(19) Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

(11) **EP 4 390 145 A2**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
26.06.2024 Patentblatt 2024/26

(21) Anmeldenummer: **24166459.8**

(22) Anmeldetag: **22.12.2022**

(51) Internationale Patentklassifikation (IPC):
F04D 29/32 *(2006.01)*

(52) Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):
F04D 19/04; F04D 19/042; F04D 19/044; F04D 19/046; F04D 29/023; F04D 29/321;
F05D 2300/173

(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 ME MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR

(62) Dokumentnummer(n) der früheren Anmeldung(en) nach Art. 76 EPÜ:
22216232.3 / 4 151 860

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

(72) Erfinder:
- **GILBRICH, Sönke**
  35753 Greifenstein (DE)
- **HOFMANN, Jan**
  35305 Grünberg (DE)
- **KOCI, Bernd**
  35614 Schöffengrund (DE)
- **MEKOTA, Mirko**
  35630 Ehringshausen (DE)
- **WILLE, Thilo**
  57334 Bad Laasphe (DE)
- **SCHWEIGHÖFER, Michael**
  35641 Schöffengrund (DE)
- **STOLL, Tobias**
  35644 Hohenahr (DE)
- **KOCH, Bernhard**
  35619 Braunfels (DE)

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

Bemerkungen:
Diese Anmeldung ist am 26.03.2024 als Teilanmeldung zu der unter INID-Code 62 erwähnten Anmeldung eingereicht worden.

(54) **VAKUUMPUMPE**

(57) Die Erfindung betrifft eine Vakuumpumpe, insbesondere Turbomolekularpumpe, mit einer während des Betriebs um eine Drehachse rotierenden Rotorwelle und mit wenigstens einem auf der Rotorwelle befestigten Rotorbauteil, wobei das Rotorbauteil eine Rotorscheibe ist, die einen radial innen liegenden Bund, über den die Rotorscheibe auf der Rotorwelle befestigt ist, und mehrere Rotorschaufeln umfasst, die jeweils integral mit dem Bund verbunden sind und die sich jeweils ausgehend von einem Schaufelgrund am Bund radial nach außen erstrecken und radial außen ein freies Schaufelende aufweisen, oder wobei das Rotorbauteil ein Holweckbauteil ist, insbesondere eine Holwecknabe oder eine Holweckhülse, und wobei die Rotorscheibe und/oder das Holweckbauteil aus einer Aluminiumlegierung gefertigt sind bzw. ist, die folgende Elemente in Gewichts-% aufweist: Cu: 3,6-4,4; Mg: 1,2-1,4; Mn : 0,5-0,8; Zr: < 0,16; Ti : 0,01-0,05; Si < 0,21; Fe < 0,21; Zn < 0,26; andere Elemente < 0,06; Rest Aluminium.

EP 4 390 145 A2

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Vakuumpumpe, insbesondere Turbomolekularpumpe, mit einer während des Betriebs um eine Drehachse rotierenden Rotorwelle und mit wenigstens einem auf der Rotorwelle befestigten Rotorbauteil.

[0002] Die Pumpwirkung derartiger Vakuumpumpen ergibt sich aus dem Zusammenwirken eines pumpwirksamen oder pumpaktiven Bereiches des Rotorbauteils mit einem pumpwirksamen oder pumpaktiven Bereich eines jeweiligen Statorbauteils. Eine Turbomolekularpumpe beispielsweise weist als Rotorbauteile mehrere Rotorscheiben auf, die jeweils als pumpwirksame Bereiche mehrere Rotorschaufeln umfassen und mit relativ zu einem Gehäuse der Pumpe angeordneten Statorscheiben zusammenwirken. Eine Holweckpumpe umfasst eine oder mehrere Holweckhülsen, die während des Betriebs rotieren und an einer Holwecknabe angebracht sind, die auf der Rotorwelle befestigt ist. Eine Holweckhülse wirkt mit einem oder mehreren Holweckstatoren zusammen, wobei die zylindrische Außenfläche und/oder die zylindrische Innenfläche der Holweckhülse den pumpwirksamen Bereich darstellt, der mit einer oder mehreren Holwecknuten zusammenwirkt, die jeweils als pumpwirksamer Bereich am jeweiligen Holweckstator ausgebildet sind.

[0003] Bekannte Turbomolekularpumpen besitzen häufig nicht nur eine oder mehrere Turbomolekularpumpstufen, sondern zusätzlich eine oder mehrere stromabwärts der zumindest einen Turbomolekularpumpstufe angeordnete Holweckpumpstufen.

[0004] Die Pumpleistung einer Vakuumpumpe bestimmt sich insbesondere durch deren (gasabhängiges) Saugvermögen, welches für ein jeweiliges Gas im Wesentlichen von der Geometrie der Rotor- und Statorbauteile sowie von der Drehzahl der Rotorbauteile abhängig ist, wobei die Drehzahl in der Regel eine für einen jeweiligen Pumpentyp feste Gerätegröße ist, die angibt, bei welcher Drehzahl die Pumpe in einem normalen Betrieb dauerhaft betrieben werden kann. Diese Drehzahl wird im Folgenden auch als Nenndrehzahl bezeichnet.

[0005] Für einen jeweiligen Pumpentyp ist es allerdings nicht möglich, die Pumpleistung durch Erhöhen der Drehzahl beliebig zu vergrößern, da hohe Drehzahlen zu erhöhten Spannungen im Material der Rotorbauteile und aufgrund der höheren Gasreibung auch zu höheren, nicht mehr zulässigen Temperaturen der Rotorbauteile führen. Denn es müssen Bedingungen vermieden werden, bei denen das Material der Rotorbauteile sich während des Betriebs über ein zu tolerierendes Maß hinaus verformt und insbesondere zu fließen beginnt. Höhere Drehzahlen erhöhen zudem die Anforderungen an ein gegebenenfalls für die Lagerung der Rotorwelle verwendetes Wälzlager und dessen Schmierung, insbesondere an das hierfür verwendete Schmieröl. Auch kann die Pumpleistung nicht einfach durch größere Durchmesser der Rotor- und Statorbauteile beliebig gesteigert werden, da dies bei gleichen Drehzahlen höherer Bahngeschwindigkeiten für die radial äußeren Bereiche der Rotorbauteile zur Folge hat, insbesondere für die Schaufelenden der Rotorschaufeln von Rotorscheiben.

[0006] Diese Beschränkungen machen es schwierig bis unmöglich, die Pumpleistung bestehender Vakuumpumpen zu steigern.

[0007] Aufgabe der Erfindung ist es, hier Abhilfe zu schaffen.

[0008] Die Lösung dieser Aufgabe erfolgt jeweils durch die Merkmale der unabhängigen Ansprüche.

[0009] Gemäß einem ersten Aspekt der Erfindung ist vorgesehen, dass das zumindest eine Rotorbauteil der Vakuumpumpe, bei dem es sich entweder um eine Rotorscheibe oder ein Holweckbauteil handelt, aus einer Aluminiumlegierung gefertigt ist, die folgende Elemente in Gewichts-% aufweist:

Cu: 3,6 - 4,4
Mg: 1,2 - 1,4
Mn : 0,5 - 0,8
Zr: < 0,16
Ti : 0,01 - 0,05
Si < 0,21
Fe < 0,21
Zn < 0,26
andere Elemente < 0,06,
Rest Aluminium.

[0010] Diese Aluminiumlegierung wird im Folgenden auch einfach als "die Aluminiumlegierung" oder als "das erfindungsgemäße Material" bezeichnet.

[0011] Es wurde gefunden, dass andere Geometrien, höhere Nenndrehzahlen sowie höhere Rotorbauteil-Temperaturen möglich sind, wenn diejenigen rotierenden Bauteile einer Vakuumpumpe, die als Ganzes oder von denen zumindest relevante Bereiche einen vergleichsweise großen radialen Abstand von der Drehachse der Rotorwelle besitzen, aus der genannten Aluminiumlegierung gefertigt sind.

[0012] Dabei kann vorgesehen sein, dass jedes Rotorbauteil der Vakuumpumpe aus dem erfindungsgemäßen Material gefertigt ist. Dies ist aber nicht zwingend. So ist es beispielsweise möglich, dass alle Rotorscheiben einer Turbomolekularpumpstufe aus der Aluminiumlegierung gefertigt sind, wohingegen die rotierenden Bauteile einer oder mehrerer stromabwärts davon angeordneter Holweckpumpstufe nicht aus dieser Aluminiumlegierung gefertigt sind.

[0013] Auch ist es möglich, nur einige Rotorscheiben einer Turbomolekularpumpstufe oder nur einige rotierende Bauteile einer Holweckpumpstufe aus der Aluminiumlegierung zu fertigen. Bei einer Holweckpumpstufe beispielsweise kann vorgesehen sein, dass die Holwecknabe aus der Aluminiumlegierung gefertigt ist, die oder jede Holweckhülse, die an der Holwecknabe angebracht ist, aber nicht.

[0014] Gemäß weiteren Aspekten der Erfindung wurde

gefunden, dass bestimmte, ein oder mehrere Rotorbauteile betreffende Geometrien, nämlich bestimmte Abmessungen und/oder Abmessungsverhältnisse sowie Kombinationen davon, eine höhere Pumpleistung ermöglichen.

[0015] Gemäß einem Aspekt der Erfindung ist bei einer durch den unabhängigen Anspruch 2 definierten Vakuumpumpe insbesondere vorgesehen, dass die Rotorscheibe einen Rotoraußendurchmesser DA aufweist, der zwischen zwei gedachten einander diametral gegenüberliegenden Schaufelenden gemessen wird, dass die Holwecknabe einen Holweckaußendurchmesser DHW aufweist, der zwischen zwei einander diametral gegenüberliegenden Punkten einer radialen Außenfläche der Holwecknabe gemessen wird, und dass der Rotoraußendurchmesser DA um einen Faktor von mindestens 1,22, bevorzugt von mindestens 1,25, besonders bevorzugt von mindestens 1,30, größer ist als der Holweckaußendurchmesser DHW.

