämpfungseinrichtung (22, 24) größer ist als eine Betriebsdrehzahl eines Rotors der Vakuumpumpe (31).
3. Vakuumpumpe (31) nach Anspruch 1 oder 2, wobei das Massenverhältnis von der Dämpfungsmasse zur Primärstruktur zwischen 5% und 10% be-

- trägt.
4. Vakuumpumpe (31) nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
wobei die Vakuumpumpe (31) einen Sensor zur Erfassung der Vibration der Primärstruktur (20) umfasst, und wobei eine Steuerungseinrichtung der Vakuumpumpe (31) dazu ausgebildet ist, eine Betriebsdrehzahl eines Rotors der Vakuumpumpe (31) in Abhängigkeit von einer erfassten Vibration einzustellen. 5
  5. Vakuumpumpe (31) nach Anspruch 4,  
wobei die Steuerungseinrichtung dazu ausgebildet ist, die Vibration während eines Beschleunigungsvorgangs des Rotors zu beobachten, wobei ein bestimmter Anstieg der Vibration als das Erreichen und/oder Überschreiten der Eigenfrequenz der Dämpfungseinrichtung gewertet wird, wobei die Betriebsdrehzahl des Rotors kleiner als die Eigenfrequenz der Dämpfungseinrichtung und/oder auf ein ermitteltes Vibrationsminimum eingestellt wird. 10
  6. Vakuumpumpe (31) nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
wobei die Primärstruktur (20) ein Gehäuse der Vakuumpumpe (31) umfasst oder mit einem solchen starr verbunden ist, und/oder wobei die Dämpfungseinrichtung (22, 24) außen an der Primärstruktur (20) angebracht ist. 15
  7. Vakuumpumpe (31) nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
wobei die Vakuumpumpe ein Dämpfungsmodul (34) mit einem Basiselement (32) umfasst, wobei das Basiselement (32) starr mit einem Gehäuse der Vakuumpumpe verbunden ist, und wobei die Dämpfungsmasse (24) mittels des Federelements (22) an dem Basiselement (32) angebracht ist. 20
  8. Vakuumpumpe (31) nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
wobei die Primärstruktur (20) und die Dämpfungseinrichtung (22, 24) innerhalb eines Gehäuses der Vakuumpumpe (31) angeordnet sind. 25
  9. Vakuumpumpe (31) nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
wobei die Primärstruktur (20) von einem Gehäuse (46) der Vakuumpumpe (31) entkoppelt ist. 30
  10. Vakuumpumpe (31) nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
wobei die Dämpfungseinrichtung (22, 24) an einem statischen Teil (36) eines Lagerelements für einen Rotor der Vakuumpumpe (31) oder an einem Bauteil (40) angebracht ist, welches mit einem solchen starr verbunden ist. 35
  11. Vakuumpumpe (31) nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
wobei die Primärstruktur (20) von einem Gehäuse (46) der Vakuumpumpe (31) und von einem Rotor der Vakuumpumpe (31) entkoppelt ist. 40
  12. Vakuumpumpe (31) nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
wobei das Federelement (22) und/oder die Dämpfungsmasse (24) aus Metall hergestellt sind. 45
  13. Vakuumpumpe (31) nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
wobei das Federelement (22) als Hebelarm (48) ausgeführt ist. 50
  14. Vakuumpumpe (31) nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
wobei das Federelement (22) in einer Richtung federnd und in zwei hierzu senkrechten Richtungen starr ausgebildet ist. 55
  15. Vakuumpumpe (31) nach einem der vorhergehenden Ansprüche,  
wobei das Federelement (22) in nur einer Richtung federnd ausgebildet ist, und wobei zumindest eine weitere Dämpfungseinrichtung (22, 24) vorgesehen ist, deren Federelement (22) in einer anderen Richtung federnd ausgebildet ist, und/oder  
wobei eine Dämpfungseinrichtung (22, 24) mit wenigstens einer Dämpfungsmasse (24) und wenigstens einem Federelement (22) vorgesehen ist, wobei die Dämpfungseinrichtung (22, 24) in zwei zueinander senkrechten Raumrichtungen dämpfend wirkt.

