

(19)



(11)

EP 3 399 191 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des
Hinweises auf die Patenterteilung:
27.05.2020 Patentblatt 2020/22

(51) Int Cl.:
F04C 18/08 ^(2006.01) **F04C 18/16** ^(2006.01)

(21) Anmeldenummer: **17169341.9**

(22) Anmeldetag: **03.05.2017**

(54) **SCHRAUBENVERDICHTER MIT MEHRSCHICHTIGER BESCHICHTUNG DER
ROTORSCHRAUBEN**

SCREW COMPRESSOR WITH MULTILAYER ROTOR SCREW COATING

COMPRESSEUR À VIS AVEC REVÊTEMENT MULTI-COUCHE DES VIS DE ROTOR

(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**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
07.11.2018 Patentblatt 2018/45

(73) Patentinhaber: **Kaeser Kompressoren SE
96450 Coburg (DE)**

(72) Erfinder:
• **Foerster, Andreas
96450 Coburg (DE)**

• **Weih, Gerald
96450 Coburg (DE)**

(74) Vertreter: **Zech, Stefan Markus
Meissner Bolte Patentanwälte
Rechtsanwälte Partnerschaft mbB
Postfach 86 06 24
81633 München (DE)**

(56) Entgegenhaltungen:
**EP-A1- 0 109 823 EP-A1- 0 705 979
WO-A1-2008/088600 JP-A- 2000 034 991
US-A1- 2003 126 733**

EP 3 399 191 B1

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft einen Schraubenverdichter umfassend ein Verdichtergehäuse mit zwei darin achsparallel gelagerten Rotorschrauben, die in einem Verdichtungsraum miteinander kämmen, über einen Antrieb antreibbar und in ihrer Drehbewegung zueinander synchronisiert sind, wobei die Rotorschrauben jeweils einen ein- oder mehrteiligen Grundkörper mit zwei Stirnflächen und einer dazwischen verlaufenden Profilfläche sowie über die Stirnflächen vorstehende Wellenenden aufweisen, nach dem Oberbegriff von Patentanspruch 1, sowie eine Rotorschraube nach den Merkmalen des Anspruchs 26, sowie ein Verfahren zur Aufbringung einer mehrschichtigen Beschichtung auf eine metallische Fläche einer Rotorschraube oder eines Verdichtungsraums eines Schraubenverdichters nach den Merkmalen des Anspruchs 27. Schraubenmaschinen, sei es als Schraubenverdichter oder als Schraubenexpander, sind seit mehreren Jahrzehnten im praktischen Einsatz. Ausgestaltet als Schraubenverdichter haben sie in vielen Bereichen Hubkolbenverdichter als Verdichter verdrängt. Mit dem Prinzip des ineinandergreifenden Schraubenpaars in Gestalt der Rotorschrauben lassen sich nicht nur Gase unter Aufwendung einer bestimmten Arbeitsleistung komprimieren. Die Anwendung als Vakuumpumpe eröffnet auch den Einsatz von Schraubenmaschinen zur Erzielung eines Vakuums. Schließlich kann durch das Hindurchleiten von unter Druck stehenden Gasen anders herum auch eine Arbeitsleistung erzeugt werden, so dass aus unter Druck stehenden Gasen mittels des Prinzips der Schraubenmaschine auch mechanische Energie gewonnen werden kann.

[0002] Schraubenmaschinen weisen allgemein zwei achsparallel zueinander angeordnete Rotorschrauben auf, von denen eine einen Hauptrotor und die andere einen Nebenrotor definiert. Die Rotorschrauben weisen jeweils einen ein- oder mehrteiligen Grundkörper mit zwei Stirnflächen und einer dazwischen laufenden Profilfläche sowie zwei jeweils über die Stirnflächen vorstehende Wellenenden auf.

[0003] Die Rotorschrauben greifen mit entsprechender schraubenförmiger Verzahnung ineinander. Zwischen den Verzahnungen und einem Verdichtergehäuse werden durch die Zahnlückenvolumina mehrere aufeinanderfolgende Arbeitskammern gebildet. Ausgehend von einem Ansaugbereich wird mit fortschreitender Drehung der Rotorschrauben die jeweils betrachtete Arbeitskammer zunächst geschlossen und dann kontinuierlich im Volumen verringert, so dass eine Verdichtung des Mediums eintritt. Schließlich wird bei fortschreitender Drehung die Arbeitskammer zu einem Druckfenster hin geöffnet und das Medium in das Druckfenster ausgeschoben. Durch diesen Vorgang der inneren Verdichtung unterscheiden sich als Schraubenverdichter ausgebildete Schraubenmaschinen von Rootsgebläsen, die ohne innere Verdichtung arbeiten.

[0004] Durch das Ineinandergreifen beider Rotorschrauben wird sowohl für die als Hauptrotor ausgebildete Rotorschraube als auch für die als Nebenrotor ausgebildete Rotorschraube jeweils einen Wälzkreis definiert. Die Wälzkreise sind in einem Stirnschnitt der Verzahnung darstellbar und es wird in einer derartigen Darstellung erkennbar, dass die Wälzkreise bei Bewegung der Rotorschrauben aneinander abrollen. Auf den Wälzkreisen sind die Umfangsgeschwindigkeiten der als Hauptrotor ausgebildeten Rotorschraube und der als Nebenrotor ausgebildeten Rotorschraube identisch, d.h. es gibt in diesem Bereich keine Relativgeschwindigkeit zwischen beiden Rotorschrauben. Je weiter man sich allerdings radial innerhalb der Profilfläche von den Wälzkreisen entfernt, desto größer sind die Relativgeschwindigkeiten.

[0005] Schraubenmaschinen können neben der bereits erwähnten Funktion als Vakuumpumpe oder als Schraubenexpander auf unterschiedlichen Gebieten der Technik als Verdichter eingesetzt werden. Ein besonders bevorzugtes Anwendungsgebiet liegt bei der Verdichtung von Gasen, wie z.B. Luft oder inerten Gasen (Helium, Stickstoff, Argon, ...). Es ist aber auch möglich, wenngleich dies im speziellen baulich andere Anforderungen stellt, eine Schraubenmaschine zur Verdichtung von Kältemitteln, beispielsweise für Klimaanlage oder Kälteanwendungen einzusetzen. Wenn im Folgenden von "Druckluft" oder "Gasen" gesprochen wird, so sind darunter alle Prozessmedien zu verstehen, die verdichtet bzw. entspannt werden. Bei der Verdichtung von Gasen gerade bei höheren Druckverhältnissen wird meist mit einer fluideingespritzten Verdichtung, insbesondere einer öl- oder wassereingespritzten Verdichtung gearbeitet; es ist aber auch möglich, eine Schraubenmaschine, insbesondere einen Schraubenverdichter nach dem Prinzip der trockenen Verdichtung zu betreiben. Bei einer ölfreien Verdichtung wird kein Öl zur Kühlung und Schmierung in den Verdichtungsraum eingespritzt. Die Druckluft kommt dabei während des Verdichtungs Vorgangs nicht mit Öl in Kontakt. Im Niederdruckbereich werden Schraubenverdichter gelegentlich auch als Schraubengebläse bezeichnet.

[0006] Die Erfindung bezieht sich auf eine ölfreie, insbesondere trockene Verdichtung. Typische Druckverhältnisse können bei trockener Verdichtung zwischen 1,1 und ca. 10 liegen, wobei das Druckverhältnis das Verhältnis von Verdichtungsenddruck zu Ansaugdruck ist. Die Verdichtung kann ein- oder mehrstufig erfolgen. Erzielbare Enddrücke können insbesondere bei ein- oder zweistufiger Verdichtung beispielsweise in einem Bereich von 1,1 bar bis ca. 10 bar liegen. Soweit an dieser Stelle oder nachfolgend in der vorliegenden Anmeldung auch Druckangaben in "bar" Bezug genommen wird, so beziehen sich derartige Druckangaben jeweils auf Absolutdrücke.

[0007] Die Erfindung bezieht sich auf Schraubenmaschinen, insbesondere Schraubenverdichter, deren Rotorschrauben bestimmungsgemäß nicht durch Profileingriff zwischen beiden Rotorschrauben synchronisiert werden, sondern extern, beispielsweise durch ein Synchrongetriebe auf den Wellenenden oder durch separate und elektronisch synchronisierte Rotorantriebe. In diesen Schraubenmaschinen ergibt sich Rotorkontakt nur temporär, z.B. durch geometrische

Abweichungen der Sollkontur der Rotorschraube bzw. Rotorschrauben oder durch thermische Differenzdehnungen und wird durch Materialabtrag einer an den Rotorschrauben vorgesehenen Beschichtung an den Kontakt- und Reibstellen beseitigt. Diese Beseitigung eines nur temporär gegebenen Kontakts zwischen den Rotorschrauben erfolgt in einem Einlaufvorgang. Rotorschrauben werden meist aus Stahl oder Gusseisen hergestellt. Das Verdichtergehäuse wird typischerweise aus Grauguss gegossen. Zwischen den Rotorschrauben und dem Verdichtergehäuse sowie insbesondere auch zwischen den beiden Rotorschrauben muss ein kleiner Spalt vorherrschen. Diese Bauteile dürfen sich im Betrieb nicht berühren, da ein metallischer Kontakt aufgrund der hohen Geschwindigkeiten zum Anlaufen und im schlimmsten Fall zum Fressen führen würde. Der Spalt zwischen den Rotorschrauben wird dadurch realisiert, dass beide Rotorschrauben synchronisiert betrieben werden, etwa durch ein Synchrongetriebe oder durch separate, elektronisch synchronisierte Rotorantriebe.