[0016] Dieses Konzept bedeutet eine relative Verkleinerung des Durchmessers der Holwecknabe (und damit des Durchmessers einer am radial äußeren Ende der Holwecknabe angebrachten Holweckhülse) gegenüber dem Rotoraußendurchmesser der Rotorscheibe. Diese Verkleinerung resultiert in einer geringeren Gasreibung in der Holweckpumpstufe, was wiederum eine Erhöhung der Drehzahl und somit eine größere Schaufelendengeschwindigkeit der Rotorscheibe ermöglicht. Es wurde gefunden, dass dieses Konzept insgesamt eine höhere Pumpleistung zur Folge hat.

[0017] Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung ist bei einer durch den unabhängigen Anspruch 3 definierten Vakuumpumpe insbesondere vorgesehen, dass die Rotorscheibe einen Rotoraußendurchmesser DA aufweist, der zwischen zwei gedachten aneinander diametral gegenüberliegenden Schaufelenden gemessen wird, dass die Rotorscheibe einen Bundaußendurchmesser DB aufweist, der zwischen zwei einander diametral gegenüberliegenden Punkten einer radialen Au-ßenfläche des Bundes gemessen wird, dass die Rotorscheibe einen Grundaußendurchmesser DG aufweist, der von Schaufelgrund zu Schaufelgrund von zwei gedachten einander diametral gegenüberliegenden Rotorschaufeln gemessen wird, und dass die Differenz DA - DG um einen Faktor von mindestens 0,94, bevorzugt von mindestens 0,95, besonders bevorzugt von mindestens 0,97, größer ist als die Differenz DA - DB.

[0018] Dieses Konzept bedeutet - im Vergleich zu bekannten Rotorscheiben - eine Vergrößerung des Anteils des pumpwirksamen Bereiches einer jeweiligen Rotorschaufel, der ausgehend vom Schaufelgrund gemessen wird, an der ausgehend vom Bund gemessenen Schaufellänge. Hierdurch lässt sich der Anteil der pumpwirksame Länge einer jeweiligen Rotorschaufel vergrößern und damit insgesamt die Pumpleistung der Vakuumpumpe steigern.

[0019] Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung ist bei einer durch den unabhängigen Anspruch 4 definierten Vakuumpumpe insbesondere vorgesehen, dass die Rotorscheibe einen Grundaußendurchmesser DG aufweist, der von Schaufelgrund zu Schaufelgrund von zwei gedachten einander diametral gegenüberliegenden Rotorschaufeln gemessen wird, dass die Rotorwelle einen Wellenaußendurchmesser DI aufweist, und dass DG um einen Faktor von maximal 1,20, bevorzugt von maximal 1,15, besonders bevorzugt von maximal 1,10, größer ist als DI.

[0020] Dieses Konzept führt zu einer relativen Reduzierung desjenigen - bezogen auf die radiale Richtung - Anteils der Rotorscheibe, der keine oder allenfalls nur eine vergleichsweise sehr geringe Pumpwirksamkeit besitzt.

[0021] Der Wellenaußendurchmesser DI entspricht dem Innendurchmesser des Bundes der Rotorscheibe.

[0022] Vorzugsweise handelt es sich bei den Rotorscheiben jeweils um ein einstückiges Bauteil, welches durch Fräsen und/oder Sägen aus einem Ausgangsmaterial hergestellt wird.

[0023] Vorteilhafte Weiterbildungen der einzelnen Aspekte der Erfindung sind in den abhängigen Ansprüchen, der nachfolgenden Beschreibung sowie der Zeichnung angegeben. Alle Weiterbildungen beziehen sich, sofern nicht anders angegeben, auf alle genannten Aspekte der Erfindung, d.h. alle Aspekte und Weiterbildungen können untereinander kombiniert werden, sofern nichts anderes angegeben ist oder Kombinationen ersichtlich ausgeschlossen sind.

[0024] Bei den erfindungsgemäßen Vakuumpumpen gemäß den unabhängigen Ansprüchen 2, 3 und 4 lässt sich eine besonders ausgeprägte Steigerung der Pumpleistung erzielen, wenn das jeweilige Rotorbauteil oder die jeweiligen Rotorbauteile aus der Aluminiumlegierung gefertigt ist bzw. sind. Dieses Material erlaubt bei ansonsten gleichen Bedingungen höhere Drehzahlen, ohne dass die im Einleitungsteil erwähnten Probleme aufgrund zu hoher Spannungen im Material der Rotorbauteile und/oder aufgrund zu hoher Temperaturen der Rotorbauteile entstehen.

[0025] Bei einigen Ausführungsbeispielen der Erfindung kann vorgesehen sein, dass die Rotorscheibe einen Rotoraußendurchmesser DA aufweist, der größer als 5,0 cm ist, vorzugsweise in einem Bereich von 5,0 cm bis 60 cm liegt, wobei der Rotoraußendurchmesser DA zwischen zwei gedachten einander diametral gegenüberliegenden Schaufelenden gemessen wird.

[0026] Gemäß einigen Weiterbildungen der Erfindung kann vorgesehen sein, dass die Rotorscheibe einen Rotoraußendurchmesser DA aufweist, der zwischen zwei gedachten einander diametral gegenüberliegenden Schaufelenden gemessen wird, wobei die Holwecknabe einen Holweckaußendurchmesser DHW aufweist, der zwischen zwei einander diametral gegenüberliegenden Punkten einer radialen Außenfläche der Holwecknabe gemessen wird, und wobei der Rotoraußendurchmesser DA mindestens 135 mm und der Holweckaußendurchmesser DHW mindestens 108 mm oder der Rotoraußen-

durchmesser DA 120 mm und der Holweckaußendurchmesser DHW 99 mm beträgt.

[0027] Gemäß manchen Ausführungsbeispielen kann vorgesehen sein, dass die Rotorscheibe einen Rotoraußendurchmesser DA aufweist, der zwischen zwei gedachten einander diametral gegenüberliegenden Schaufelenden gemessen wird, und dass die Vakuumpumpe eine zweite Holwecknabe umfasst, die einen Holweckaußendurchmesser DHW aufweist, der zwischen zwei einander diametral gegenüberliegenden Punkten einer radialen Außenfläche der zweiten Holwecknabe gemessen wird, wobei der Holweckaußendurchmesser DHW2 der zweiten Holwecknabe mindestens 91 mm beträgt, und/oder wobei der Rotoraußendurchmesser DA um einen Faktor von mindestens 1,40, vorzugsweise von mindestens 1,48, größer ist als der Holweckaußendurchmesser DHW2 der zweiten Holwecknabe.

[0028] Für die Rotorwelle kann eine Magnetlagerung oder eine Hybridlagerung vorgesehen sein. Wenn eine Hybridlagerung vorgesehen ist, dann ist hochvakuumseitig ein Permanentmagnetlager und vorvakuumseitig ein Wälzlager vorgesehen. Der Aufbau und die Anordnung von Magnetlagern und Wälzlagern für Rotorwellen von Vakuumpumpen sind dem Fachmann grundsätzlich bekannt, sodass hierauf nicht näher eingegangen zu werden braucht. Diesbezüglich wird auch auf das anhand der Fig. 1 bis 5 beschriebene Ausführungsbeispiel einer Turbomolekularpumpe verwiesen.

[0029] An anderer Stelle wurde bereits erwähnt, dass es möglich ist, dass alle Rotorscheiben einer Turbomolekularpumpstufe aus der durch den unabhängigen Anspruch 1 definierten Aluminiumlegierung gefertigt sind, dass dies aber nicht zwingend ist.

[0030] Anders ausgedrückt kann bei manchen Ausführungsbeispielen der Erfindung vorgesehen sein, dass auf der Rotorwelle mehrere Rotorscheiben befestigt sind, wobei wenigstens zwei Rotorscheiben sich hinsichtlich des Materials, aus dem sie gefertigt sind, voneinander unterscheiden. Dabei kann vorgesehen sein, dass zumindest eine der Rotorscheiben aus der Aluminiumlegierung gefertigt ist.

[0031] Gemäß manchen Weiterbildungen kann hierbei vorgesehen sein, dass eine oder mehrere hochvakuumseitige Rotorscheiben aus der Aluminiumlegierung gefertigt sind, wohingegen eine oder mehrere vorvakuumseitige Rotorscheiben aus einem anderen Material gefertigt sind. Anders ausgedrückt ist hierbei somit vorgesehen, dass die erfindungsgemäße Aluminiumlegierung nicht für alle Rotorscheiben, sondern lediglich für einen hochvakuumseitigen Teil der Rotorscheiben verwendet wird.

[0032] Bei einigen Ausführungsbeispielen der Erfindung kann vorgesehen sein, dass die Holweckhülse und/oder die Holwecknabe einen Außendurchmesser DHH bzw. DHW aufweist bzw. aufweisen, der zwischen zwei einander diametral gegenüberliegenden Punkten einer radialen Außenfläche der Holweckhülse bzw. der Holwecknabe gemessen wird und der im Bereich von 5,0 cm bis 60 cm liegt.

[0033] Gemäß manchen Weiterbildungen der Erfindung kann das Rotorbauteil einen Außendurchmesser größer als 10 cm, bevorzugt größer als 15 cm, insbesondere bevorzugt größer als 20 cm, aufweisen, wobei der Außendurchmesser zwischen zwei einander diametral gegenüberliegenden Punkten gemessen wird, die jeweils auf einer radialen Außenfläche des Rotorbauteils liegen.

[0034] Gemäß weiteren Ausführungsbeispielen kann vorgesehen sein, dass der Bund der Rotorscheibe und/oder die Holwecknabe eine axiale Höhe im Bereich von 3,0 mm bis 5,9 mm, insbesondere bis 5,49 mm, aufweisen bzw. aufweist.

[0035] Die Rotorschaufeln können gemäß einigen Weiterbildungen der Erfindung jeweils eine Schaufeldicke im Bereich von 0,125 mm bis 2,9 mm aufweisen, wenn die Schaufeldicke - in radialer Richtung gesehen - in der Mitte zwischen dem Schaufelgrund und dem Schaufelende gemessen wird.

[0036] In manchen Ausführungsbeispielen kann vorgesehen sein, dass die Rotorschaufeln jeweils am Schaufelgrund eine Dicke von weniger als 9,8 mm insbesondere weniger als 9,0 mm, aufweist.

[0037] Die Schaufeldicke an einer jeweiligen Stelle - in radialer Richtung gesehen - ist im Rahmen der vorliegenden Offenbarung definiert als der kleinste Durchmesser einer Schnittfläche der Rotorschaufel in einer senkrecht zur radialen Richtung verlaufenden Schnittebene.