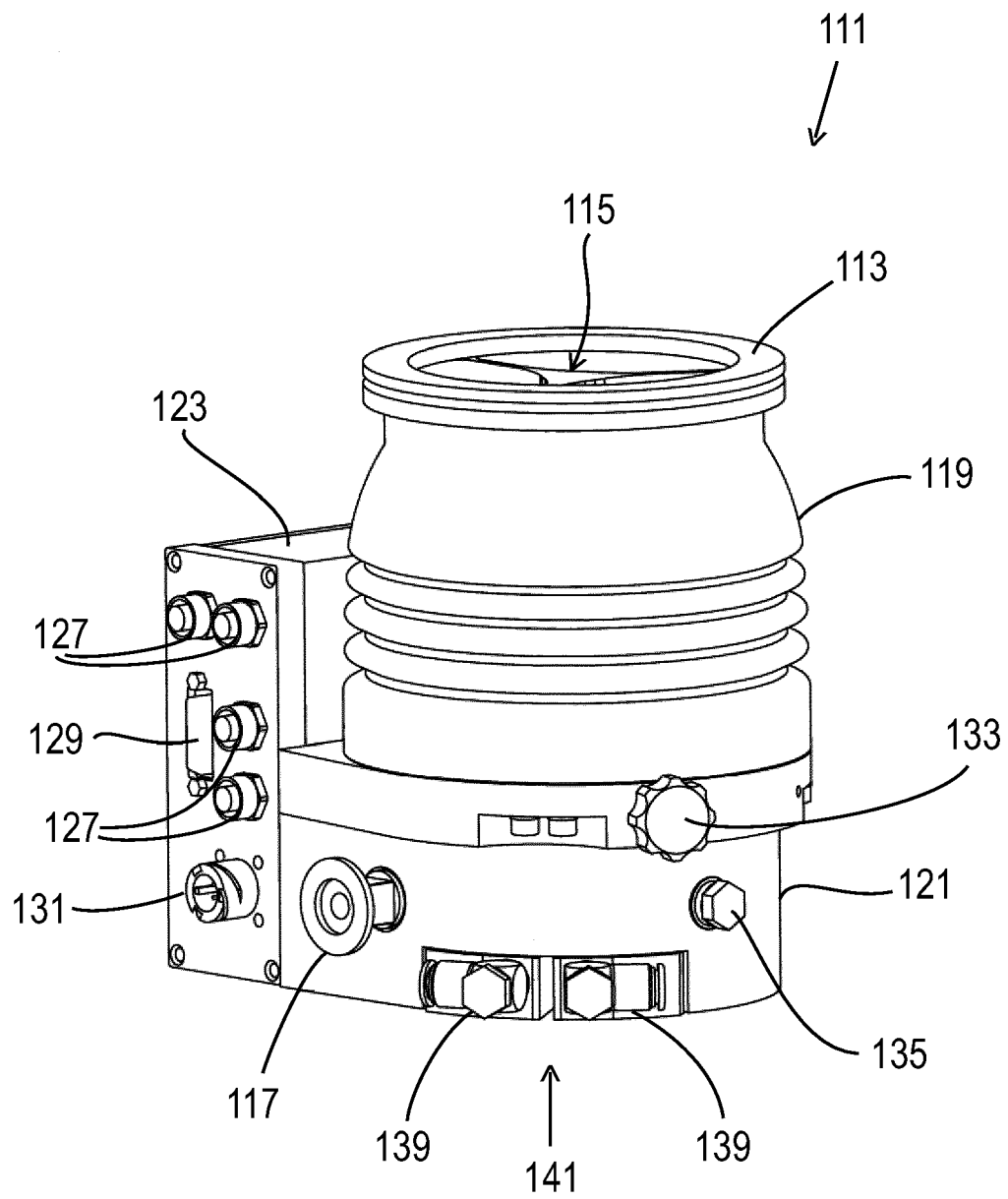


Fig. 1

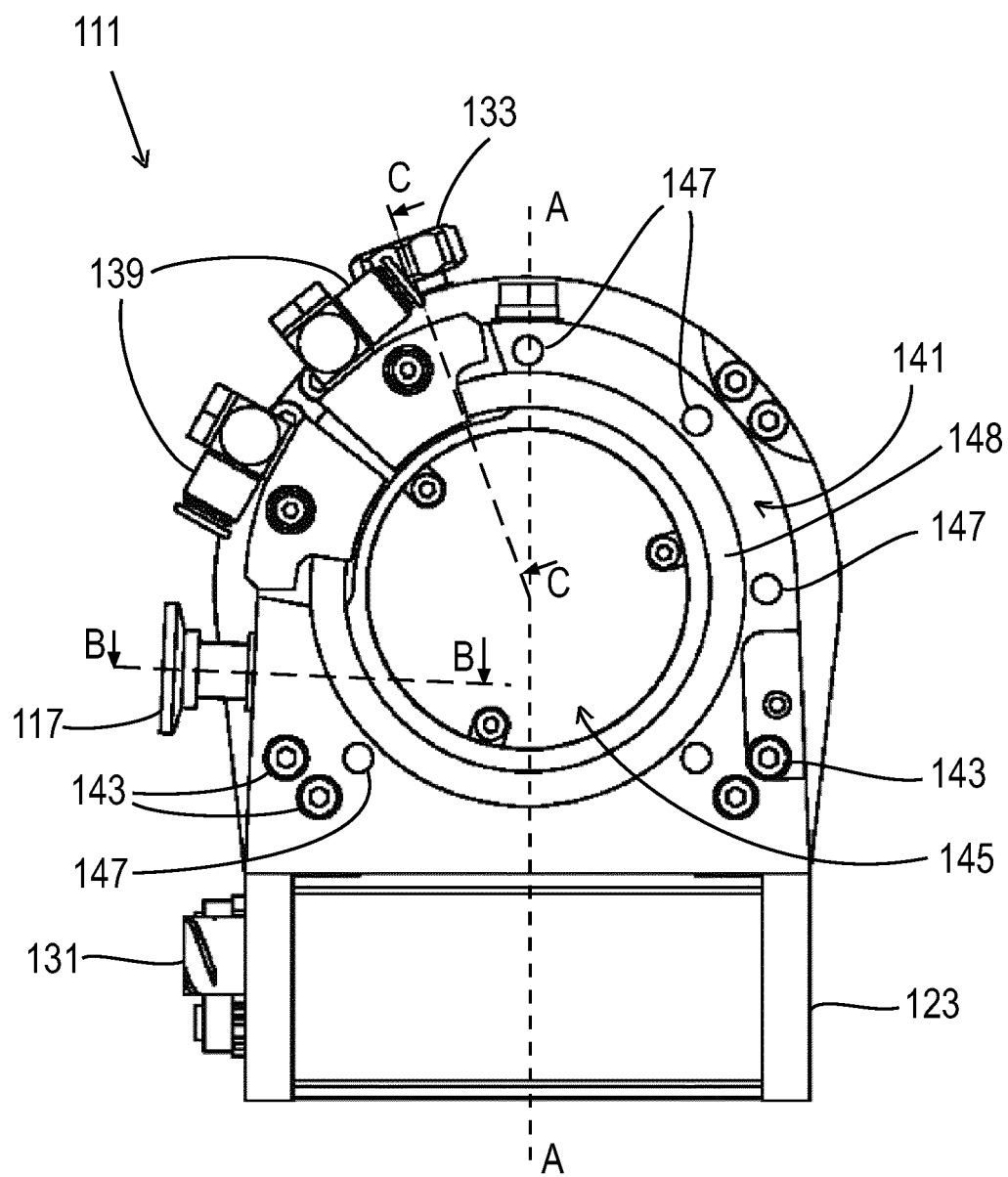