[0008] Die Spalte sollten einerseits so klein wie möglich sein, um Rückströmungen der verdichteten Luft in vorhergehende Arbeitskammern (d.h. entgegen der Förderrichtung) zu minimieren. Je mehr Rückströmung auftritt, desto höher sind die internen Verluste und umso schlechter ist die Effizienz der Schraubenmaschine. Im Falle eines Schraubenverdichters steigt mit zunehmender Rückströmung auch die Verdichtungsendtemperatur signifikant an, was zu größeren Wärmedehnungen der Rotorschrauben und des Verdichtergehäuses führt. Die höhere Wärmedehnung erhöht wiederum die Gefahr des Anlaufens, d.h. es entsteht ein selbstverstärkender Effekt.

[0009] Andererseits sollten die Spalte jedoch auch ausreichend groß sein, um die geforderte Betriebssicherheit zu gewährleisten. Kommt es bei hohen Relativgeschwindigkeiten zum Kontakt von metallischen Flächen, so führt dies zu hohem Wärmeeintrag und Wärmedehnung sowie letztendlich ebenfalls zum Fressen der Bauteile, wie oben bereits beschrieben. Bei der Spaltdimensionierung sind deshalb neben den Fertigungstoleranzen auch die Wärmedehnung aufgrund hoher Verdichtungstemperaturen sowie die Durchbiegung der Rotorschrauben aufgrund des Drucks in den Arbeitskammern zu berücksichtigen.

[0010] Eine weitere Anforderung bei ölfreier, insbesondere trockener Verdichtung ist die Gewährleistung eines guten Korrosionsschutzes der Rotorschrauben und des Verdichtergehäuses. Nach dem Abschalten des noch heißen Schraubenverdichters kann es beim Abkühlen zu Kondenswasserbildung im Inneren des Verdichtergehäuses aufgrund der Feuchtigkeit in der Luft kommen. Auch bei trockener Verdichtung mit Wassermindermengeneinspritzung (hierbei verdunstet das Wasser bis zum Ende des Verdichtungs Vorgangs im Wesentlichen vollständig) besteht Korrosionsgefahr. Rotorschrauben und Gehäuse aus Grauguss bzw. herkömmlichem Stahl sind besonders korrosionsanfällig.

[0011] Aus dem Stand der Technik ist es bekannt, dass Rotorschrauben teilweise aus nicht rostendem Stahl hergestellt werden. Dies ist jedoch sehr teuer und aufwendig bei der Herstellung. Analog zu den Rotorschrauben trifft dies auch auf das Verdichtergehäuse zu.

[0012] Im Stand der Technik werden Rotorschrauben trockenlaufender Schraubenverdichter deshalb zur Beseitigung oben genannter Probleme mit einer Fluor-polymer-/Gleitlack-Beschichtung versehen.

[0013] Die EP 2 784 324 A1 beispielsweise beschreibt die Zusammensetzung einer Beschichtung, die bei der Aufarbeitung bzw. Überholung der Rotorschrauben eines trockenlaufenden Schraubenverdichters verwendet wird. Die verschlissene Beschichtung auf den Rotorschrauben wird entfernt und durch eine neue Beschichtung ersetzt. Diese Beschichtung setzt sich zusammen aus PTFE (konkret Teflon 954G 303), Graphit und weiteren Lösungsmitteln bzw. Verdünnern. Laut Produktdatenblatt des Herstellers (Chemours) ist die Substanz 954G 303 nur für Dauergebrauchstemperaturen von 150°C geeignet. Darüber hinaus gibt es weitere Anforderungen durch Umwelt- und Gesundheitsschutz. Die Substanz 954G 303 sowie weitere Bestandteile der im Stand der Technik angegebenen Rezeptur bringen Lösungsmittel mit sich, die bei der Verarbeitung höchst problematisch sind. Es gibt zunehmend auch gesetzliche Forderungen nach einer Reduzierung der flüchtigen organischen Verbindungen (VOCs). Darüber hinaus ist die Substanz 954G 303 nicht lebensmitteltauglich und insofern auch nicht FDA-konform. Sie steht vielmehr in Verdacht, krebserregend zu sein.

[0014] Darüber hinaus bietet die im Stand der Technik vorgeschlagene Beschichtung nur begrenzten Korrosionsschutz, weil eine Schicht aufgebracht wird, die vergleichsweise viel Graphit enthält. Wird diese relativ weiche Schicht, beispielsweise durch Kratzer, beschädigt, so liegt der metallische Grundkörper der Rotorschraube lokal frei und es besteht damit Korrosionsgefahr.

[0015] In der WO 2014/018530 wird eine Beschichtung aus einem Hochleistungsthermoplast (z.B. PEEK) sowie einem ersten Festschmierstoff (z.B. MoS₂) und einen zweiten Festschmierstoff (z.B. PTFE oder Graphit) vorgeschlagen. Allerdings wird dort eine Anwendung bei Kompressoren mit niedrigen Geschwindigkeiten und gleichzeitig hohen Lasten beschrieben. Darüber hinaus ist bei der Beschichtung nach dem Stand der Technik vorgesehen, dass sich die beschichteten Oberflächen ständig im Reibkontakt zueinander befinden.

[0016] In den Druckschriften US2003/0126733 A1 und EP0190823 A1 werden Schraubenmaschinen offenbart, die über mehrschichtig mit Polymer beschichtete Rotorschrauben verfügen.

[0017] Die Erfindung setzt sich ausgehend vom erstgenannten Stand der Technik die Aufgabe, für einen ölfreien Schraubenverdichter mit vergleichsweise hohen Rotationsgeschwindigkeiten der Rotorschrauben und einem angestrebten Spalt zwischen den Rotorschrauben untereinander bzw. den Rotorschrauben und einem Verdichtergehäuse eine Beschichtung anzugeben, die die Nachteile im Stand der Technik vermeidet und gleichzeitig sich in einem Einlaufvorgang

selbst auf einen ausreichend kleinen Spaltabstand einstellt. Diese Aufgabe wird in vorrichtungstechnischer Hinsicht durch einen Schraubenverdichter, insbesondere einen ölfreien Schraubenverdichter, nach den Merkmalen von Patentanspruch 1, eine Rotorschraube nach den Merkmalen von Patentanspruch 26 und in verfahrenstechnischer Hinsicht mit einem Ablauf nach den Merkmalen von Patentanspruch 27 gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen sind in den Unter-

[0018] Ein Kerngedanke der vorliegenden Erfindung besteht darin, dass bei einem Schraubenverdichter bzw. bei einer Rotorschraube mindestens die Profilfläche der Rotorschraube mehrschichtig, umfassend eine erste, innere Schicht sowie eine zweite, äußere Schicht ausgebildet ist, wobei die erste, innere Schicht und die zweite, äußere Schicht beide einen thermoplastischen Kunststoff umfassen bzw. aus diesem gebildet sind, wobei in der zweiten, äußeren Schicht einen Einlaufvorgang unterstützende Partikel oder Poren eingebettet sind und der thermoplastische Kunststoff eine Matrix zur Aufnahme der Partikel bzw. zur Ausbildung der Poren definiert.

[0019] Ein Kerngedanke des erfindungsgemäßen Verfahrens sieht die Aufbringung einer mehrteiligen Beschichtung auf eine zu beschichtende metallische Fläche einer Rotorschraube oder eines Verdichtungsraums eines Schraubenverdichters vor, umfassend die nachfolgenden Schritte:

- Vorbehandeln der zu beschichtenden metallischen Fläche,
- Aufbringen einer ersten, inneren Schicht, die einen thermoplastischen Kunststoff umfasst bzw. aus diesem gebildet ist, auf die zu beschichtende metallische Fläche oder auf eine Unterschicht, die insbesondere als Vorbehandlungsschicht ausgebildet sein kann, und
- Aufbringen einer zweiten, äußeren Schicht auf die erste, innere Schicht, wobei die zweite äußere Schicht ebenfalls einen thermoplastischen Kunststoff umfasst bzw. aus diesem gebildet ist und wobei in der zweiten, äußeren Schicht einen Einlaufvorgang unterstützende Partikel oder Poren eingebettet sind und der thermoplastische Kunststoff eine Matrix zur Aufnahme der Partikel bzw. zur Ausbildung der Poren definiert.

[0020] Die Ausbildung der Profilfläche als mehrschichtige Schicht erlaubt das Vorsehen von Teilschichten mit unterschiedlichen Eigenschaften. Eine besondere Überlegung ist aber darin zu sehen, dass die zweite, äußere Schicht dazu ausgebildet ist, in einem Einlaufvorgang ggf. bereichsweise oder auch nahezu komplett abgetragen zu werden, so dass die Profilflächen der ineinandergreifenden Rotorschrauben in optimaler Weise aufeinander eingestellt werden, und zwar unter den konkret gegebenen Bedingungen vor Ort, d.h. unter den jeweils gegebenen Druckverhältnissen, Temperaturbedingungen, etc. Insofern handelt es sich bei der zweiten, äußeren Schicht mehr oder weniger um eine sich selbst einstellende Schicht.