[0038] Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung betrifft diese ein Verfahren zum Betreiben einer Vakuumpumpe, insbesondere einer Vakuumpumpe wie hierin offenbart, wobei die Vakuumpumpe eine während des Betriebs um eine Drehachse rotierende Rotorwelle und wenigstens ein auf der Rotorwelle befestigtes Rotorbauteil umfasst, wobei bei dem Verfahren die Vakuumpumpe mit einer Drehzahl der Rotorwelle derart betrieben wird, dass die maximal zulässige Temperatur des Rotorbauteils größer 90°C, insbesondere größer oder gleich 98°C, besonders bevorzugt größer oder gleich 120°C, ist.

[0039] Insbesondere handelt es sich bei dem Rotorbauteil um eine Rotorscheibe, die einen radial innen liegenden Bund, über den die Rotorscheibe auf der Rotorwelle befestigt ist, und mehrere Rotorschaufeln umfasst, die jeweils integral mit dem Bund verbunden sind und die sich ausgehend von einem Schaufelgrund am Bund radial nach außen erstrecken und radial außen ein freies Schaufelende aufweisen, oder um ein Holweckbauteil, insbesondere eine Holwecknabe oder eine Holweckhülse.

[0040] Eine maximal zulässige Temperatur der Rotorbauteile von mehr als 90°C ermöglicht einen bestimmungsgemäßen Betrieb der Vakuumpumpe mit einer höheren Nenndrehzahl als bei bekannten Vakuumpumpen, bei denen die maximal zulässige Temperatur der Rotorbauteile auf 90°C beschränkt ist. Durch die höhere Drehzahl kann eine Steigerung der Pumpleistung erreicht werden.

[0041] Es wurde gefunden, dass die Aluminiumlegierung, die durch den unabhängigen Anspruch 1 definiert ist, ein Material ist, das für Rotorbauteile von Vakuumpumpen, insbesondere für Rotorscheiben und/oder Holweckbauteile, maximal zulässige Temperaturen von mehr als 90°C ermöglicht, ohne dass die vorstehend genannten Probleme entstehen.

[0042] Gemäß einigen Ausführungsbeispielen des erfindungsgemäßen Verfahrens kann vorgesehen sein, dass die Vakuumpumpe mit einer Drehzahl der Rotorwelle derart betrieben wird, dass die Schaufelendengeschwindigkeit der Rotorscheibe mehr als 420 m/s, bevorzugt mehr als 438 m/s, insbesondere bevorzugt mehr als 464 m/s, beträgt.

[0043] Bei bekannten Vakuumpumpen ist die Schaufelendengeschwindigkeit der Rotorscheibe, also die Bahngeschwindigkeit der Schaufelenden während des Betriebs bei mit der Nenndrehzahl rotierender Rotorwelle, auf maximal 420m/s beschränkt.

[0044] Durch die höhere Nenndrehzahl kann die Pumpleistung der Vakuumpumpe gesteigert werden.

[0045] Gemäß einigen Ausführungsbeispielen der Erfindung kann vorgesehen sein, dass die Vakuumpumpe mit einer Drehzahl der Rotorwelle betrieben wird, die mehr als 59.000 Umdrehungen pro Minute, bevorzugt mehr als 100.000 Umdrehungen pro Minute, besonders bevorzugt mehr als 150.000 Umdrehungen pro Minute, beträgt.

[0046] In einigen Weiterbildungen der Erfindung, und zwar sowohl der erfindungsgemä-ßen Vakuumpumpen gemäß den einzelnen genannten Aspekten als auch des erfindungsgemäßen Verfahrens, kann vorgesehen sein, dass die Rotorwelle vorvakuumseitig durch ein Wälzlager gelagert ist, das mit einem Öl geschmiert ist, bei dem es sich um ein synthetisches Öl handelt, welches eine kinematische Viskosität im Bereich von 4,5 bis 6,5 mm^2/s bei 100°C aufweist (Viskosität gemessen gemäß ASTM D445 - 17a). Ein bevorzugtes Beispiel für ein derartiges Öl ist das Öl mit der Bezeichnung "AeroShell Turbine Oil 560". Hinsichtlich weiterer Eigenschaften und möglicher Ausgestaltungen eines synthetischen Öls mit den vorstehend genannten Viskositätseigenschaften wird auf die am 13. Mai 2020 veröffentlichte europäische Patentanmeldung EP 3 650 702 A1 verwiesen, deren Inhalt hiermit zur Spezifizierung des genannten synthetischen Öls durch Bezugnahme aufgenommen wird.

[0047] Die Erfindung wird im Folgenden beispielhaft unter Bezugnahme auf die Zeichnung beschrieben. Es zeigen:

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 Schnittlinie A-A,

Fig. 4 eine Querschnittsansicht der Turbomolekularpumpe längs der in Fig. 2 gezeigten Schnittlinie B-B,

Fig. 5 eine Querschnittsansicht der Turbomolekularpumpe längs der in Fig. 2 gezeigten Schnittlinie C-C,

Fig. 6 einen Schnitt durch einen Teil einer Turbomolekularpumpe zur Veranschaulichung eines erfindungsgemäßen Abmessungsverhältnisses,

Fig. 7 eine Schnittansicht einer auf einer Rotorwelle befestigten Rotorscheibe zur Veranschaulichung erfindungsgemäßer Abmessungen bzw. Abmessungsverhältnisse, und

Fig. 8 einen Schnitt durch eine Rotorschaufel zur Veranschaulichung einer erfindungsgemäßen Abmessung.

[0048] 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.

[0049] 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 Stromversorgungsanschluss 131 am Elektronikgehäuse 123 angeordnet.

[0050] Es existieren auch Turbomolekularpumpen, die kein derartiges angebrachtes Elektronikgehäuse aufweisen, sondern an eine externe Antriebselektronik angeschlossen werden.

[0051] 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 Turbomolekularvakuumpumpen (nicht dargestellt) werden ausschließlich mit Luftkühlung betrieben.

[0052] 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.

[0053] Andere existierende Turbomolekularvakuumpumpen (nicht dargestellt), die insbesondere größer sind als die hier dargestellte Pumpe, können nicht stehend betrieben werden.

[0054] 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.

[0055] 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 Turbomolekularvakuumpumpen (nicht dargestellt), die insbesondere größer sind als die hier dargestellte Pumpe, nicht möglich.

[0056] In den Figuren 2 bis 5 ist eine Kühlmittelleitung 148 dargestellt, in welcher das über die Kühlmittelanschlüsse 139 ein- und ausgeleitete Kühlmittel zirkulieren kann.

[0057] 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.

[0058] In dem Gehäuse 119 ist ein Rotor 149 angeordnet, der eine um eine Rotationsachse 151 drehbare Rotorwelle 153 aufweist.

[0059] 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.

[0060] Die Vakuumpumpe umfasst außerdem in radialer Richtung ineinander angeordnete und pumpwirksam miteinander in Serie geschaltete Holweck-Pumpstufen. Es existieren andere Turbomolekularvakuumpumpen (nicht dargestellt), die keine Holweck-Pumpstufen aufweisen.

[0061] 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.

[0062] 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.

[0063] 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 innen liegenden Holweck-Spalt 175 verbunden ist. Dadurch werden die ineinander geschachtelten Holweck-Pumpstufen in Serie miteinander geschaltet. Am unteren Ende der radial innen liegenden Holweck-Rotorhülse 165 kann ferner ein Verbindungskanal 179 zum Auslass 117 vorgesehen sein.

[0064] 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.

[0065] 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.

[0066] 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 Turbomolekularvakuumpumpen (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.

[0067] Der Betriebsmittelspeicher umfasst mehrere aufeinander gestapelte saugfähige Scheiben 187, die mit einem Betriebsmittel für das Wälzlager 181, z.B. mit einem Schmiermittel, getränkt sind.

[0068] 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 größer 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.

[0069] 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.

[0070] 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.

[0071] 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.

[0072] 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.

[0073] 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.

[0074] Nachstehend werden anhand der Fig. 6 bis 8 einzelne Aspekte und Ausführungsbeispiele, insbeson-

dere bestimmte Abmessungen bzw. Abmessungsverhältnisse, einer erfindungsgemäßen Vakuumpumpe erläutert, die einzeln oder in beliebiger Kombination in einer Turbomolekularpumpe verwirklicht sein können, beispielsweise in einer Turbomolekularpumpe, wie sie zuvor anhand der Fig. 1 bis 5 beschrieben worden ist. Mit anderen Worten kann eine Turbomolekularpumpe, wie sie anhand der Fig. 1 bis 5 beschrieben worden ist, in erfindungsgemäßer Weise ausgebildet sein und insbesondere eine oder mehrere der Abmessungen und/oder eines oder mehrere der Abmessungsverhältnisse aufweisen, wie sie anhand der Fig. 6 bis 8 erläutert werden. Dabei dienen die Fig. 6 bis 8 lediglich zur Veranschaulichung der Abmessungen bzw. Abmessungsverhältnisse, sind insofern also nicht maßstabsgerecht.

[0075] Die Turbomolekularpumpe gemäß Fig. 6 umfasst eine Turbomolekularpumpstufe und eine Holweckpumpstufe. Mehrere Rotorscheiben 15 sind auf einer Rotorwelle 13 befestigt, die während des Betriebs um eine Drehachse 11 rotiert und vorvakuumseitig in einem Wälzlager 37 gelagert ist. Die Schmierung des Wälzlagers kann durch ein synthetisches Öl erfolgen, wie es im Einleitungsteil der vorliegenden Offenbarung beschrieben worden ist.

[0076] Auf der Rotorwelle 13 ist außerdem eine Holwecknabe 17 befestigt, die radial au-ßen eine zylindrische Holweckhülse 18 trägt. Die radiale Außenfläche der Holwecknabe 17 liegt auf dem gleichen Radius wie die radial äußere Mantelfläche der Holweckhülse 18, nämlich auf einem Radius von 1/2 * DHW, d.h. der Außendurchmesser der Holwecknabe 17 beträgt DHW.

[0077] Die radial äußeren Enden 25 der Rotorschaufeln 21 liegen auf einem Radius von 1/2 * DA, d.h. die Rotorscheiben 15 besitzen einen Außendurchmesser DA.

[0078] Wie im Einleitungsteil der vorliegenden Offenbarung ausgeführt, beträgt gemäß einem Aspekt der Erfindung das Verhältnis DA/DHW mindestens 1,22.