Fig. 2

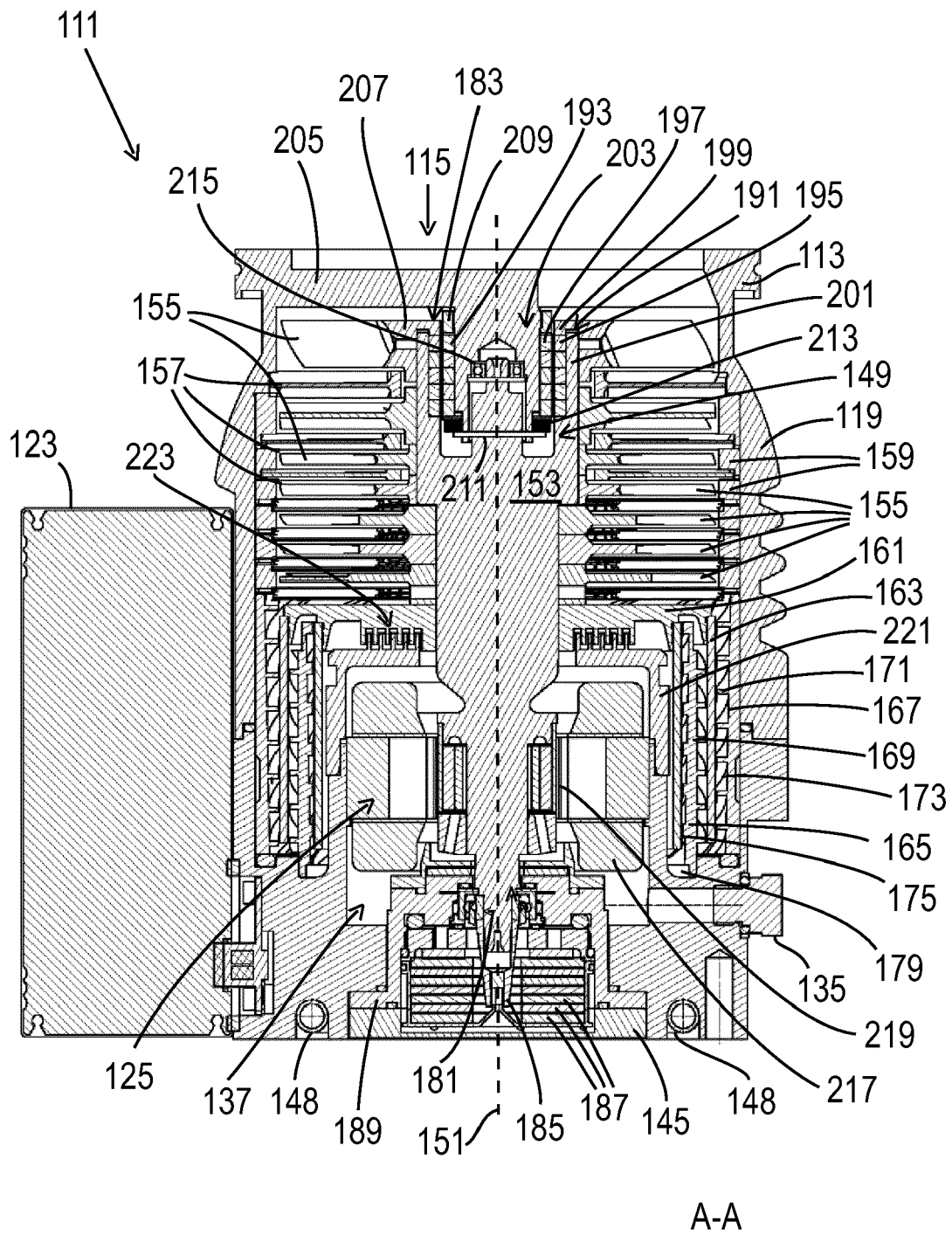


Fig. 3

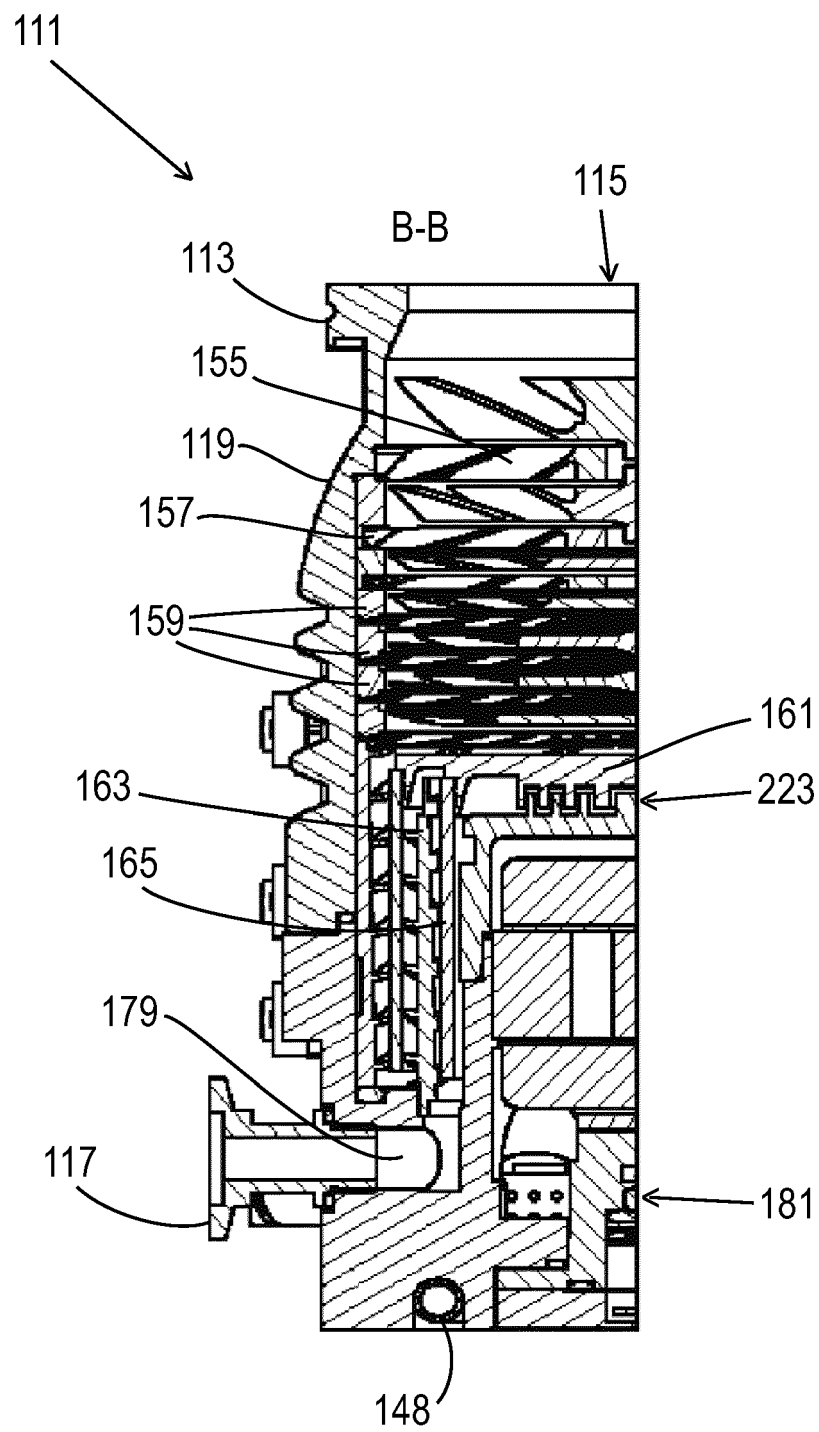