[0021] Nachstehend werden bevorzugte Ausgestaltungen für den erfindungsgemäßen Schraubenverdichter bzw. die erfindungsgemäße Rotorschraube diskutiert, wobei zumindest einige von Ihnen auch ohne weiteres auf das erfindungsgemäße Verfahren Anwendung finden können bzw. auf das Verfahren übertragbar sind.

[0022] Bevorzugtermaßen sind die Materialien so gewählt, dass auch bei lebensmitteltechnischen Anwendungen der Materialabtrag bzw. der Kontakt der verdichteten Luft mit der ersten, inneren Schicht und/oder der zweiten, äußeren Schicht unbedenklich ist, d.h. die Materialien lebensmittelkonform bzw. FDA-konform sind. Nach einem Grundgedanken der vorliegenden Erfindung kommt also allgemein ein thermoplastischer Kunststoff zum Einsatz. Vorzugsweise handelt es sich bei dem thermoplastischen Kunststoff um einen teilkristallinen thermoplastischen Kunststoff. Teilkristalline thermoplastische Kunststoffe zeichnen sich durch hohe Ermüdungsfestigkeit, gute Chemikalienbeständigkeit und gutes Gleitverhalten aus. Sie zeigen sich darüber hinaus sehr verschleißfest.

[0023] In einer bevorzugten Ausführungsform ist der thermoplastische Kunststoff ein hochleistungsthermoplastischer Kunststoff, insbesondere eine teilkristalliner hochleistungsthermoplastischer Kunststoff. Unter einem hochleistungsthermoplastischen Kunststoff wird ein Kunststoff verstanden, der eine Dauergebrauchstemperatur von $> 130^{\circ}\text{C}$, vorzugsweise $> 150^{\circ}\text{C}$, besitzt. Bevorzugtermaßen handelt es sich um ein thermoplastisches Konzentrat, weiter bevorzugtermaßen um ein Polymer oder Copolymer mit alternierenden Keton- und Etherfunktionalitäten, insbesondere um ein Polyaryletherketon (PAEK). Besondere Beispiele für Polyaryletherketone (PAEK) sind:

- i. Polyetherketon (PEK)
 - ii. Polyetheretherketon (PEEK)
 - iii. Polyetherketonketon (PEKK)
 - iv. Polyetherketonetherketonketon (PEKEKK)
 - v. Polyetheretheretherketon (PEEEK)
 - vi. Polyetheretherketonketon (PEEKK)
 - vii. Polyetherketonetheretherketon (PEKEEK)
 - viii. Polyetheretherketonetherketon (PEEKEK)
- und/oder Copolymere davon und/oder Gemische davon,

wobei besonders Polyetheretherketon (PEEK) als bevorzugt angesehen wird. In einer besonders bevorzugten Ausgestaltung umfasst der thermoplastische Kunststoff zur Ausbildung der ersten, inneren Schicht und/oder der thermoplastische Kunststoff zur Ausbildung der zweiten, äußeren Schicht Polyetheretherketon (PEEK) oder besteht zumindest im Wesentlichen aus Polyetheretherketon (PEEK).

[0024] Auch der Einsatz von Polyphenylensulfid (PPS) und Polyamiden (PA), insbesondere PA11 oder PA12 als thermoplastischer Kunststoff ist möglich.

[0025] Weiter bevorzugt umfasst die thermoplastische Grundsubstanz zur Ausbildung der ersten, inneren Schicht und zur Ausbildung der zweiten, äußeren Schicht generell ein Polyaryletherketon (PAEK) oder ist zumindest im Wesentlichen aus PAEK gebildet. Die hochleistungsthermoplastischen Kunststoffe können auch als Hochleistungsthermoplast bzw. als thermoplastischer Hochleistungskunststoff bezeichnet werden.

[0026] Ganz allgemein gilt für den mehrschichtigen Aufbau der Schichten umfassend thermoplastischen Kunststoff nach der vorliegenden Erfindung, dass sich die erste, innere Schicht und die zweite, äußere Schicht strukturell unterscheiden, auch wenn der gleiche thermoplastische Kunststoff Verwendung findet. Die erste, innere Schicht ist bevorzugtermaßen partikelfrei bzw. porenfrei bzw. weist in jedem Fall einen geringeren Anteil an Partikeln und/oder Poren auf als die zweite, äußere Schicht, vorzugsweise einen deutlich geringeren Anteil an Partikeln und/oder Poren. Der Anteil an thermoplastischem Kunststoff an der ersten, inneren Schicht bezogen auf die Gesamtmasse beträgt mindestens 60 Gew.-%, vorzugsweise mindestens 70 Gew.-%, weiter vorzugsweise mindestens 80 Gew.-%, weiter vorzugsweise mindestens 95 Gew.-%, weiter vorzugsweise mindestens 100 Gew.-%. Der Anteil an thermoplastischem Kunststoff an der zweiten, äußeren Schicht beträgt vorzugsweise mindestens 50 Gew.-% und bei der Verwendung von Partikeln in der zweiten, äußeren Schicht vorgesehen sind, kann der Anteil an thermoplastischem Kunststoff in der zweiten, äußeren Schicht auch über 95 Gew.-% liegen. Der Volumenanteil von Poren an der zweiten, äußeren Schicht liegt bevorzugtermaßen über 5 %, weiter bevorzugt über 10 %, wohingegen der Porenanteil der ersten, inneren Schicht unter 5 %, bevorzugtermaßen unter 2 % liegt.

[0027] Weiter bevorzugtermaßen ist die erste, innere Schicht ohne einen Einlaufvorgang unterstützende Partikel oder Poren, sondern zumindest im Wesentlichen homogen ausgebildet. Selbstverständlich handelt es sich hier nicht um eine abstrakte theoretische Homogenität, sondern die erste, innere Schicht ist in Bezug zu der zweiten, äußeren Schicht, die den Einlaufvorgang unterstützende Partikel oder Poren umfasst, vergleichsweise homogen ausgebildet und weist jedenfalls keine gezielt eingebrachten Inhomogenitäten auf.

[0028] In einer möglichen Ausgestaltung umfassen die einen Einlaufvorgang unterstützenden Partikel der zweiten, äußeren Schicht abrasive und/oder schmierende Partikel. Es ist insofern möglich, eine zweite, äußere Schicht nur mit abrasiven Partikeln vorzusehen oder alternativ nur mit schmierenden Partikeln vorzusehen. Weiterhin ist es möglich, in der zweiten, äußeren Schicht sowohl abrasive als auch schmierende Partikel vorzusehen. Schließlich ist es denkbar, Bereiche festzulegen, bei denen nur abrasive Partikel oder nur schmierende Partikel vorgesehen sind oder Bereiche, bei denen beide Arten gemischt vorgesehen werden, wobei auch das Verhältnis der abrasiven Partikel zu den schmierenden Partikeln sich über unterschiedliche Bereiche der zweiten äußeren Schicht verändern kann.

[0029] Gemäß einer bevorzugten Ausgestaltung umfassen die Partikel Mikro-Hohlkugeln (Microspheres), insbesondere aus Aluminiumoxid (Al_2O_3), Siliziumdioxid (SiO_2), thermoplastischem Kunststoff oder Glas, insbesondere Borsilikatglas (Borosilikatglas) oder sind aus diesen gebildet. Mikro-Hohlkugeln sind sehr leichte, hohle Kugeln mikroskopischer Dimension, die mit Luft oder inertem Gas gefüllt sind. Die Hülle der Mikro-Hohlkugeln kann insbesondere aus einem der folgenden Materialien bestehen: Aluminiumoxid (Al_2O_3), Siliziumdioxid (SiO_2) oder aus Glas und letzteres insbesondere aus Borsilikatglas (Borosilikatglas). Kugeln aus Borsilikatglas, die innen hohl sind, werden beispielsweise von 3M als "Glass Bubbles" angeboten, liegen in Pulverform vor, sind chemisch inaktiv, nicht brennbar und nicht porös. Ein durchschnittlicher Kugeldurchmesser liegt beispielsweise bei 20 μm mit durchschnittlicher Wandstärke von 0,7 μm . Bei Verwendung derartiger Mikro-Glashohlkugeln platzen diese während des Einlaufvorgangs auf. Sie sorgen aufgrund ihrer Härte (sie sind relativ zur Bindemittel-Matrix der zweiten, äußeren Schicht deutlich härter) auch für den nötigen Abrieb und bietet lokale, winzige, gleichmäßig über die Oberfläche verteilte Angriffspunkte für einen Beschichtungsabtrag bei Reibkontakt mit einer gegenüberliegenden Fläche, beispielsweise der gegenüberliegenden Rotorschraube, wodurch ein unerwünschtes bzw. schädliches, großflächiges Abplatzen der Schichten mit der jeweils zugeordneten gegenüberliegenden Fläche, wie beispielsweise der Profilfläche einer gegenüberliegenden Rotorschraube oder bei einem Kontakt zwischen Rotorschraube und Verdichtergehäuse vermieden wird.

[0030] In einer fakultativ möglichen Ausgestaltung der vorliegenden Erfindung weisen die einen Einlaufvorgang unterstützenden Partikel der zweiten, äußeren Schicht eine gegenüber der durch den thermoplastischen Kunststoff definierten Matrix höhere Härte auf, wobei die Härte nach Shore gemessen bzw. definiert wird.