[0079] Zur Erzielung einer Pumpwirkung wirken die Rotorschaufeln 21 einer jeweiligen Rotorscheibe 15 mit Statorschaufeln einer jeweiligen Statorscheibe 29 zusammen. Die Statorscheiben 29 sind in einer dem Fachmann grundsätzlich bekannten Weise innerhalb eines Gehäuses 27 der Turbomolekularpumpe befestigt. Die Holweckhülse 18 wirkt zur Erzielung einer Pumpwirkung mit einem radial äußeren Holweckstator 31 sowie mit einem radial inneren Holweckstator 33 zusammen, die jeweils mit einer der jeweiligen Mantelfläche der Holweckhülse 18 zugewandten Holwecknutanordnung versehen sind. Ein solcher Aufbau von einzelnen, in Strömungsrichtung des zu pumpenden Gases hintereinander angeordneten Holweck-pumpstufen, die jeweils einen Holweckstator und eine gegenüberliegende Mantelfläche einer Holweckhülse umfassen und auch als radial ineinander liegende oder verschachtelte Holweckstufen bezeichnet werden, ist dem Fachmann grundsätzlich bekannt.

[0080] In einer weiteren Ausgestaltung dieses Ausführungsbeispiels der Erfindung können die Rotorscheiben 15 und die Holwecknabe 17 aus der Aluminiumlegierung gefertigt sein. Grundsätzlich ist es auch möglich, die Holweckhülse 18 aus dieser Aluminiumlegierung zu fertigen. Alternativ kann die Holweckhülse 18 aus einem anderen Material bestehen, beispielsweise einem kohlenfaserverstärkten Kunststoff (CFK), wie er für die Herstellung von Holweckhülsen dem Fachmann grundsätzlich bekannt ist.

[0081] Fig. 7 zeigt eine Rotorscheibe 15, die auf einer Rotorwelle 13 einer Turbomolekularpumpe befestigt ist. Die Rotorwelle 13 trägt ein hochvakuumseitiges Magnetlager 35, von dem in Fig. 7 zwei Permanentmagnetringe gezeigt sind. Die hochvakuumseitige Magnetlagerung einer Rotorwelle 13 einer Turbomolekularpumpe ist dem Fachmann grundsätzlich bekannt, so dass hierauf nicht näher eingegangen zu werden braucht. Diesbezüglich wird auch auf die Beschreibung einer Turbomolekularpumpe anhand der Fig. 1 bis 5 verwiesen.

[0082] Die Rotorscheibe 15 ist ein einstückiges Bauteil, das durch Fräsen und/oder Sägen aus einem Ausgangsmaterial gefertigt wird. Bei diesem Material handelt es sich vorzugsweise um die Aluminiumlegierung. Dieses Material ist für die Rotorscheibe 15 aber nicht zwingend. Die nachstehend näher erläuterten Abmessungen und Abmessungsverhältnisse können auch an Rotorscheiben 15 verwirklicht sein, die nicht aus dieser Aluminiumlegierung gefertigt sind.

[0083] Die Rotorscheibe 15 umfasst einen radial innen liegenden, hohlzylindrischen Bund 19, über den die Rotorscheibe 15 auf der Rotorwelle 13 befestigt ist. Außerdem besitzt die Rotorscheibe 15 eine Mehrzahl von Rotorschaufeln 21, die jeweils integral mit dem Bund 19 verbunden sind und die sich jeweils ausgehend von einem Schaufelgrund 23 am Bund 19 radial nach außen erstrecken und radial außen ein freies Schaufelende 25 aufweisen. Ein jeweiliger Schaufelgrund 23 liegt auf einem größeren Radius - bezogen auf die Mittelachse des hohlzylindrischen Bundes 19, die im auf der Rotorwelle 13 befestigten Zustand mit der Drehachse 11 der Rotorwelle 13 zusammenfällt - als die radiale Außenfläche des Bundes 19. Der Außendurchmesser DB des Bundes 19, der zwischen zwei einander diametral gegenüberliegenden Punkten der radialen Außenfläche des Bundes 19 gemessen wird, ist folglich kleiner als der Grundaußendurchmesser DG der von Schaufelgrund 23 zu Schaufelgrund 23 von zwei gedachten einander diametral gegenüberliegenden Rotorschaufeln 21 gemessen wird.

[0084] Ferner besitzt die Rotorscheibe 15 einen Rotoraußendurchmesser DA, der zwischen zwei gedachten einander diametral gegenüberliegenden Schaufelenden 25 gemessen wird.

[0085] Die Rotorwelle 13 besitzt einen Wellenaußendurchmesser DI, der dem Innendurchmesser des Bundes 19 der Rotorscheibe 15 entspricht.

[0086] Wie im Einleitungsteil ausgeführt, repräsentiert die jeweils vom Schaufelgrund 23 bis zum Schaufelende 25 gemessene radiale Länge einer jeweiligen Rotor-

schaufel 21 den pumpwirksamen Anteil der Gesamtlänge der Rotorschaufel 21, die vom Bund 19 bis zum Schaufelende 25 gemessen wird.

[0087] Gemäß einem Aspekt der Erfindung beträgt das Verhältnis (DA - DG)/(DA - DB) mindestens 0,94, bevorzugt mindestens 0,95, besonders bevorzugt 0,97.

[0088] Rotorscheiben 15 mit einem derartigen Abmessungsverhältnis lassen sich mit relativ hohen Drehzahlen insbesondere dann betreiben, wenn sie aus der Aluminiumlegierung gefertigt sind. Dies führt zu einer besonders ausgeprägten Steigerung der Pumpleistung der betreffenden Vakuumpumpe.

[0089] Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung, der mit dem vorstehend beschriebenen Aspekt der Erfindung kombiniert werden kann, ist bei einer erfindungsgemäßen Turbomolekularpumpe der Grundaußendurchmesser DG um einen Faktor von maximal 1,20, bevorzugt von maximal 1,15, besonders bevorzugt von maximal 1,10, größer als der Wellenaußendurchmesser DI. Wie bereits erwähnt, entspricht der Wellenaußendurchmesser DI dem Innendurchmesser des Bundes 19 der Rotorscheibe 15. Bezogen auf den Außendurchmesser DI der Rotorwelle 13 ist der erfindungsgemäße Bund 19 der Rotorscheibe 15 somit vergleichsweise dünn.

[0090] Rotorscheiben 15 mit einem derart bemessenen Bund 19 können dann mit relativ hohen Drehzahlen betrieben werden, wenn sie aus der Aluminiumlegierung gefertigt sind.

[0091] Die axiale Höhe h des Bundes 19 der Rotorscheibe 15 liegt vorzugsweise in einem Bereich von 3,0 mm bis 5,9 mm, insbesondere bis 5,49 mm.

[0092] Bevorzugte Ausgestaltungen der Rotorschaufeln 21 betreffen deren Schaufeldicke. Fig. 8 veranschaulicht, wie die Schaufeldicke im Rahmen der vorliegenden Offenbarung definiert ist. Dementsprechend ist an einer jeweiligen radialen Stelle einer Rotorschaufel 21 die Schaufeldicke dG der kleinste Durchmesser einer Schnittfläche der Rotorschaufel 21, die an der radialen Stelle durch einen senkrecht zur radialen Richtung verlaufenden Schnitt durch die Rotorschaufel 21 erhalten wird.

[0093] In einer bevorzugten Ausgestaltung beträgt die Schaufeldicke dG am Schaufelgrund 23 (vgl. Fig. 7) weniger als 9,8 mm, insbesondere weniger als 9,0 mm.

[0094] In der Mitte zwischen dem Schaufelgrund 23 und dem Schaufelende 25 (in radialer Richtung gesehen) liegt die Schaufeldicke dG vorzugsweise im Bereich von 0,125 mm und 2,9 mm.

[0095] Rotorscheiben 15, deren Rotorschaufeln 21 an einer oder beiden dieser radialen Stellen die jeweils genannte Schaufeldicke dG aufweisen, können mit vergleichsweise hohen Drehzahlen betrieben werden, wenn die Rotorscheiben 15 aus der Aluminiumlegierung gefertigt sind.

Bezugszeichenliste

[0096]

11	Drehachse
13	Rotorwelle
15	Rotorscheibe
17	Holwecknabe
18	Holweckhülse
19	Bund
21	Rotorschaufel
23	Schaufelgrund
25	Schaufelende
27	Gehäuse
29	Statorscheibe
31	Holweckstator
33	Holweckstator
35	Magnetlager
37	Wälzlager

DHH	Außendurchmesser Holweckhülse
DHW	Außendurchmesser Holwecknabe
DI	Wellenaußendurchmesser
DA	Rotoraußendurchmesser
DB	Bundaußendurchmesser
DG	Grundaußendurchmesser
dG	Dicke der Rotorschaufel
h	axiale Höhe

Patentansprüche

1. Vakuumpumpe, insbesondere Turbomolekularpumpe, mit einer während des Betriebs um eine Drehachse (11) rotierenden Rotorwelle (13) und mit wenigstens einem auf der Rotorwelle (13) befestigten Rotorbauteil (15, 17, 18),

   wobei das Rotorbauteil eine Rotorscheibe (15) ist, die einen radial innen liegenden Bund (19), über den die Rotorscheibe (15) auf der Rotorwelle (13) befestigt ist, und mehrere Rotorschaufeln (21) umfasst, die jeweils integral mit dem Bund (19) verbunden sind und die sich jeweils ausgehend von einem Schaufelgrund (23) am Bund (19) radial nach außen erstrecken und radial außen ein freies Schaufelende (25) aufweisen, oder
   wobei das Rotorbauteil ein Holweckbauteil ist, insbesondere eine Holwecknabe (17) oder eine Holweckhülse (18), und
   wobei die Rotorscheibe (15) und/oder das Holweckbauteil (17, 18) aus einer Aluminiumlegierung gefertigt sind bzw. ist, die folgende Elemente in Gewichts-% aufweist:

   Cu: 3,6 - 4,4
   Mg: 1,2 - 1,4
   Mn : 0,5 - 0,8
   Zr: < 0,16
   Ti : 0,01 - 0,05
   Si < 0,21

Fe < 0,21
Zn < 0,26
andere Elemente < 0,06,
Rest Aluminium.