Fig. 4

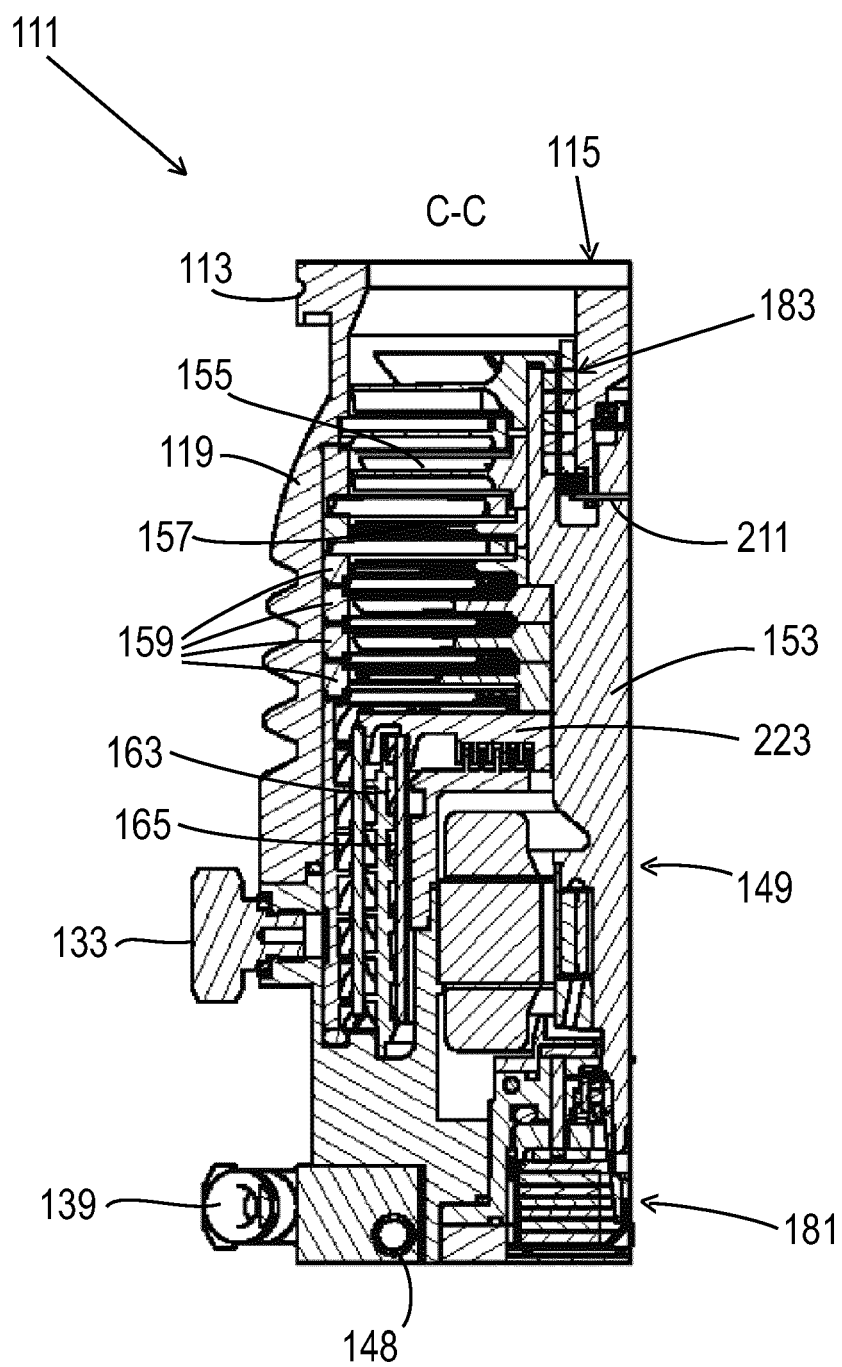


Fig. 5



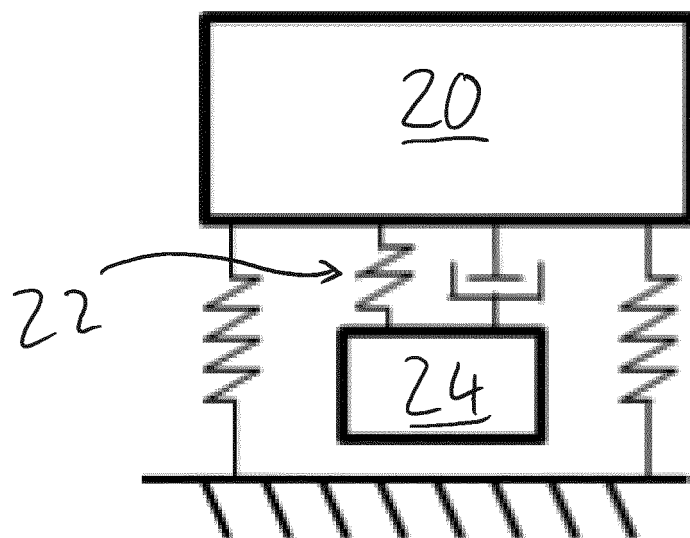