[0031] In einer ebenfalls fakultativ möglichen Ausgestaltung der vorliegenden Erfindung weisen die einen Einlaufvorgang unterstützenden Partikel der zweiten, äußeren Schicht eine gegenüber der durch den thermoplastischen Kunststoff definierten Matrix geringere Härte auf, wobei die Härte nach Shore gemessen bzw. definiert wird.

[0032] Nach einem besonders bevorzugten Aspekt der vorliegenden Erfindung ist die erste, innere Schicht mit der zweiten, äußeren Schicht durch Aufschmelzen verbunden. Es ergibt sich hierdurch eine besonders stabile, dauerhafte und zuverlässige Verbindung zwischen der ersten, inneren Schicht und der zweiten, äußeren Schicht. Dadurch lässt sich eine relativ zuverlässige Verankerung der zweiten, äußeren Schicht gewährleisten, auch wenn die zweite, äußere Schicht einen vergleichsweise hohen Anteil an Partikeln oder Poren aufweist und so beispielsweise bei einer theoretischen Anbringung direkt auf dem metallischen Grundkörper bzw. auf einer metallischen Fläche relativ schlechte Hafteigenschaften aufweisen würde. In diesem Zusammenhang muss auch bemerkt werden, dass die Anteile der Partikel bezogen auf den Anteil des thermoplastischen Kunststoffs, insbesondere ein thermoplastischer Hochleistungskunststoff, insbesondere PEEK, nach Gewichtsanteilen angegeben werden kann und beispielsweise das Partikel-Bindemittel-Massenverhältnis als P/B angegeben werden kann. Das Bindemittel stellt die bereits angesprochene Matrix aus thermoplastischem Kunststoff zur Aufnahme der Partikel dar.

[0033] Damit die jeweiligen Eigenschaften der Partikel in der zweiten, äußeren Schicht genutzt werden können und einen Effekt bewirken, sind Mindestmengen bevorzugtermaßen festzulegen. Andererseits können Anteile an Partikeln nicht beliebig erhöht werden. Die Partikel sind im Bindemittel, also der Matrix aus thermoplastischem Kunststoff, eingebunden. Je höher der Partikelanteil, desto stärker wirken sich zwar die Partikeleigenschaften aus, desto schlechter können aber die Partikel selbst in der Bindemittelmatrix, insbesondere im PEEK, gebunden werden. Für den Gesamt-partikelanteil gilt vorteilhafterweise:

$0,03 \leq P/B \leq 1,0$ bezogen auf die jeweiligen Masseverhältnisse. Ein bevorzugter Bereich für den Gesamtfüllstoffanteil liegt bei $0,15 \leq P/B \leq 0,35$.

[0034] Alternativ lässt sich für konkrete Partikel folgendes ebenfalls als bevorzugte Bereiche festlegen:

Partikel: Graphit: $0,3 \leq P_{\text{Graphit}}/B \leq 0,75$ mit P_{Graphit} als Masse des Graphit.

[0035] Partikel: Glashohlkugeln: $0,05 \leq P_{\text{Glashohlkugeln}}/B \leq 0,5$ mit $P_{\text{Glashohlkugeln}}$ als Masse der Glashohlkugeln.

[0036] Nach einer bevorzugten Überlegung der vorliegenden Erfindung definiert die erste, innere Schicht einen im Wesentlichen homogenen Überzug und damit eine Korrosionsschutzschicht für die von der ersten, inneren Schicht bedeckte metallische Fläche. Wie bereits erwähnt, kann die erste, innere Schicht als sehr homogene Schicht vorgesehen werden, die damit gut auf der zu beschichtenden metallischen Oberfläche haftet und insofern einen guten Korrosionsschutz bietet. Einen weiteren bevorzugten Aspekt der vorliegenden Erfindung definiert die zweite, äußere Schicht eine sich im Einlaufvorgang bereichsweise abtragende und/oder sich bereichsweise plastisch verformende, mithin eine sich an die konkreten Betriebsverhältnisse adaptierende Einlaufschicht. Die Einlaufschicht ist insofern derart ausgebildet, dass sie sich an die konkreten Betriebsverhältnisse anpassen und gegenüber einer Gegenfläche dafür sorgen kann, dass sich ein günstiges Spaltmaß einstellt.

[0037] Nach einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung der vorliegenden Erfindung umfassen die in der zweiten, äußeren Schicht aufgenommenen Partikel Graphit oder können aus Graphit gebildet sein. Die Partikel können aber auch die folgenden Materialien umfassen: hexagonales Bornitrid, Kohlenstoff-Nanoröhren (Carbon Nanotubes CNT), Talk (bzw. Talkum), Polytetrafluorethylen (PTFE), Perfluoralkoxy-Polymere (PFA), Fluorethylen-Propylen (FEP) und/oder ein anderes Fluor-Polymer.

[0038] Graphit, hexagonales Bornitrid, Kohlenstoff-Nanotubes und Talkum verringern jeweils als Festschmierstoff die Reibung. Die Materialien lassen sich relativ gut abtragen, d.h. es stellt sich ein günstiges Einlaufverhalten ein. Graphit ist relativ zur Bindemittelmatrix relativ weich. Auch Talkum ist vergleichsweise weich und wirkt als Gleitmittel mit geringer Scheuerwirkung. Es ist darüber hinaus wasserabweisend und abdichtend.

[0039] Fluorpolymere, wie PTFE, PFA, FEP (mit durchschnittlichen Korngrößen von ca. $2 \mu\text{m}$ bis $30 \mu\text{m}$) wirken ebenfalls als Fest- bzw. Trockenschmierstoffe. Sie werden dem thermoplastischen Kunststoff der Bindemittelmatrix, wie beispielsweise dem PEEK, in Pulverform beigemischt und lösen sich auch bei Nasslack bei den folgenden Prozessen zur Ausbildung der zweiten, äußeren Schicht nicht. Sie sind relativ zur Bindemittelmatrix eher weich und sorgen dadurch insbesondere für gute Schmier-, Gleit- und Antihafteigenschaften.

[0040] Die Partikel können alternativ oder zusätzlich aber auch folgende Materialien umfassen: Aluminiumdioxid (Al_2O_3), Siliziumcarbid (SiC), Siliziumdioxid (SiO_2) und/oder Glas (insbesondere Borsilikatglas).

[0041] Alternativ oder zusätzlich zu den Partikeln können in der zweiten äußeren Schicht aber auch Poren eingearbeitet sein. Unter Poren sind Hohlräume zu verstehen, die in mindestens einer, der größten Dimension eine Ausdehnung von mindestens $1 \mu\text{m}$ aufweisen. Die Einarbeitung derartiger Poren lässt sich im Herstellungsprozess beispielsweise durch Einmischung geeigneter Schäume (z.B. durch chemische Additive, die als Treibmittel wirken) erzielen. Die Poren können insgesamt eine offenporige bzw. eine geschlossenporige Struktur ausbilden. Die Poren haben vorteilhafterweise eine Größe von maximal einigen Mikrometern und sind weiter vorteilhafterweise innerhalb der zweiten äußeren Schicht zumindest im Wesentlichen homogen verteilt.

[0042] Porenähnliche Hohlräume lassen sich auch durch Mikro-Hohlkugeln mit thermoplastischer Hülle (plastic microspheres) erzeugen. Die thermoplastische Hülle umschließt dabei ein Gas, das sich durch Zufuhr von Wärme ausdehnt und das Volumen der Hohlkugel vergrößert. Derartige Mikro-Hohlkugeln aus einer Kunststoffhülle können als Partikel in expandierter bzw. nicht-expandierter Form vorliegen. Eine Polymermatrix mit darin eingebetteten hohlen Partikeln

wird in der Fachliteratur gelegentlich auch als syntaktischer Schaum (syntactic foam) bezeichnet. Nebenbei erwähnt sei, dass sich insbesondere mit plastic microspheres auf der Oberfläche der Beschichtung funktionelle Texturen erzeugen lassen. Damit lassen sich beispielsweise Spaltströmungen vorteilhaft beeinflussen.

[0043] Die Einarbeitung von Poren bzw. porenähnlichen Hohlräumen in die zweite, äußere Schicht bewirkt, dass sich die zweite, äußere Schicht beim Einlaufvorgang plastisch auf die jeweils benötigte Schichtdicke zusammendrücken kann und sich so eine relativ gute Spaltdimensionierung automatisch einstellt.

[0044] Nach einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung liegen die Partikel in mikroverkapselter Form vor. Bei der Mikroverkapselung wird mindestens eine erste Substanz (Wirkstoff) von einer zweiten Substanz (dem Hüllmaterial bzw. der Hülle) umgeben. Unterschieden werden monolithische Mikrokapseln mit einem festen Kern und Reservoir-Mikrokapseln mit flüssigem Kern. Die Hülle besteht beispielsweise aus Kunststoff. Vorteile mikroverkapselter Partikel sind insbesondere:

- Besseres Handling vor oder während der Verarbeitung (bessere Fließeigenschaften, weniger Staubentwicklung)
- Bessere Dispergierbarkeit. Eine wasserunlösliche Substanz kann in Mikrokapseln eingeschlossen werden, damit sie in einem wässrigen Medium dispergierbar ist. Auch eine elektrostatische Aufladung oder das Risiko einer allmählichen Verklumpung (Agglomeration) kann durch Verkapselung verringert werden.
- Möglichkeit der Kombination inkompatibler Substanzen
- Verhinderung von vorzeitigen chemischen Reaktionen mit anderen Mischungskomponenten
- Beeinflussung elektrostatischer Eigenschaften

[0045] In einer vorteilhaften Ausgestaltung werden in der zweiten, äußeren Schicht eingebettete mikroverkapselte Schmierstoffe bei mechanischer Beanspruchung vorwiegend in der Einlaufphase freigesetzt. Dadurch lässt sich der Einlaufvorgang beispielsweise zeitlich verlängern. Es entsteht weniger Reibungswärme und in der Folge ein geringeres Risiko von Ausbrüchen der zweiten, äußeren Schicht.