2. Vakuumpumpe, insbesondere Turbomolekularpumpe,

mit einer während des Betriebs um eine Drehachse (11) rotierenden Rotorwelle (13),
mit wenigstens einer auf der Rotorwelle (13) befestigten Rotorscheibe (15), die einen radial innen liegenden Bund (19), über den die Rotorscheibe (15) auf der Rotorwelle (13) befestigt ist, und mehrere Rotorschaufeln (21) umfasst, die jeweils integral mit dem Bund (19) verbunden sind und die sich jeweils ausgehend von einem Schaufelgrund (23) am Bund (19) radial nach außen erstrecken und radial außen ein freies Schaufelende (25) aufweisen, und
mit wenigstens einer auf der Rotorwelle (13) befestigten Holwecknabe (17), an der zumindest eine Holweckhülse (18) befestigt ist,
wobei die Rotorscheibe (15) einen Rotoraußendurchmesser DA aufweist, der zwischen zwei gedachten einander diametral gegenüberliegenden Schaufelenden (25) gemessen wird,
wobei die Holwecknabe (17) einen Holweckaußendurchmesser DHW aufweist, der zwischen zwei einander diametral gegenüberliegenden Punkten einer radialen Außenfläche der Holwecknabe (17) gemessen wird, und
wobei der Rotoraußendurchmesser DA um einen Faktor von mindestens 1,22, bevorzugt von mindestens 1,25, besonders bevorzugt von mindestens 1,30, größer ist als der Holweckaußendurchmesser DHW.

3. Vakuumpumpe, insbesondere Turbomolekularpumpe,

mit einer während des Betriebs um eine Drehachse (11) rotierenden Rotorwelle (13), und
mit wenigstens einer auf der Rotorwelle (13) befestigten Rotorscheibe (15), die einen radial innen liegenden Bund (19), über den die Rotorscheibe (15) auf der Rotorwelle (13) befestigt ist, und mehrere Rotorschaufeln (21) umfasst, die jeweils integral mit dem Bund (19) verbunden sind und die sich jeweils ausgehend von einem Schaufelgrund (23) am Bund (19) radial nach außen erstrecken und radial außen ein freies Schaufelende (25) aufweisen, wobei die Rotorscheibe (15) einen Rotoraußendurchmesser DA aufweist, der zwischen zwei gedachten einander diametral gegenüberliegenden Schaufelenden (25) gemessen wird,
wobei die Rotorscheibe (15) einen Bundaußendurchmesser DB aufweist, der zwischen zwei einander diametral gegenüberliegenden Punkten einer radialen Außenfläche des Bundes (19) gemessen wird,
wobei die Rotorscheibe (15) einen Grundaußendurchmesser DG aufweist, der von Schaufelgrund (23) zu Schaufelgrund (23) von zwei gedachten einander diametral gegenüberliegenden Rotorschaufeln (21) gemessen wird,
wobei DA - DG um einen Faktor von mindestens 0,94, bevorzugt von mindestens 0,95, besonders bevorzugt von mindestens 0,97, größer ist als DA - DB.

4. Vakuumpumpe, insbesondere Turbomolekularpumpe,

mit einer während des Betriebs um eine Drehachse (11) rotierenden Rotorwelle (13),
mit wenigstens einer auf der Rotorwelle (13) befestigten Rotorscheibe (15), die einen radial innen liegenden Bund (19), über den die Rotorscheibe (15) auf der Rotorwelle (13) befestigt ist, und mehrere Rotorschaufeln (21) umfasst, die jeweils integral mit dem Bund (19) verbunden sind und die sich jeweils ausgehend von einem Schaufelgrund (23) am Bund (19) radial nach außen erstrecken und radial außen ein freies Schaufelende (25) aufweisen, wobei die Rotorscheibe (15) einen Grundaußendurchmesser DG aufweist, der von Schaufelgrund (23) zu Schaufelgrund (23) von zwei gedachten einander diametral gegenüberliegenden Rotorschaufeln (21) gemessen wird, wobei die Rotorwelle (13) einen Wellenaußendurchmesser DI aufweist, und wobei DG um einen Faktor von maximal 1,20, bevorzugt von maximal 1,15, besonders bevorzugt von maximal 1,10, größer ist als DI.

5. Vakuumpumpe nach einem der Ansprüche 2 bis 4, wobei die Rotorscheibe (15) und/oder die Holwecknabe (17) und/oder die Holweckhülse (18) aus einer Aluminiumlegierung gefertigt sind bzw. ist, die folgende Zusammensetzung in Gewichts-% aufweist:

Cu: 3,6 - 4,4
Mg: 1,2 - 1,4
Mn : 0,5 - 0,8
Zr: < 0,16
Ti : 0,01 - 0,05
Si < 0,21
Fe < 0,21
Zn < 0,26
andere Elemente < 0,06,
Rest Aluminium.

6. Vakuumpumpe nach einem der vorhergehenden

Ansprüche,
wobei die Rotorscheibe (15) einen Rotoraußendurchmesser DA aufweist, der größer als 5,0 cm ist, vorzugsweise in einem Bereich von 5,0 cm bis 60 cm liegt, wobei der Rotoraußendurchmesser DA zwischen zwei gedachten einander diametral gegenüberliegenden Schaufelenden (25) gemessen wird.

7. Vakuumpumpe nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

wobei die Rotorscheibe (15) einen Rotoraußendurchmesser DA aufweist, der zwischen zwei gedachten einander diametral gegenüberliegenden Schaufelenden (25) gemessen wird,
wobei die Holwecknabe (17) einen Holweckaußendurchmesser DHW aufweist, der zwischen zwei einander diametral gegenüberliegenden Punkten einer radialen Außenfläche der Holwecknabe (17) gemessen wird, und wobei der Rotoraußendurchmesser DA mindestens 135 mm und der Holweckaußendurchmesser DHW mindestens 108 mm betragen, oder wobei der Rotoraußendurchmesser DA 120 mm und der Holweckaußendurchmesser DHW 99 mm betragen.

8. Vakuumpumpe nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

wobei die Rotorscheibe (15) einen Rotoraußendurchmesser DA aufweist, der zwischen zwei gedachten einander diametral gegenüberliegenden Schaufelenden (25) gemessen wird,
wobei die Vakuumpumpe eine zweite Holwecknabe umfasst, die einen Holweckaußendurchmesser DHW2 aufweist, der zwischen zwei einander diametral gegenüberliegenden Punkten einer radialen Außenfläche der zweiten Holwecknabe gemessen wird,
wobei der Holweckaußendurchmesser DHW2 der zweiten Holwecknabe mindestens 91 mm beträgt,
und/oder wobei der Rotoraußendurchmesser DA um einen Faktor von mindestens 1,40, vorzugsweise von mindestens 1,48, größer ist als der Holweckaußendurchmesser DHW2 der zweiten Holwecknabe.

9. Vakuumpumpe nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
wobei die Rotorwelle (13) eine Magnetlagerung oder eine Hybridlagerung, nämlich hochvakuumseitig ein Permanentmagnetlager (35) und vorvakuumseitig ein Wälzlager (37), aufweist.

10. Vakuumpumpe nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
wobei auf der Rotorwelle (13) mehrere Rotorscheiben (15) befestigt sind, wobei wenigstens zwei Rotorscheiben (15) sich hinsichtlich des Materials, aus dem sie gefertigt sind, voneinander unterscheiden, insbesondere wobei zumindest eine der Rotorscheiben (15) aus der Aluminiumlegierung gefertigt ist.

11. Vakuumpumpe nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
wobei die Holweckhülse (18) und/oder die Holwecknabe (17) einen Außendurchmesser DHH bzw. DHW aufweist bzw. aufweisen, der zwischen zwei einander diametral gegenüberliegenden Punkten einer radialen Außenfläche der Holweckhülse (18) bzw. der Holwecknabe (17) gemessen wird und der im Bereich von 5,0 cm bis 60 cm liegt.

12. Vakuumpumpe nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
wobei das Rotorbauteil (15, 17, 18) einen Außendurchmesser größer als 10 cm, bevorzugt größer als 15 cm, insbesondere bevorzugt größer als 20 cm, aufweist, wobei der Außendurchmesser zwischen zwei einander diametral gegenüberliegenden Punkten gemessen wird, die jeweils auf einer radialen Außenfläche des Rotorbauteils (15, 17, 18) liegen.

13. Verfahren zum Betreiben einer Vakuumpumpe, insbesondere einer Vakuumpumpe nach einem der vorstehenden Ansprüche,

wobei die Vakuumpumpe eine während des Betriebs um eine Drehachse (11) rotierende Rotorwelle (13) und wenigstens ein auf der Rotorwelle (13) befestigtes Rotorbauteil (15, 17, 18) umfasst,
insbesondere wobei das Rotorbauteil eine Rotorscheibe (15), die einen radial innen liegenden Bund (19), über den die Rotorscheibe (15) auf der Rotorwelle (13) befestigt ist, und mehrere Rotorschaufeln (21) umfasst, die jeweils integral mit dem Bund (19) verbunden sind und die sich jeweils ausgehend von einem Schaufelgrund (23) am Bund (19) radial nach außen erstrecken und radial außen ein freies Schaufelende (25) aufweisen, oder ein Holweckbauteil ist, insbesondere eine Holwecknabe (17) oder eine Holweckhülse (18),
wobei bei dem Verfahren die Vakuumpumpe mit einer Drehzahl der Rotorwelle (13) derart betrieben wird, dass die maximal zulässige Temperatur des Rotorbauteils (15, 17, 18) größer 90°C, insbesondere größer oder gleich 98°C, besonders bevorzugt größer oder gleich 120°C, ist.

14. Verfahren nach Anspruch 13,
wobei die Vakuumpumpe mit einer Drehzahl der Ro-

torwelle (13) derart betrieben wird, dass die Schaufelendengeschwindigkeit der Rotorscheibe (15) mehr als 420 m/s, bevorzugt mehr als 438 m/s, bevorzugt mehr als 464 m/s, beträgt.

15. Verfahren nach Anspruch 13 oder 14, wobei die Vakuumpumpe mit einer Drehzahl der Rotorwelle (13) betrieben wird, die mehr als 59.000 Umdrehungen pro Minute, bevorzugt mehr als 100.000 Umdrehungen pro Minute, besonders bevorzugt mehr als 150.000 Umdrehungen pro Minute, beträgt.