Fig. 6

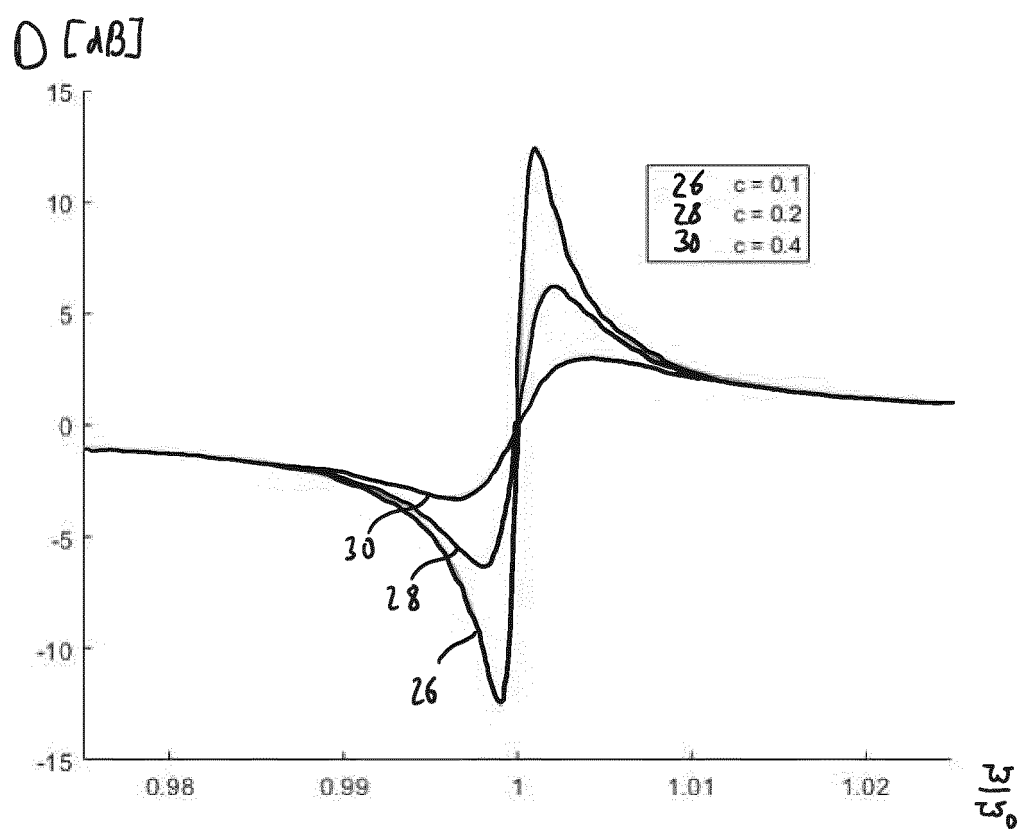
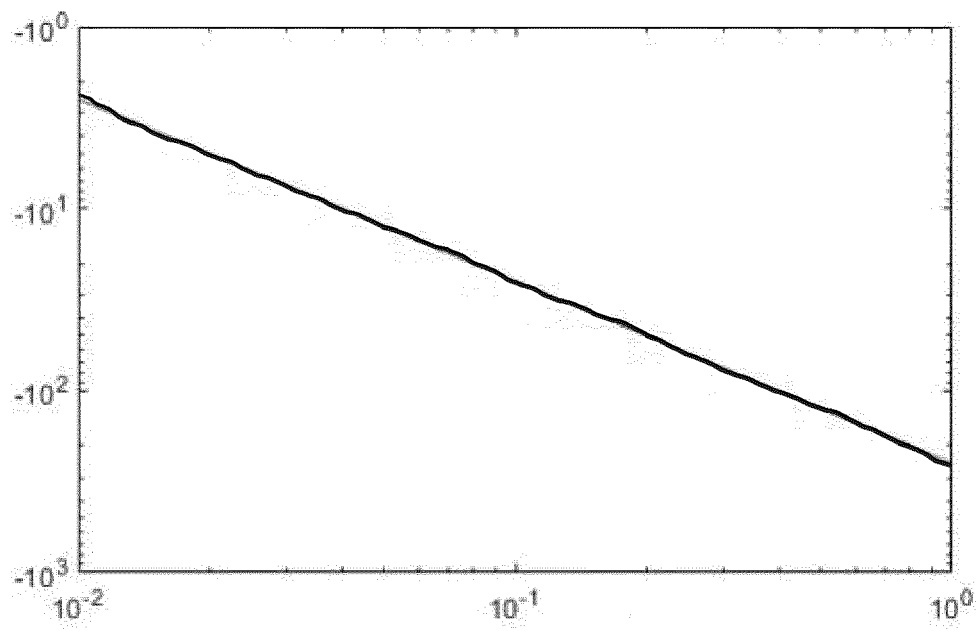