[0046] Selbstverständlich ist es denkbar, in die zweite, äußere Schicht noch weitere Partikel oder Pigmente, beispielsweise Titandioxid (TiO₂) einzuarbeiten.

[0047] In einer bevorzugten Ausführungsform beträgt die Schichtdicke der ersten, inneren Schicht vor dem Einlaufen zwischen 5 µm und 50 µm. Um eine Schichtdicke von beispielsweise 50 µm zu erreichen, kann die erste, innere Schicht auch in mehreren Schichten, beispielsweise zwei Schichten von jeweils 25 µm aufgebracht werden, um eine Gesamtschichtdicke von 50 µm für die erste, innere Schicht zu erreichen. Mit Schichtdicke ist hier immer die Trockenschichtdicke (DFT, Dry Film Thickness) bezeichnet.

[0048] Die Schichtdicke der zweiten, äußeren Schicht vor dem Einlaufen beträgt bevorzugtermaßen 10 µm bis 120 µm. Auch hier ist die Trockenschichtdicke (DFT, Dry Film Thickness) angesprochen. Auch die zweite, äußere Schicht kann in mehreren Schichten aufgebracht werden. Vorteilhaft ist es, die Schichtdicke umso dicker auszuführen, je größer der Durchmesser der Rotorschrauben ist. Die Gesamtschichtdicke von erster, innerer Schicht und zweiter, äußerer Schicht kann bevorzugtermaßen somit in einem Bereich von 15 µm bis 170 µm liegen.

[0049] Die Spalte und Schichtdicken sind idealerweise derart aufeinander abgestimmt, dass bei der Montage der Rotorschrauben im Verdichtergehäuse noch ein minimales Spiel zwischen den Rotorschrauben sowie zwischen den Rotorschrauben und dem Verdichtergehäuse vorhanden ist. Die montierten Rotorschrauben sollen sich gerade noch gegeneinander verdrehen lassen können. Ist die Schichtdicke so groß, dass ein Übermaß entsteht, so können die Rotorschrauben nur unter Kraftaufwendung und Zwang im Gehäuse montiert werden. Das Spiel bei der Montage ist vorteilhaft, da dann die Rotorschrauben definiert, beispielsweise über ein Synchrongetriebe, synchronisiert werden können. Dabei wird die relative Drehwinkelstellung der Rotorschrauben zueinander dauerhaft fixiert.

[0050] Die zweite, äußere Schicht haftet auf der ersten, inneren Schicht besser als direkt auf der metallischen Fläche des zu beschichtenden Bauteils, beispielsweise auf dem Grundkörper der Rotorschraube. Denn der thermoplastische Kunststoff, beispielsweise das PEEK, der zweiten Schicht verschmilzt dabei mit dem thermoplastischen Kunststoff, beispielsweise dem PEEK, der ersten Schicht. Mit zunehmendem Partikel-Anteil nimmt entsprechend der Anteil des thermoplastischen Kunststoffs der Bindemittel-Matrix, insbesondere des PEEK-Anteils, ab. In der Folge wird auch die Funktion des thermoplastischen Kunststoffs, insbesondere des PEEK, als Bindemittel-Matrix geschwächt.

[0051] Trüge man die zweite, äußere Schicht direkt auf die metallische Fläche, beispielsweise auf den Grundkörper der Rotorschraube, auf, so stünde mit zunehmendem Anteil der Partikel weniger Bindemittelmatrix-Anteil zur Verfügung, der sich mit der metallischen Oberfläche verbinden kann.

[0052] Bei der Inbetriebnahme des Schraubenverdichters kommt es - wie bereits erwähnt - aufgrund der Verdichtungstemperatur zur Wärmedehnung und zur Biegung der Rotorschrauben und in der Folge zu einer Berührung der sich drehenden Rotorschrauben sowie zwischen den sich drehenden Rotorschrauben und dem feststehenden Verdichtergehäuse. Bei dieser Berührung erfolgt ein teilweiser Abtrag der zweiten, äußeren Schicht. Die Rotorschrauben laufen sich ein und zwar lokal unterschiedlich stark und nur dort, wo sich Bauteile berühren. Abhängig von den jeweiligen Deformationen und Abweichungen von der Sollgeometrie der Rotorschrauben und ggf. des Verdichtergehäuses findet

5 somit ein unterschiedlich großes, teilweises Abtragen der zweiten, äußeren Schicht statt. Dieser Abtrag wird, wie bereits erwähnt, als Einlaufprozess bezeichnet und soll sich nur in der zweiten, äußeren Schicht, der Einlaufschicht, abspielen. Der Einlaufprozess findet im Wesentlichen nur einmal, bei der ersten Inbetriebnahme des Schraubenverdichters statt. Dabei ist es vorteilhaft, den Einlaufprozess behutsam durchzuführen. Vorteilhaft ist es, den Einlaufprozess auf den
 10 späteren Einsatzbereich des Schraubenverdichters abzustimmen. Besonders vorteilhaft für einen behutsamen Einlaufprozess ist ein drehzahlvariabler Antrieb (z.B. Permanentmagnetmotor oder Synchronreluktanzmotor) des Schraubenverdichters. Dieser ermöglicht es, während des Einlaufvorgangs die Antriebsdrehzahl definiert und zeitlich gestreckt bis zur maximal vorgesehenen Betriebsdrehzahl zu steigern. Im Gegensatz dazu würde ein Festdrehzahlantrieb (z.B. mit herkömmlichem Asynchronmotor ohne Frequenzumrichter) den Schraubenverdichter sehr schnell mit der bei trockener
 15 Verdichtung erforderlichen hohen Drehzahl antreiben mit dem Risiko, dass die Beschichtung aufgrund des dabei äußerst kurzen Einlaufvorgangs beschädigt werden könnte. Der Einlaufvorgang kann beispielsweise auf einem separaten Einlaufprüfstand stattfinden. Vorteilhafterweise ist jedoch bereits die Gesamtmaschine (Schraubenmaschine incl. Antrieb usw.) mit einem drehzahlvariablen Antrieb ausgerüstet, sodass der Einlaufvorgang während der erstmaligen Inbetriebnahme der für den Kunden vorgesehenen Maschine stattfinden kann. Der aufwändige Zwischenschritt (Montage und
 20 Demontage auf dem Einlaufprüfstand) könnte somit entfallen. Auf diese Weise kann ein unnötig hoher Abtrag der zweiten, äußeren Schicht vermieden werden, was ansonsten zu einer erhöhten unerwünschten Rückströmung entgegen der Förderrichtung führen würde.

[0053] Die in der zweiten, äußeren Schicht aufgenommenen harten bzw. abrasiven Partikel sorgen dafür, dass das weiche Material des Reibpartners abgetragen wird. Vergleichsweise weiche Partikel (bezogen auf die Härte des
 25 thermoplastischen Kunststoffes, welcher die Bindemittelmatrix definiert) sorgen dafür, dass die zweite, äußere Schicht, in der sie sich befinden, besonders schnell und einfach durch einen härteren Reibpartner abgetragen werden kann. In Kontaktbereichen im Profilbereich der Rotorabschnitte mit im Betrieb keinen bzw. geringen Relativgeschwindigkeiten der beiden Rotorschrauben zueinander (d.h. in oder nahe der Wälzkreise bzw. Wälzbereiche) treten gleichzeitig hohe Flächenpressungen auf, so dass beispielsweise die dünnwandigen Mikro-Glashohlkugeln in der zweiten, äußeren
 30 Schicht vorteilhafterweise aufbrechen und damit für den nötigen Abrieb bzw. Schichtdickenverlust in der zweiten, äußeren Schicht auf beiden Rotorschrauben sorgen. Nach einem bevorzugten Aspekt der vorliegenden Erfindung unterstützen die beim Aufbrechen entstehenden scharfen Bruchkanten der Mikro-Glashohlkugeln den abrasiven Prozess. Ein Schichtdickenverlust lässt sich auch durch in der zweiten, äußeren Schicht eingeschlossene Poren erzielen, wobei hier eine plastische Verformung durch Kompression bzw. Kollabieren der Poren eintritt.

[0054] Dadurch wird ein unerwünschtes ständiges Drücken der Rotorschrauben gegeneinander verhindert. Dies wirkt sich unter anderem günstig auf die Lebensdauer der Beschichtung sowie auf die Lebensdauer der Lager aus. Insgesamt wird durch diese Anpassbarkeit der zweiten, äußeren Beschichtung gerade im oder nahe des Wälzbereichs der Schraubenrotoren in vorteilhafter Weise die Laufruhe des Schraubenverdichters verbessert.