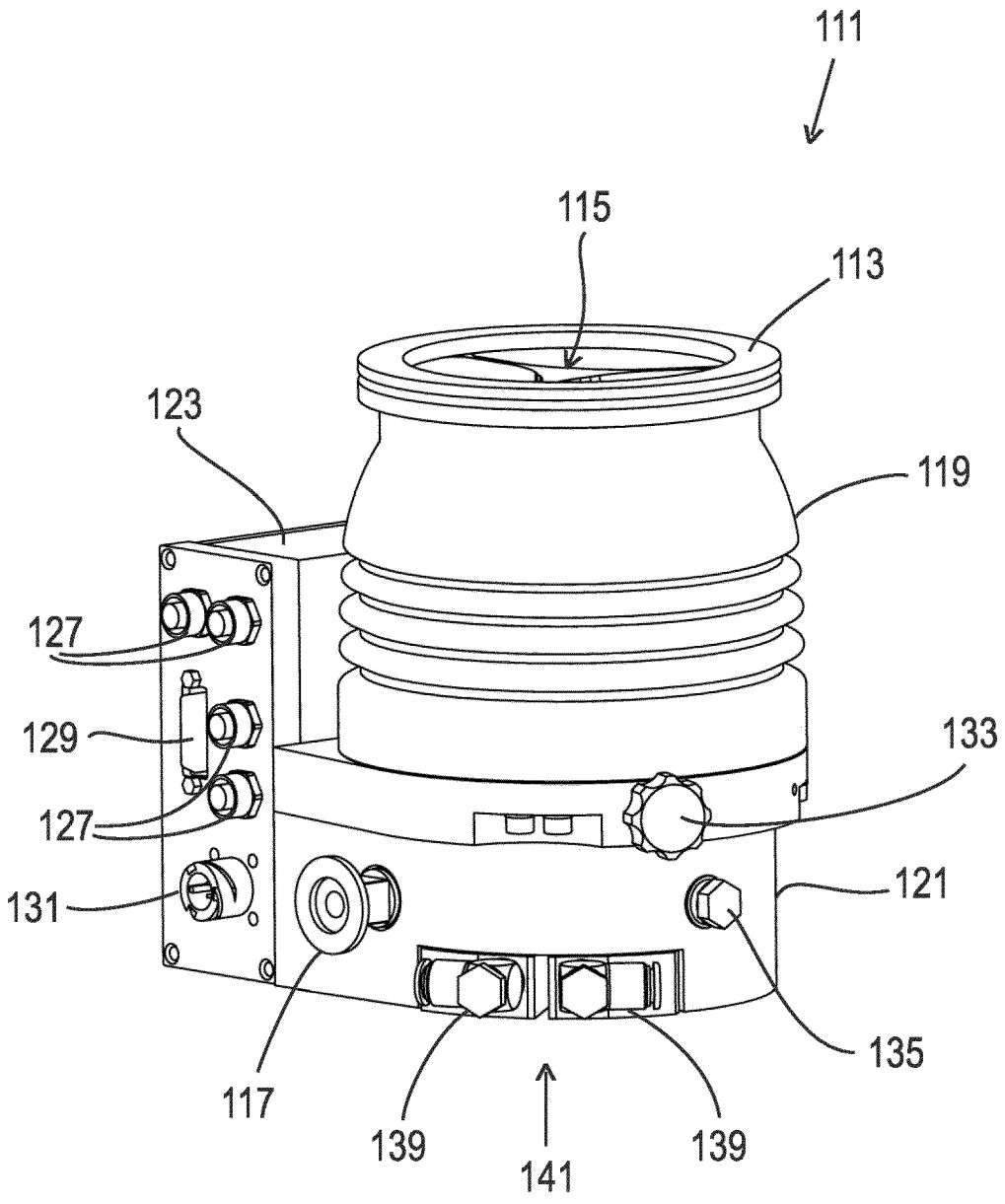

Fig. 1

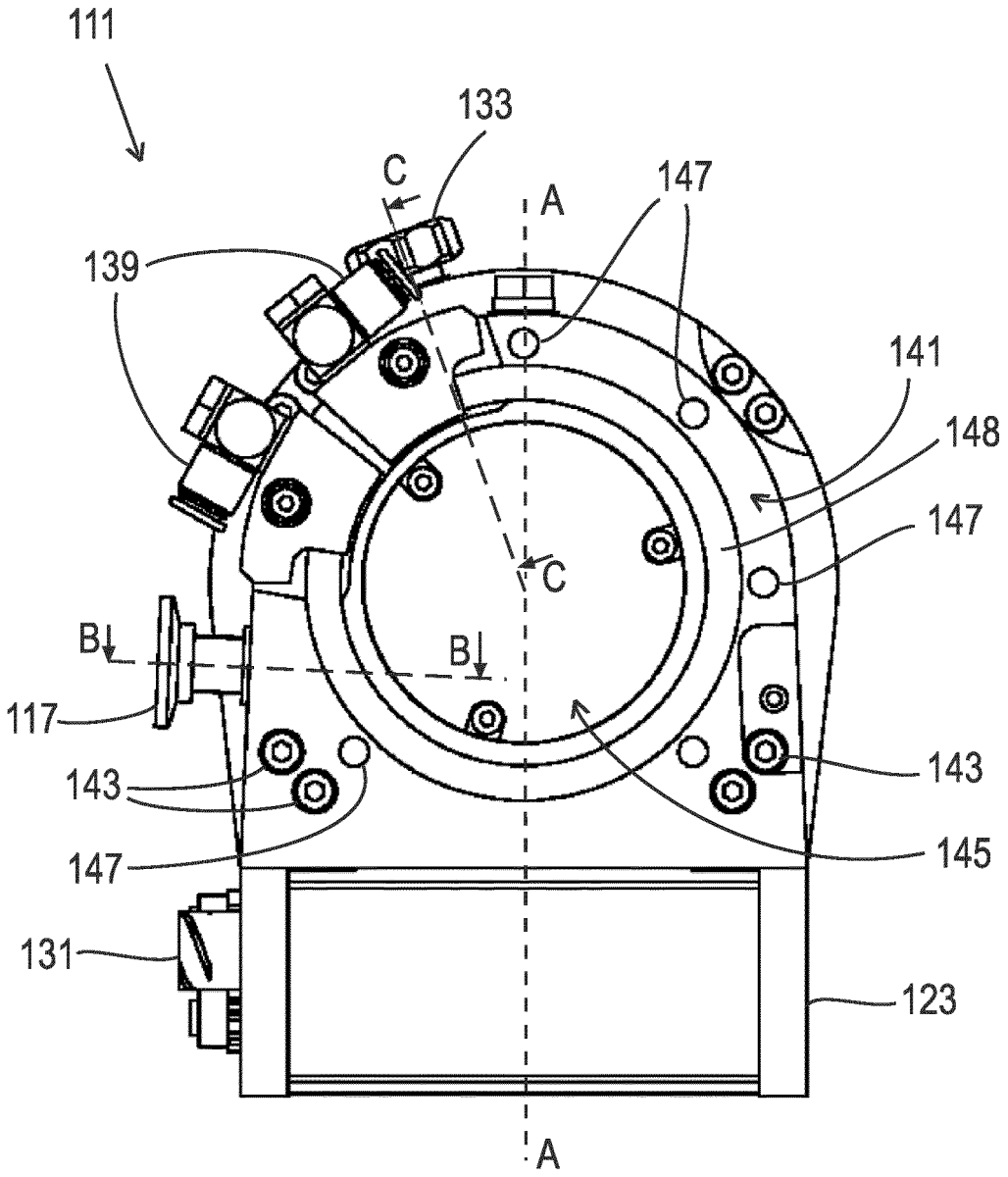

Fig. 2

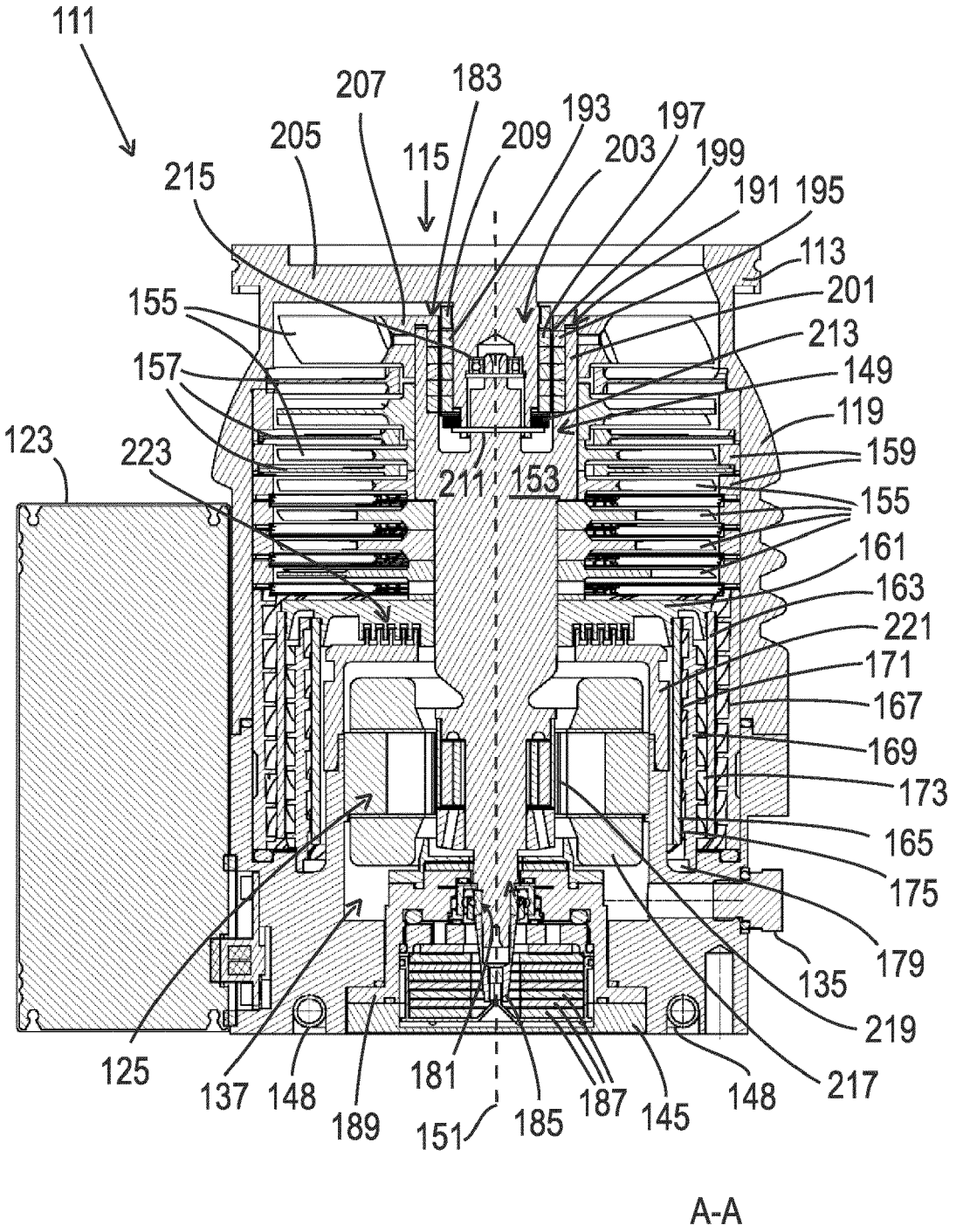
111
207
183
205
209
193
197
115
203
199
215
191
195
113
155
201
213
157
149
119
123
223
211
153
159
155
161
163
221
171
167
169
173
165
175
179
135
219
125
137
148
189
181
151
185
187
145
148
217
A-A