Fig. 7

$\mathcal{O}[\Delta\beta]$



$$\frac{m_D}{m_P}$$

Fig. 8

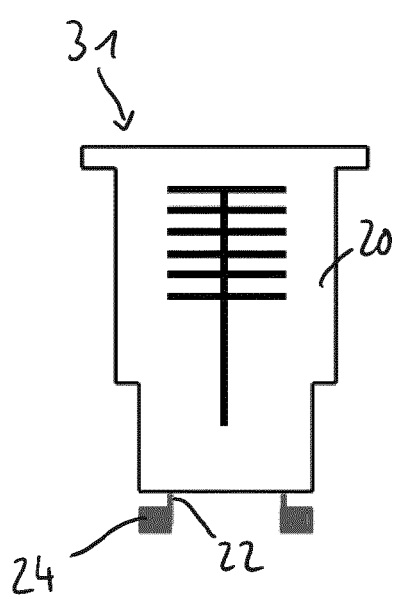


Fig. 9

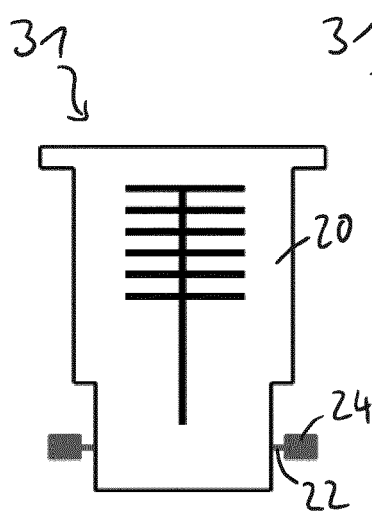


Fig. 10

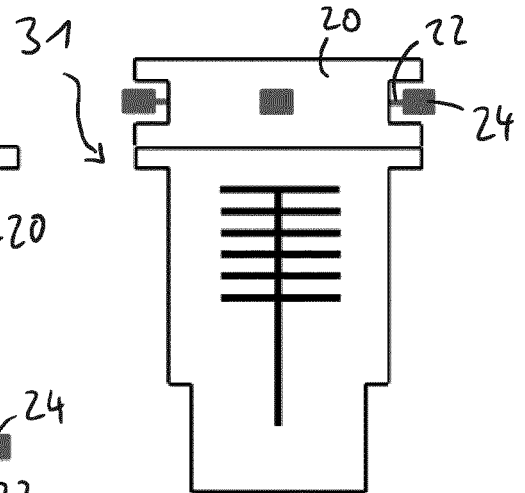


Fig. 11

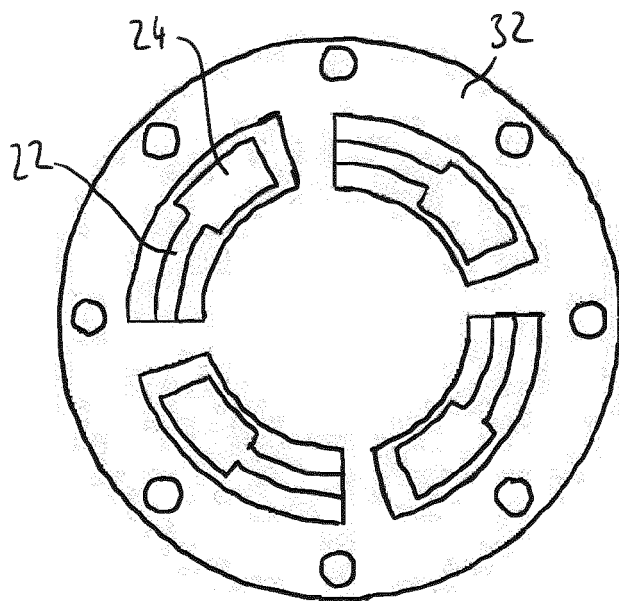


Fig. 12

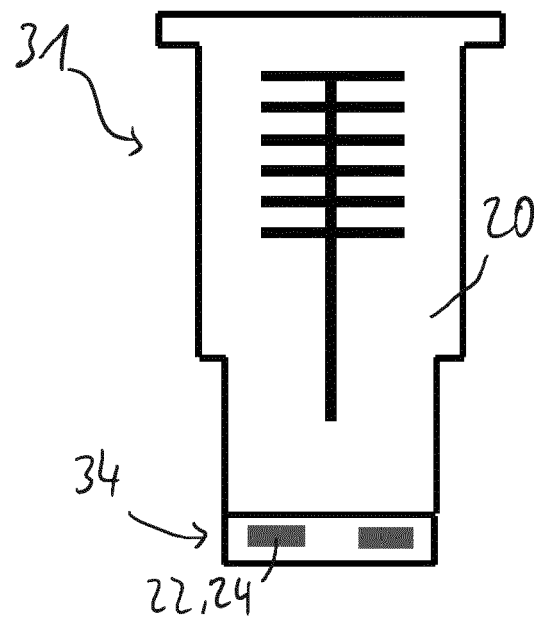
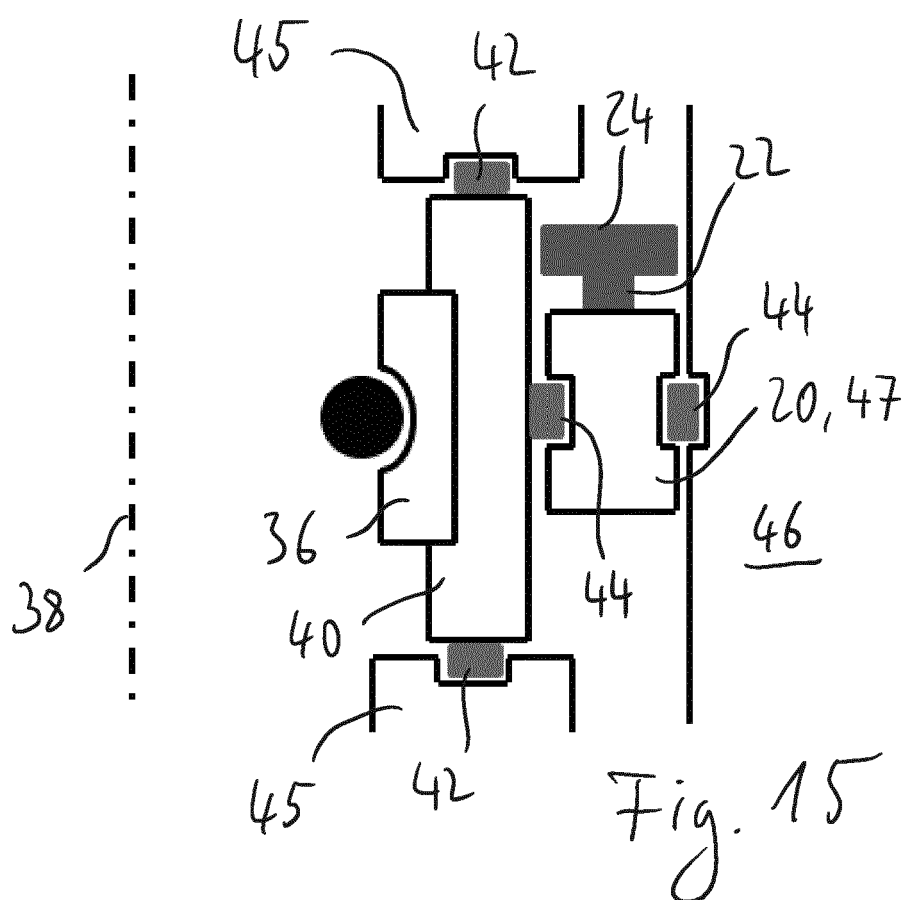
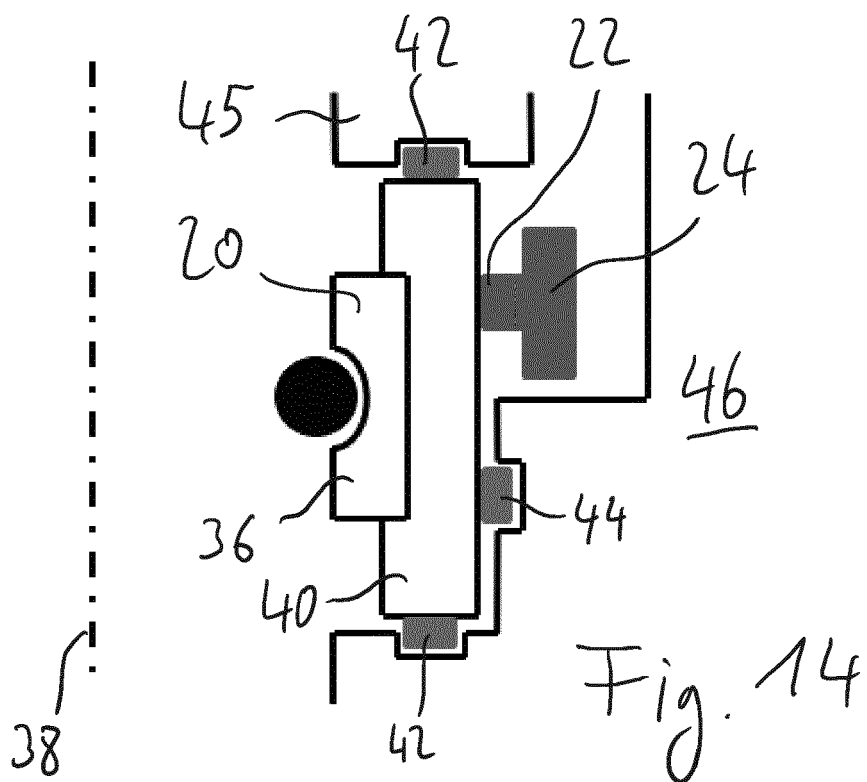