[0055] In Kontaktbereichen der Rotorschrauben mit vergleichsweise großen Relativgeschwindigkeiten zueinander, d.h. in Bereichen mit zunehmendem radialen Abstand zu den Wälzkreisen, lassen sich weiche Partikel, wie beispielsweise Graphit, aufgrund der großen Relativgeschwindigkeiten der Reibpartner zueinander relativ einfach abtragen, d.h. die zweite, äußere Schicht läuft auch in diesen Bereichen gut ein. Gerade Graphit hat darüber hinaus auch den Vorteil, dass es vergleichsweise kostengünstig ist sowie auf der Gegenfläche nicht aufschmiert.

[0056] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung ist der Grundkörper der Rotorschraube aus Stahl und/oder Gusseisen gebildet.

[0057] Erfindungsgemäß ist es weiterhin vorteilhaft, neben der Profilfläche bzw. neben den Profilflächen auch unter Umständen weitere Abschnitte der einen oder beider Rotorschrauben sowie des Verdichtergehäuses in entsprechender Weise mehrschichtig zu beschichten.

[0058] Hinsichtlich der Rotorschraube selbst können noch die Stirnflächen mit einer ersten, inneren Schicht sowie einer zweiten, äußeren Schicht beschichtet sein, wobei erste, innere Schicht und zweite, äußere Schicht beide einen thermoplastischen Kunststoff umfassen bzw. aus diesen gebildet sind und die zweite, äußere Schicht einen Einlaufvorgang unterstützende Partikel oder Poren aufweist, der thermoplastische Kunststoff eine Matrix zur Aufnahme der Partikel bzw. zur Ausbildung der Poren definiert. Es kann aber auch vorgesehen sein, dass nur eine der beiden Stirnfläche, vorzugsweise nur die druckseitige Stirnfläche, wie vorstehend beschrieben sowohl mit erster, innerer Schicht und zweiter,
 45 äußerer Schicht, die gegenüberliegende Stirnfläche hingegen nur mit der ersten, inneren Schicht beschichtet ist.

[0059] Weiterhin können Abschnitte der Wellenenden noch mit thermoplastischem Kunststoff gemäß der ersten, inneren Schicht überzogen sein. Vorteilhafterweise sind allerdings Abschnitte der Wellenenden auch unbeschichtet, d.h. ohne eine Schicht aus thermoplastischem Kunststoff gemäß der vorliegenden Erfindung versehen. Eine etwaige andere Beschichtung dieser Abschnitte ist hiervon unbenommen.

[0060] Die funktionalen Bereiche eines Verdichtergehäuses setzen sich im Wesentlichen zusammen aus einem Saugbereich, der Rotorbohrung, einem Druckbereich sowie Dichtungs- und Lagersitzen. Im Falle eines Schraubenverdichters strömt das Prozessmedium, beispielsweise die zu verdichtende Luft, vom Saugbereich zur Rotorbohrung und durch ein Druckfenster weiter zum Druckbereich.

[0061] Der Saugbereich befindet sich einlassseitig am Verdichtergehäuse und erstreckt sich von einem Saugstutzen des Verdichterhauses bis zur Rotorbohrung. In der Rotorbohrung, die zwei auf die Rotorschrauben abgestimmte Teilbohrungen umfasst, sind die Rotorschrauben mit jeweils sehr kleinen Spalten (radiale Gehäusespalte) gelagert und bilden innerhalb des Verdichtungsraums Arbeitskammern aus. Als Verdichtungsraum wird der durch die Rotorbohrung definierte Innenraum im Verdichtergehäuse bezeichnet. Eine ebene Stirnfläche im Verdichtergehäuse mit sehr kleinem axialem Spalt zu den beiden druckseitigen Rotorstirnflächen wird als druckseitige Gehäusestirnfläche bezeichnet. Entsprechend wird die Stirnfläche im Verdichtergehäuse mit kürzestem axialem Abstand zu den saugseitigen Rotorstirnflächen als saugseitige Gehäusestirnfläche bezeichnet.

[0062] Der Druckbereich erstreckt sich vom Ende des Verdichtungsraums bis zu einem Druckstutzen des Verdichterhauses.

[0063] Dichtungssitze im Verdichtergehäuse (gehäuseseitige Dichtungssitze) dienen zur Aufnahme von Dichtungen, konkret Luft- bzw. Fördermediumdichtungen und Öldichtungen. Im Folgenden soll unter dem Begriff Luftdichtung stets auch eine Dichtung für andere Fördermedien mit verstanden werden. Ebenso soll unter dem Begriff "Öldichtung" stets auch eine Dichtung für andere Lagerschmiermittel mit verstanden werden.

[0064] In Lagersitzen im Verdichtungsgehäuse sind Lager (z.B. Wälzlager) für die beiden Rotorschrauben montiert. Weiterhin sind auch auf den Wellenenden der Rotorschrauben Dichtungssitze (rotorseitige Dichtungssitze) vorgesehen. Dabei wird zwischen Dichtungssitzen für Luftdichtungen und Dichtungssitzen für Öldichtungen unterschieden, die typischerweise nebeneinander auf den Wellenenden der Rotorschrauben angeordnet sind. Die Dichtungssitze für die Luftdichtungen befinden sich beidseitig der Rotorschraube in unmittelbarer Nähe zur saugseitigen und zur druckseitigen Rotorstirnfläche. Daran anschließend und demzufolge weiter von den Rotorstirnflächen entfernt sind die Dichtungssitze für die Öldichtungen angeordnet.

[0065] Die Öldichtungen verhindern ein Eindringen von Öl aus dem Lagerbereich in den Verdichtungsraum des Schraubenverdichters. Die Luftdichtungen verhindern hingegen ein Austreten der verdichteten Luft bzw. des verdichteten Förderfluids aus dem Verdichtungsraum.

[0066] Weiterhin sind noch Lagersitze auf den Wellenenden, auf denen sich beispielsweise die Wälzlager befinden, vorgesehen. Die Lagersitze schließen sich meist an die Dichtungssitze an.

[0067] Vorteilhaft ist es, zusätzlich - wie zum Teil bereits erwähnt - zur Beschichtung der Profilfläche der Rotorschrauben auch weitere Abschnitte der Rotorschrauben sowie das Verdichtergehäuse zu beschichten. Der gesamte Innenbereich des Verdichterhauses, der mit dem zu fördernden Fluid, beispielsweise der zu komprimierenden Luft in Kontakt kommt, kann mit einer ersten, inneren Schicht, die einen thermoplastischen Kunststoff umfasst bzw. aus diesem gebildet ist, beschichtet sein. Dieser zu beschichtende Bereich besteht aus

- dem Saugbereich (vom Saugstutzen des Schraubenverdichters bis zum Beginn des Verdichtungsraums),
- der Rotorbohrung mit den Teilabschnitten für beide Rotorschrauben,
- den beiden Gehäusestirnflächen (saugseitige und druckseitige Gehäusestirnfläche),
- dem Druckbereich (vom Ende des Verdichtungsraums bis zum Druckstutzen des Schraubenverdichters)
- sowie den Dichtungssitzen.

[0068] Die Rotorbohrung mit den beiden Teilabschnitten für beide Rotorschrauben kann vorteilhafterweise zusätzlich zur ersten, inneren Schicht mit der erfindungsgemäßen zweiten, äußeren Schicht, die einen Einlaufvorgang unterstützende Partikel oder Poren aufweist und bei der der thermoplastische Kunststoff eine Matrix zur Aufnahme der Partikel bzw. zur Ausbildung der Poren definiert, beschichtet werden. Ebenso kann auf die druckseitige Gehäusestirnfläche eine derartige zweite, äußere Schicht appliziert werden.

[0069] Saugbereich und Druckbereich können auch mit einer derartigen zweiten, äußeren Schicht versehen werden. Es ist jedoch alternativ auch möglich, auf den Saugbereich und den Druckbereich anstelle der hier vorgeschlagenen ersten, inneren Schicht bzw. der Kombination der hier vorgeschlagenen ersten, inneren und zweiten, äußeren Schicht eine andere Korrosionsschutzschicht aufzubringen. Auf die Dichtungssitze im Gehäuse kann ebenfalls eine erfindungsgemäße zweite, äußere Schicht aufgebracht werden. Alternativ zur Beschichtung der Dichtungssitze mit erster, innerer Schicht bzw. erster, innerer Schicht und zweiter, äußerer Schicht ist es auch möglich, dass die Dichtungssitze im Gehäuse unbeschichtet bleiben. "Unbeschichtet" ist hier in dem Sinne zu verstehen, dass die Dichtungssitze im Gehäuse nicht mit einer ersten, inneren Schicht und/oder einer zweiten äußeren Schicht, also nicht mit einer Beschichtung nach der vorliegenden Erfindung versehen sind. Die Lagersitze im Gehäuse dürfen hingegen nicht beschichtet werden. Auch hier gilt, dass die Lagersitze nicht mit einer erfindungsgemäßen Beschichtung versehen sein dürfen; davon unbenommen ist eine etwaige andere, insbesondere filmartige Beschichtung etwa zur Erhöhung der Gleiteigenschaften.