Fig. 3

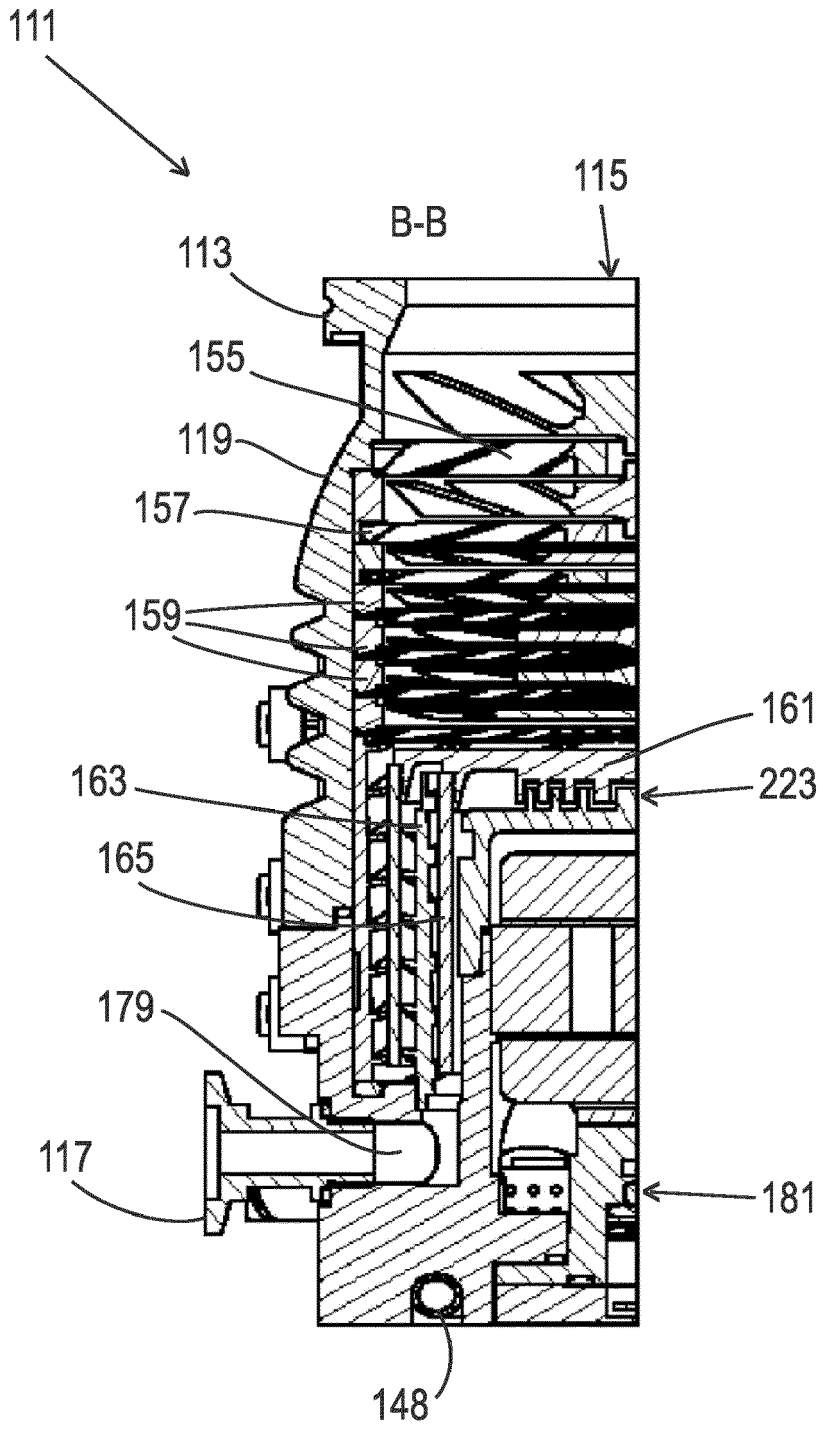

Fig. 4

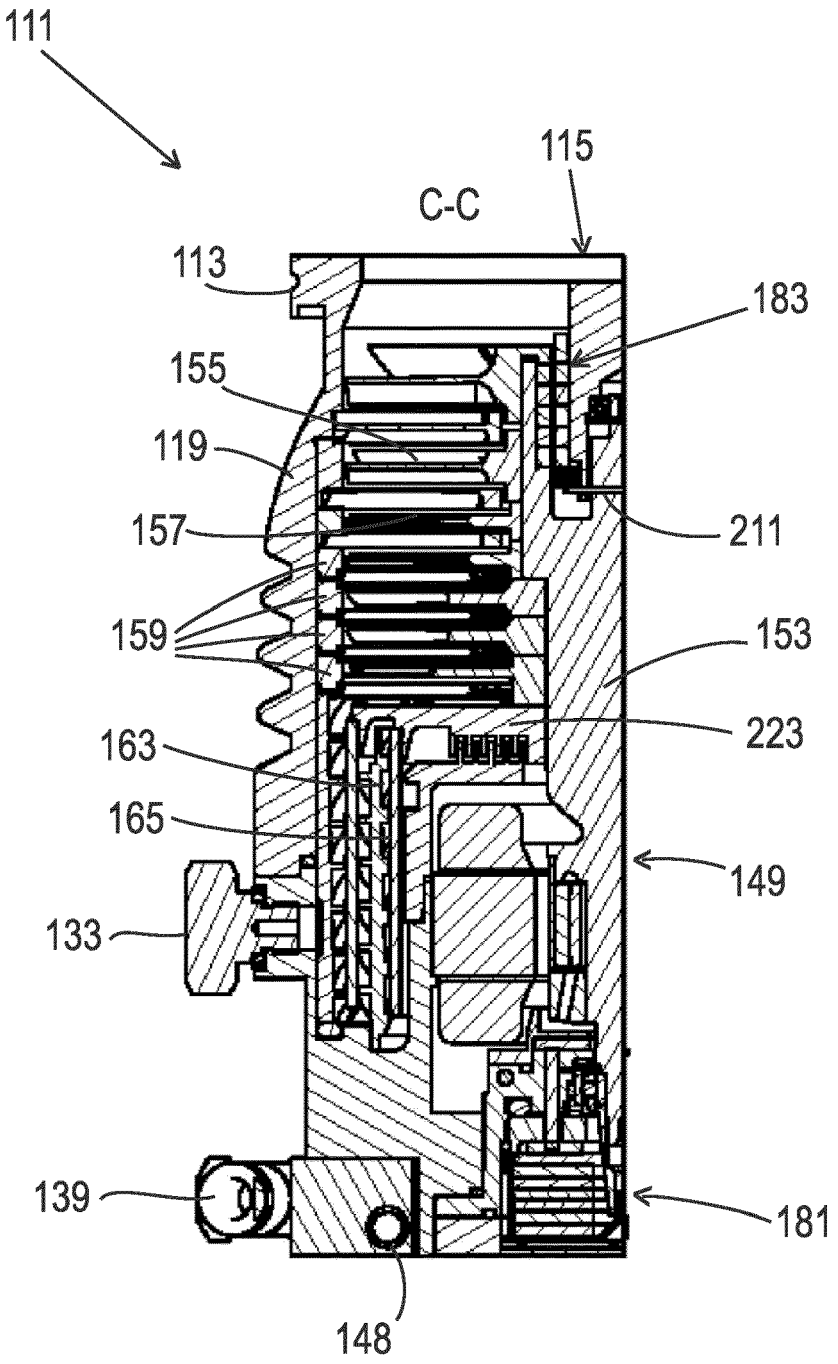
111
115
C-C
113
183
155
119
157
211
159
153
223
163
165
149
133
139
181
148