Fig. 13



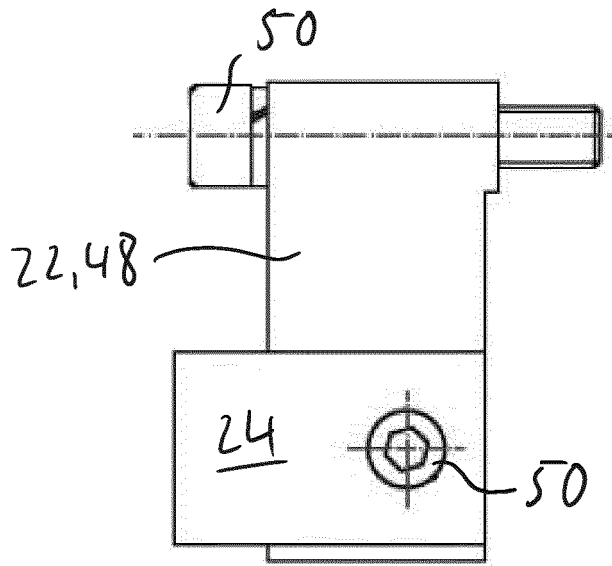


Fig. 16

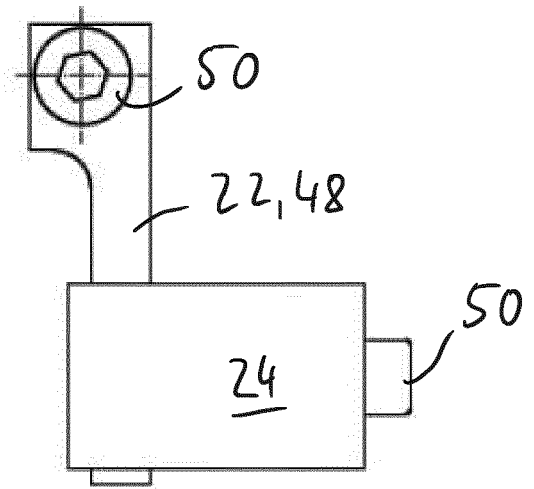


Fig. 17

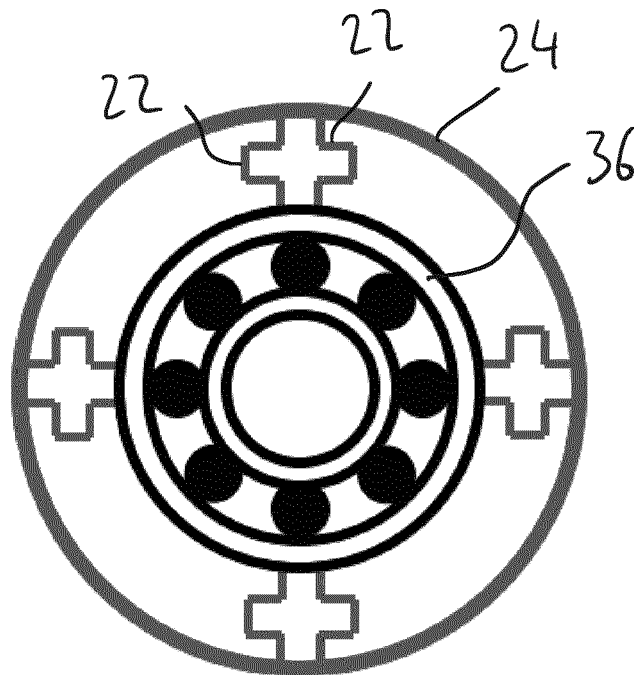


Fig. 18

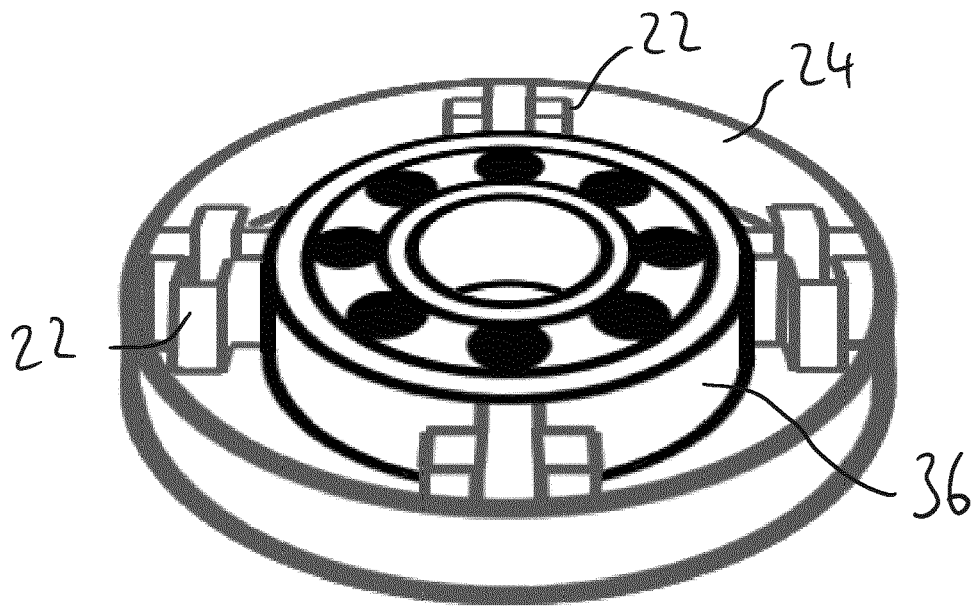


Fig. 19

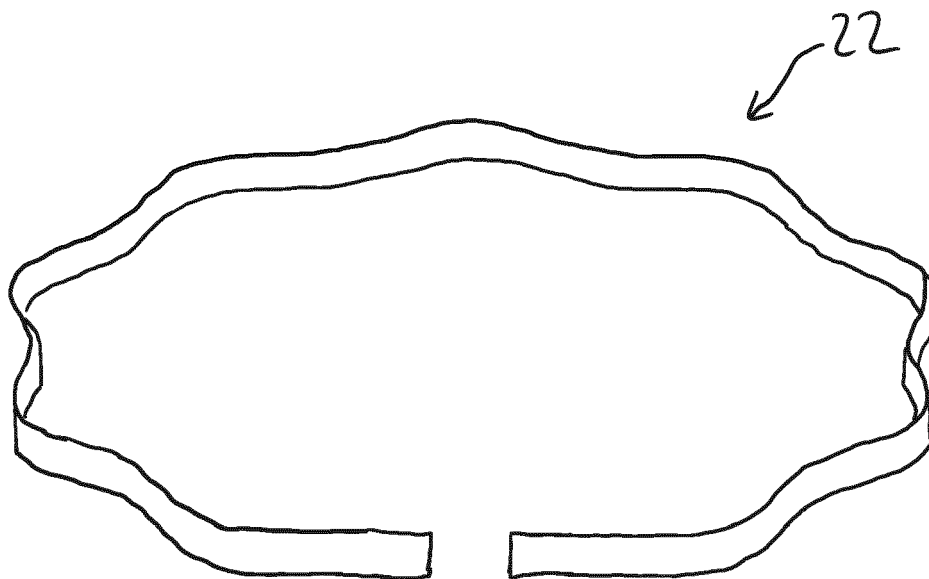


Fig. 20



## EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

 Nummer der Anmeldung  
EP 19 20 2987

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)                          |
| X                                                                                                                                                                                                                                                                                 | EP 0 333 200 A1 (EBARA RES CO LTD [JP]; EBARA CORP [JP])<br>20. September 1989 (1989-09-20) | 1-5,8,9,12,15                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | INV.<br>F04D19/04<br>F04D29/059<br>F04D29/66                |
| A                                                                                                                                                                                                                                                                                 | * Spalte 2, Zeile 29 - Spalte 3, Zeile 19 *                                                 | 6,7,10,11,13,14                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                   | * Spalte 3, Zeile 47 - Spalte 4, Zeile 25 *                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                   | * Abbildungen 2,3 *                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                             |
| X                                                                                                                                                                                                                                                                                 | JP S62 184224 A (EBARA RES CO LTD; EBARA CORP) 12. August 1987 (1987-08-12)                 | 1-13,15                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)<br><br>F04D<br>F04C<br>F04B |
| A                                                                                                                                                                                                                                                                                 | * Zusammenfassung *                                                                         | 14                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                                                             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                   | * Abbildung 1 *                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                             |
| X                                                                                                                                                                                                                                                                                 | EP 1 619 400 A1 (VARIAN SPA [IT])<br>25. Januar 2006 (2006-01-25)                           | 1-10,12-14                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                             |
| A                                                                                                                                                                                                                                                                                 | * Absätze [0034] - [0049] *                                                                 | 11,15                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                   | * Abbildungen 1-4 *                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                             |
| A                                                                                                                                                                                                                                                                                 | DE 10 2004 048866 A1 (LEYBOLD VAKUUM GMBH [DE]) 13. April 2006 (2006-04-13)                 | 1,4,5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                             |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                   | * Absätze [0025], [0026] *                                                                  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                             |
| Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt                                                                                                                                                                                                         |                                                                                             |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                             |
| Recherchenort<br><b>Den Haag</b>                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                                                             | Abschlußdatum der Recherche<br><b>9. April 2020</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Prüfer<br><b>Gombert, Ralf</b>                              |
| KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE<br>X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet<br>Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie<br>A : technologischer Hintergrund<br>O : mündliche Offenbarung<br>P : Zwischenliteratur |                                                                                             | T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze<br>E : älteres Patentdokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist<br>D : in der Anmeldung angeführtes Dokument<br>L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument<br>& : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument |                                                             |

EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

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

EP 19 20 2987

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.

09-04-2020

| 10 | Im Recherchenbericht<br>angeführtes Patentdokument |    | Datum der<br>Veröffentlichung | Mitglied(er) der<br>Patentfamilie |                 | Datum der<br>Veröffentlichung |
|----|----------------------------------------------------|----|-------------------------------|-----------------------------------|-----------------|-------------------------------|
| 15 | EP 0333200                                         | A1 | 20-09-1989                    | DE                                | 68906929 D1     | 15-07-1993                    |
|    |                                                    |    |                               | DE                                | 68906929 T2     | 23-09-1993                    |
|    |                                                    |    |                               | EP                                | 0333200 A1      | 20-09-1989                    |
|    |                                                    |    |                               | JP                                | H0772556 B2     | 02-08-1995                    |
|    |                                                    |    |                               | JP                                | H01240791 A     | 26-09-1989                    |
|    |                                                    |    |                               | US                                | 4946345 A       | 07-08-1990                    |
| 20 | JP S62184224                                       | A  | 12-08-1987                    | JP                                | H0227524 B2     | 18-06-1990                    |
|    |                                                    |    |                               | JP                                | S62184224 A     | 12-08-1987                    |
| 25 | EP 1619400                                         | A1 | 25-01-2006                    | EP                                | 1619400 A1      | 25-01-2006                    |
|    |                                                    |    |                               | JP                                | 2006038222 A    | 09-02-2006                    |
|    |                                                    |    |                               | US                                | 2006018774 A1   | 26-01-2006                    |
| 30 | DE 102004048866                                    | A1 | 13-04-2006                    | AT                                | 495369 T        | 15-01-2011                    |
|    |                                                    |    |                               | CN                                | 101035989 A     | 12-09-2007                    |
|    |                                                    |    |                               | DE                                | 102004048866 A1 | 13-04-2006                    |
|    |                                                    |    |                               | EP                                | 1797335 A1      | 20-06-2007                    |
|    |                                                    |    |                               | JP                                | 2008516139 A    | 15-05-2008                    |
|    |                                                    |    |                               | US                                | 2009202360 A1   | 13-08-2009                    |
| 35 |                                                    |    |                               | WO                                | 2006040287 A1   | 20-04-2006                    |
| 40 |                                                    |    |                               |                                   |                 |                               |
| 45 |                                                    |    |                               |                                   |                 |                               |
| 50 |                                                    |    |                               |                                   |                 |                               |
| 55 |                                                    |    |                               |                                   |                 |                               |

EPO FORM P0461

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