[0070] Die Funktion der Einlaufschicht zwischen Rotorschraube als bewegtem Teil und Verdichtungsraum des Verdichterhauses als ruhendem Teil verläuft ganz entsprechend wie bereits weiter oben beschrieben, d.h. bei Inbetriebnahme des Schraubenverdichters kommt es aufgrund der Verdichtungstemperatur zu Wärmedehnung von Rotorschrauben und Verdichtergehäuse sowie zur Biegung der Rotorschrauben. In der Folge kann es beispielsweise zu einer

EP 3 399 191 B1

Berührung von Rotorschrauben und Rotorbohrung oder aber von Rotorstirnflächen und Gehäusestirnflächen, insbesondere von druckseitiger Rotorstirnfläche und druckseitiger Gehäusestirnfläche kommen. Bei dieser Berührung erfolgt der teilweise Abtrag der zweiten, äußeren Beschichtung, wie erfindungsgemäß beabsichtigt. Die Stirnflächen laufen sich entsprechend ein. Es ist hier zu berücksichtigen, dass der druckseitige axiale Stirnspalt für eine effiziente Verdichtung besonders wichtig ist. Dieser Stirnspalt sollte idealerweise sehr klein dimensioniert sein. Der druckseitige axiale Stirnspalt wird bei der Montage der Rotorschrauben im Verdichtergehäuse definiert eingestellt (meist mit einer Genauigkeit im Bereich weniger 1/100 mm und z.B. mittels Distanzscheiben). Ebenso ist es für eine effiziente Verdichtung besonders wichtig, dass der radiale Spalt zwischen Rotorschrauben und Rotorbohrung sehr gering ist.

[0071] Als mögliche Ausführungsbeispiele sind insbesondere die nachstehenden Beschichtungsvarianten denkbar, wobei diese Auflistung keineswegs abschließend ist und auch weitere Kombinationen denkbar erscheinen:

15

20

25

30

35

40

45

50

55

Rotorschraube 1 (z.B. Nebenrotor) (Profilbereich)		Rotorschraube 2 (z.B. Hauptrotor) (Profilbereich)		Druckseitige Rotorstirnfläche	Saugseitige Rotorstirnfläche	Rotorbohrung im Gehäuse	Druckseitige Gehäusestirnfläche
Variante 1	Erste innere Schicht + Zweite äußere Schicht (hart)	Erste innere Schicht + Zweite äußere Schicht (hart)	Erste innere Schicht + Zweite äußere Schicht (hart) ODER Erste innere Schicht + Zweite äußere Schicht (weich) ODER Erste innere Schicht	Erste innere Schicht + Zweite äußere Schicht (hart) ODER Erste innere Schicht + Zweite äußere Schicht (weich) ODER Erste innere Schicht	Erste innere Schicht + Zweite äußere Schicht (hart) ODER Erste innere Schicht + Zweite äußere Schicht (weich) ODER Erste innere Schicht	Erste innere Schicht + Zweite äußere Schicht (hart) ODER Erste innere Schicht + Zweite äußere Schicht (weich) ODER Erste innere Schicht	Erste innere Schicht + Zweite äußere Schicht (hart) ODER Erste innere Schicht + Zweite äußere Schicht (weich) ODER Erste innere Schicht
Variante 2	Erste innere Schicht + Zweite äußere Schicht (weich)	Erste innere Schicht + Zweite äußere Schicht (weich)					
Variante 3	Erste innere Schicht + Zweite äußere Schicht (hart)	Erste innere Schicht + Zweite äußere Schicht (weich)					
Variante 4	Erste innere Schicht	Erste innere Schicht + Zweite äußere Schicht (weich)					

[0072] In einer bevorzugten Ausgestaltung der vorliegenden Erfindung ist der Schraubenverdichter ein ölfrei verdichtender, insbesondere trocken verdichtender Schraubenverdichter.

[0073] Bei dem bereits angesprochenen Beschichtungsverfahren besteht die Kernüberlegung darin, dass auf eine erste, innere Schicht, die einen thermoplastischen Kunststoff umfasst bzw. aus diesem gebildet ist, eine zweite, äußere Schicht aufgebracht wird, wobei die zweite, äußere Schicht ebenfalls einen thermoplastischen Kunststoff umfasst bzw. aus diesem gebildet ist und wobei in der zweiten, äußeren Schicht einen Einlaufvorgang unterstützende Partikel oder Poren eingebettet sind und der thermoplastischen Kunststoff eine Matrix zur Aufnahme der Partikel bzw. zur Ausbildung der Poren definiert. Die angegebenen Schritte laufen bevorzugtermaßen auch in der angegebenen Reihenfolge ab.

[0074] Auf die verschiedenen Materialmöglichkeiten für den thermoplastischen Kunststoff, bei dem es sich um einen sog. hochleistungsthermoplastischen Kunststoff handelt, wurde bereits im Zusammenhang mit den vorrichtungstechnischen Aspekten der vorliegenden Erfindung eingegangen. Auf diese Ausführungen wird hier verwiesen. Ganz generell wird nochmals festgehalten, dass es sich bei dem thermoplastischen Kunststoff um ein Polyaryletherketon (PAEK) handeln kann, wobei Polyetheretherketon (PEEK) als besonders bevorzugt angesehen wird.

[0075] Die Beschichtungen können beispielsweise als wasserbasierende Nasslackbeschichtung mit üblichem Spritzbeschichtungsequipment (z.B. HVLP-Pistolen, elektrostatisch, Airless) oder elektrostatisch als Pulverbeschichtung manuell oder robotergesteuert appliziert werden. Robotergesteuertes Lackieren bietet den Vorteil einer hohen Prozesssicherheit mit gleichmäßigen Schichtdicken und kleinen Toleranzen.

[0076] Hinsichtlich der Herstellung von Pulverlack oder Nasslack ist im Hinblick auf die hier vorgesehene Beschichtung Folgendes anzumerken:

- Pulverlack: Partikel werden in Pulverform dem ebenfalls meist pulverförmig vorliegenden thermoplastischen Kunststoff, insbesondere dem pulverförmig vorliegenden PEEK, beigemischt.

- Nasslack: Partikel und thermoplastischer Kunststoff, insbesondere PEEK werden jeweils in Pulverform, vorteilhafterweise in Wasser mit Dispergiermittel gemischt. Die Partikel und das PEEK-Pulver lösen sich in der Dispersion nicht auf, sondern es entsteht eine Suspension. Insbesondere bei der Anwendung eines Nasslackverfahrens für die Aufbringung der ersten inneren Schicht muss ein Ablüften der ersten Schicht vorgesehen werden. Dieses Ablüften der ersten Schicht umfasst bevorzugterweise ein Aufheizen der beschichteten nassen Bauteile auf ca. 120 °C zur Verdunstung des Wassers über einen vorgegebenen Zeitraum. Erst dann sollte die zweite, äußere Schicht im nassen oder trockenen Zustand aufgebracht werden.

[0077] Die erste, innere Schicht und/oder die zweite, äußere Schicht können als Nasslack oder Pulverlack aufgebracht werden. Nach einem weiter bevorzugten Aspekt der Erfindung wird die erste, innere Schicht und die zweite, äußere Schicht eingebrannt, derart, dass der thermoplastische Kunststoff aufschmilzt. Insofern kann das Einbrennen nach Aufbringen jeder Schicht erfolgen; alternativ ist es aber auch denkbar, zunächst die zwei oder mehreren Schichten aufzubringen und erst anschließend in einem einzigen Brennvorgang einzubrennen.

[0078] Die erste, innere Schicht und die zweite, äußere Schicht werden bevorzugterweise bei Temperaturen von ca. 360 °C bis 420 °C solange eingebrannt, bis der thermoplastische Kunststoff, insbesondere das PEEK aufgeschmolzen ist und eine homogene Schicht bildet, die auf der zu beschichtenden Oberfläche ausreichend haftet. Das Einbrennen kann insbesondere im Umluftofen oder induktiv erfolgen. Optional ist, wie bereits erwähnt, ein Einbrennen auch nach Aufbringen jeder Schicht möglich. Erwähnt werden sollte schließlich, dass es auch möglich ist, die Schichtdicke der zweiten, äußeren Schicht zu erhöhen und anschließend zum Einstellen einer gewünschten Schichtdicke nachzubehandeln, insbesondere nachzuschleifen.

[0079] Vor Aufbringen der ersten, inneren Schicht sollte die zu beschichtende metallische Fläche vorbehandelt werden. Diese Vorbehandlung umfasst vorzugsweise ein Entfetten und weiter vorzugsweise eine weitere Konditionierung der metallischen Flächen, beispielsweise durch Aufrauen der Oberflächen, durch Strahlen oder Ätzen oder durch Aufbringen einer Konversionsschicht definierenden Vorbehandlungsschicht, z.B. Phosphatieren oder Aufbringen einer Nanokeramik. So kann die Oberflächenvorbehandlung auch ein Sandstrahlen und eine anschließende chemische Reinigung mit geeignetem Lösungsmittel (z.B. alkalischer Reiniger, Aceton) umfassen, um eine gute Haftung der ersten, inneren Schicht zu begünstigen. Eine Entfettung kann vorteilhafterweise vor dem Sandstrahlen - durch Abbrennen bei hoher Temperatur (Pyrolyse) erfolgen.

[0080] Auf die entsprechend vorgereinigte metallische Oberfläche kann zunächst eine Nanokeramikbeschichtung (z.B. auf Titan- oder Zirkoniumbasis) aufgebracht werden. Nanokeramikbeschichtungen sind eine Weiterentwicklung der bekannten Phosphatierungen. Vorteile einer Nanokeramikbeschichtung gegenüber einer Phosphatierung sind insbesondere:

- Minimierung der Umweltbelastung,

- phosphatfrei ablaufender Prozess und
- insgesamt kostengünstigerer Prozess.