Fig. 5

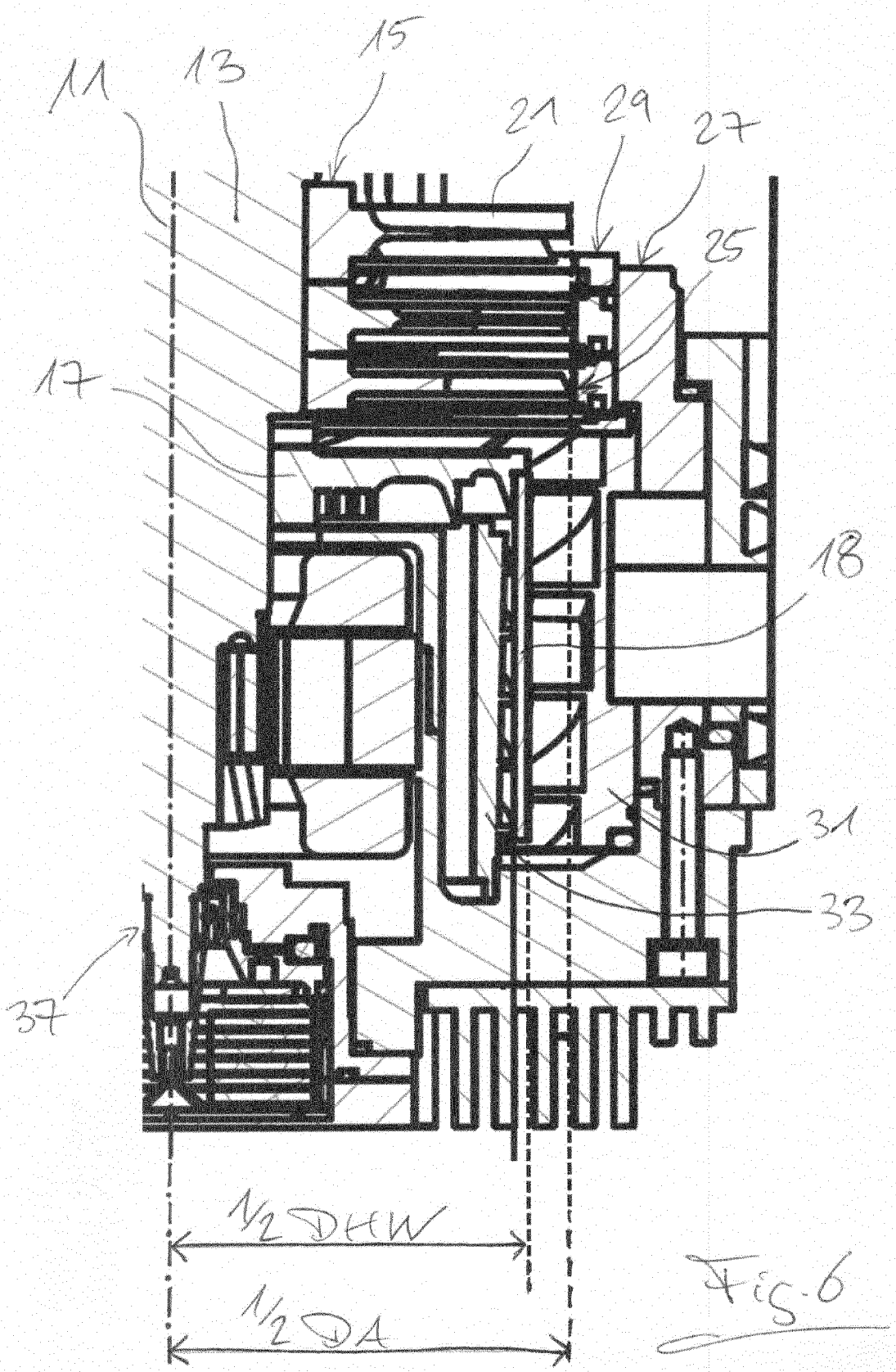

Fig. 6

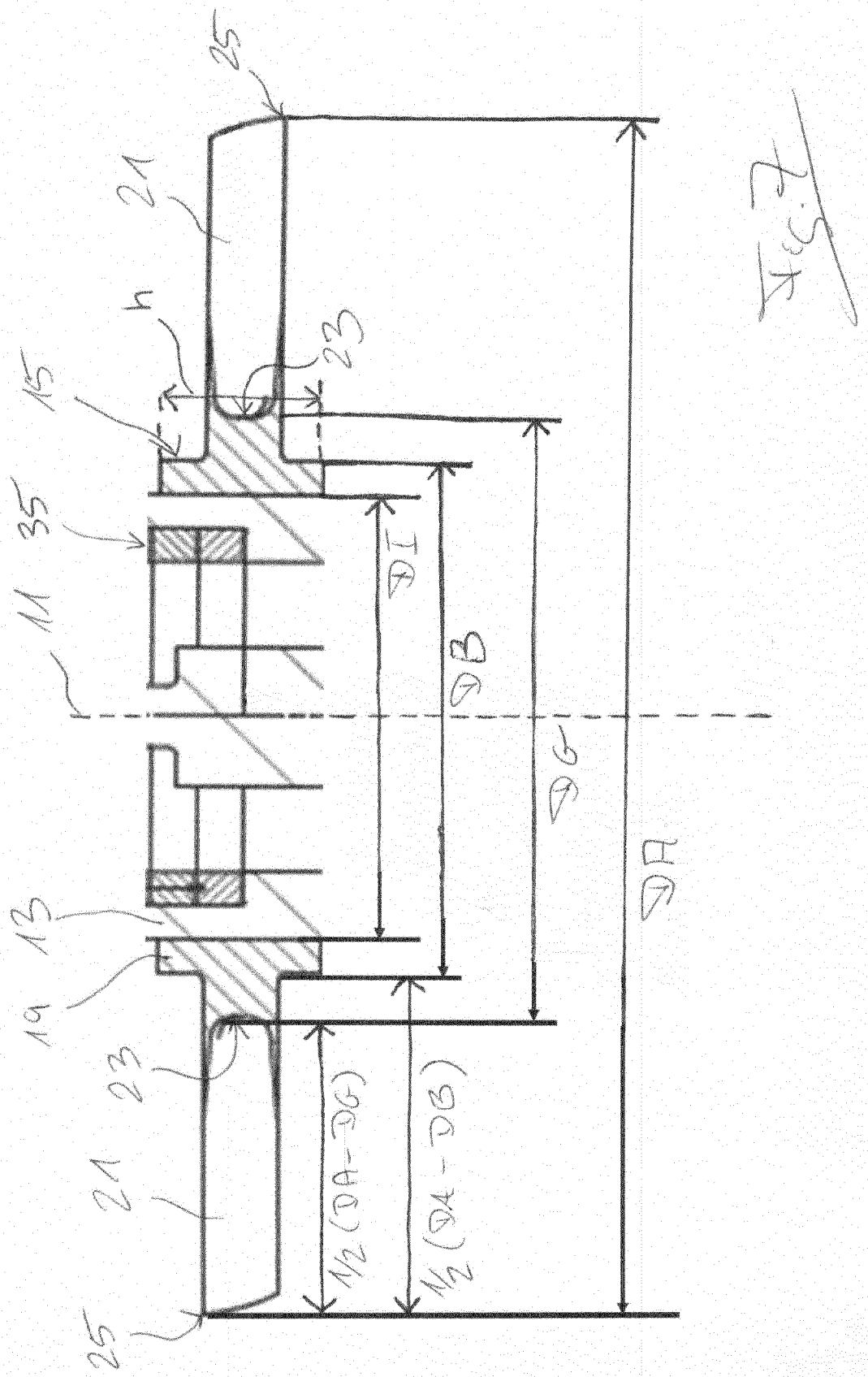

Fig. 7

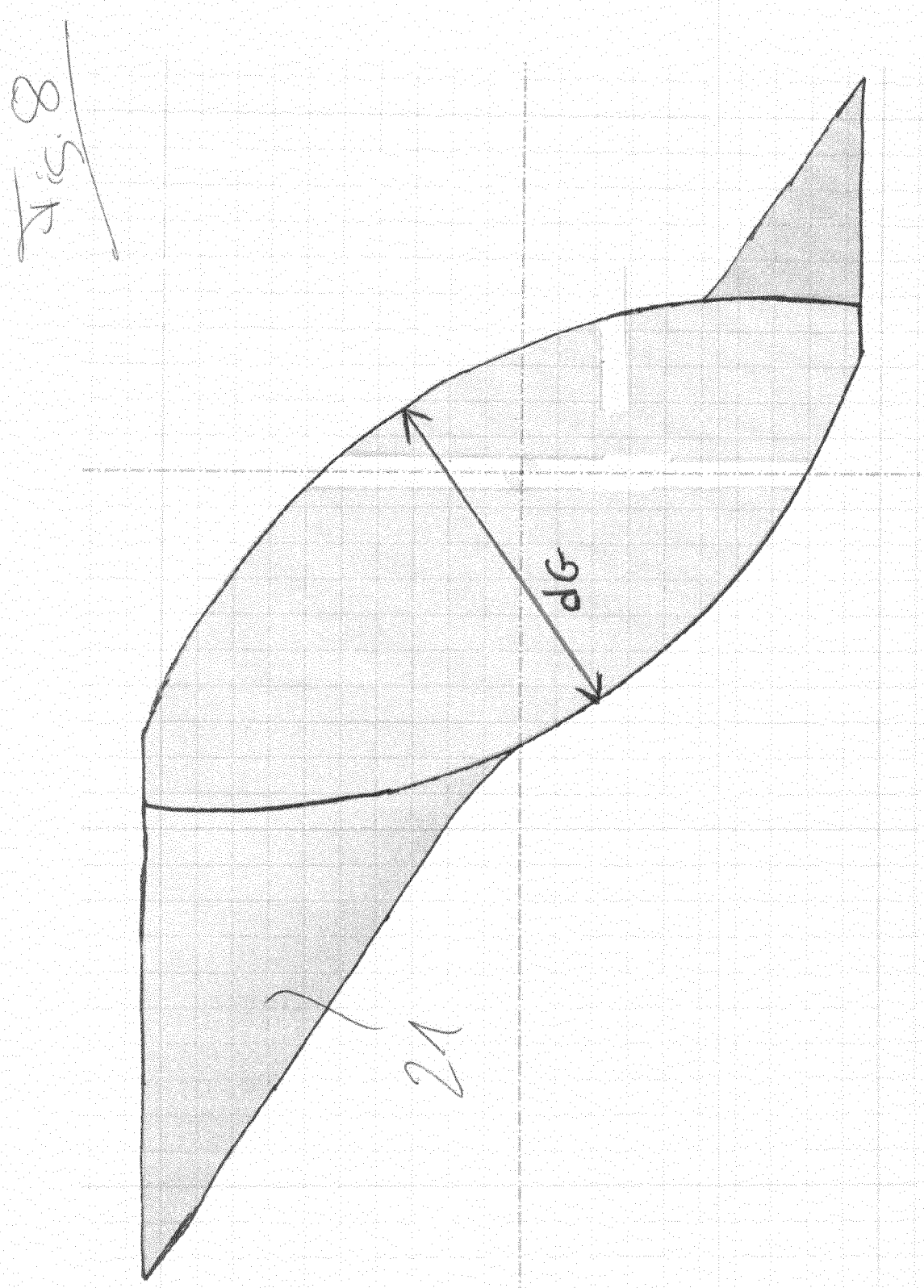
Fig. 8
dG
21

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- EP 3650702 A1 **[0046]**