5 **[0081]** Bei der Nanokeramikbeschichtung handelt es sich insofern um eine spezielle Vorbehandlungsschicht, die als Unterschicht bezüglich der ersten, inneren Schicht und/oder der zweiten, äußeren Schicht angesehen werden kann. Es sind aber auch andere Schichten als Unterschichten denkbar.

[0082] Im Hinblick auf die Erfindung bzw. die beschriebenen Ausführungsbeispiele lässt sich Folgendes festhalten:

- 10 - Gutes Einlaufverhalten der zweiten, äußeren Schicht ermöglicht kleine Spalte zwischen den Rotorschrauben und dem Verdichtergehäuse und damit eine effizientere Verdichtung.
- Gleichzeitig wird ein sehr guter Korrosionsschutz durch die erste, innere Schicht gewährleistet und damit die Lebensdauer der derart beschichteten Bauteile verlängert.
- 15 - Das Einlaufen findet nur in der zweiten, äußeren Schicht statt; die erste, innere Schicht dient als Korrosionsschutz. Dadurch lassen sich die beiden Anforderungen Korrosionsschutz und Einlaufverhalten (gezielt getrennt voneinander) optimieren.
- 20 - PEEK ist für den Einsatz in Umgebungen mit Lebensmittelkontakt geeignet (FDA-konform). Auch die unterschiedlichen Partikel sind lebensmitteltauglich.
- PEEK ist umweltfreundlich: PEEK-Dispersionen sind meist auf Wasserbasis und haben sehr niedrige Anteile an flüchtigen, organischen Verbindungen (VOC). Die Applikation der unterschiedlichen Schichten ist ohne Gesundheitsrisiken und erscheint insbesondere nicht krebserregend.
- 25 - Es ist eine sehr gute Chemikalienbeständigkeit gegeben, was vor allem dann von Belang ist, wenn andere Gase als Luft verdichtet werden sollen bzw. wenn die Ansaugluft unter Umständen kontaminiert ist.
- 30 - Die Eigenschaften der Beschichtung bleiben bei Kontakt mit Wasser, Feuchtigkeit und Dampf unverändert. Im Vergleich zu anderen Fluorpolymerbeschichtungen hat gerade PEEK eine sehr geringe Wasseraufnahme, d.h. das Risiko eines Quellens der Beschichtung ist deutlich reduziert. Dieser Aspekt erscheint insbesondere für Schraubenverdichter, die nach dem Prinzip der Wasser-Mindermengeneinspritzung arbeiten, vorteilhaft.
- 35 - Es ergibt sich für das Betriebsverhalten des Schraubenverdichters eine hohe Laufruhe (die zweite, äußere Schicht gewährleistet ein gutes Einlaufverhalten; auch bei ständigem Reibkontakt entsteht kein unerwünschtes "Drücken" der Rotorschrauben gegeneinander).
- Darüber hinaus zeigt die zweite, äußere Schicht, die insbesondere auch die äußerste Schicht definiert, ein sehr geringes Anhaften, so dass kein Schmutz anhaftet, der zum Klemmen zwischen den Rotorschrauben oder zwischen Rotorschrauben und Verdichtergehäuse führen könnte.
- 40

[0083] Darüber hinaus hat die hier vorgeschlagene mehrschichtige Beschichtung eine hohe Temperaturbeständigkeit sowie gute Temperaturwechselfestigkeit.

45 **[0084]** Schließlich werden in einigen Bereichen (z.B. in der Tabakindustrie) fluorpolymerfreie Beschichtungen gefordert. Mit einem Teil der genannten Partikel lassen sich fluorpolymerfreie Beschichtungen realisieren.

[0085] Die Erfindung wird nachstehend auch hinsichtlich weiterer Merkmale und Vorteile anhand der Beschreibung von Ausführungsbeispielen und unter Bezugnahme auf die beiliegenden Zeichnungen näher erläutert. Hierbei zeigen:

- 50 Figur 1 einen Stirnschnitt eines erfindungsgemäßen Rotorschraubenpaars;
- Figur 2 zwei miteinander verzahnte Rotorschrauben in perspektivischer Ansicht;
- Figur 3 ein Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Rotorschraube, die hier konkret als Nebenrotor ausgebildet ist;
- 55 Figur 4 ein Ausführungsbeispiel einer erfindungsgemäßen Rotorschraube, die hier konkret als Hauptrotor ausgeführt ist;

- Figur 5 eine schematische Schnittansicht eines Schraubenverdichters;
- Figur 6 eine Explosionsdarstellung eines Schraubenverdichters;
- 5 Figur 7 eine schematische Ausführungsform der mehrschichtigen Beschichtung einer Rotorschraube vor dem Einlaufen;
- Figur 8 eine schematische Ausführungsform der mehrschichtigen Beschichtung einer Rotorschraube nach dem Einlaufen;
- 10 Figur 9 schematisch eine nur einschichtige Beschichtung eines Abschnitts einer Rotorschraube;
- Figur 10 eine alternative Ausführungsform einer mehrschichtigen Beschichtung einer Rotorschraube vor dem Einlaufen;
- 15 Figur 11 die Ausführungsform der mehrschichtigen Beschichtung einer Rotorschraube nach Figur 10 nach dem Einlaufen;
- Figur 12 einen Ablauf eines bevorzugten Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Beschichtungsverfahrens.
- 20

[0086] In Figur 1 ist ein Stirnschnitt eines erfindungsgemäßen Rotorschraubenpaars umfassend eine als Nebenrotor ausgebildete Rotorschraube 1 sowie eine als Hauptrotor ausgebildete Rotorschraube 2 gezeigt. Nur rein schematisch ist dargestellt, dass eine Profilfläche 12a, 12b der Rotorschraube 1, 2 jeweils mit einer ersten inneren Schicht 3 sowie mit einer zweiten, äußeren Schicht 4 beschichtet ist. Die Rotorschrauben 1, 2 kämmen miteinander, d.h. sie greifen mit ihren Zähnen ineinander ein. Die bereits angesprochenen Wälzkreise sind für die als Nebenrotor ausgebildete Rotorschraube 1 mit dem Bezugszeichen 22 und für die als Hauptrotor ausgebildete Rotorschraube 2 mit dem Bezugszeichen 21 kenntlich gemacht.

[0087] In Figur 2 sind die miteinander verzahnten Rotorschrauben 1, 2 in perspektivischer Ansicht dargestellt. Dabei greifen beide Rotorschrauben 1, 2 mit den bereits erwähnten Profilflächen 12a, 12b ineinander ein bzw. sind miteinander verzahnt bzw. verschraubt. Senkrecht zur jeweiligen Rotorschrauben-Drehachse werden die Profilflächen 12a, 12b jeweils endseitig durch Stirnflächen 5a, 5b, 5c, 5d begrenzt, wobei die Stirnfläche 5a eine druckseitige Stirnfläche der als Nebenrotor ausgebildeten Rotorschraube 1 und die Stirnfläche 5c eine saugseitige Stirnfläche bezeichnet. Bei der als Hauptrotor ausgebildeten Rotorschraube 2 ist die druckseitige Stirnfläche mit dem Bezugszeichen 5b und die saugseitige Stirnfläche mit dem Bezugszeichen 5d bezeichnet.

[0088] Über die Stirnflächen 5a, 5b, 5c, 5d vorstehend sind sich in axialer Richtung erstreckend vorstehende Wellenenden 30 ausgebildet, die jeweils paarweise für eine Rotorschraube 1, 2 eine Welle 16 ausbilden. An den Wellenenden 30 sind ein rotorseitiger Dichtungssitz 7b für eine Luftdichtung, ein rotorseitiger Dichtungssitz 7a für eine Öldichtung sowie ein rotorseitiger Lagersitz 9a, 9b ausgebildet. Dabei ist der rotorseitige Dichtungssitz 7b für eine Luftdichtung benachbart zur Stirnfläche 5a, 5b, 5c, 5d ausgebildet, wohingegen der rotorseitige Lagersitz 9a, 9b mehr zum distalen Ende des Wellenendes 30 hin vorgesehen ist. Zwischen dem rotorseitigen Lagersitz 9a, 9b und dem rotorseitigen Dichtungssitz für eine Luftdichtung 7b ist der bereits angesprochene rotorseitige Dichtungssitz 7a für eine Öldichtung vorgesehen.

[0089] Figur 3 zeigt ein Ausführungsbeispiel einer als Nebenrotor ausgebildeten Rotorschraube 1, wie sie an sich bereits anhand der Figur 2 beschrieben wurde. Auch hier ist die Profilfläche 12a mit einer ersten, inneren Schicht 3 sowie einer zweiten, äußeren Schicht 4 beschichtet. Auch die beiden Stirnflächen 5a, 5c sind mit einer ersten inneren Schicht 3 und einer zweiten, äußeren Schicht 4 beschichtet. Die Wellenenden hingegen sind lediglich zwischen den Stirnflächen 5a, 5c und den Lagersitzen 9a mit einer ersten inneren Schicht 3 (unter Weglassung einer zweiten, äußeren Schicht 4) beschichtet, wobei die Lagersitze 9a allerdings frei, d.h. ohne eine Beschichtung entsprechend der ersten, inneren Schicht 3, also ohne Beschichtung mit einem thermoplastischen Kunststoff ausgebildet sind.

[0090] Figur 4 zeigt ein Ausführungsbeispiel einer als Hauptrotor ausgebildeten Rotorschraube 2, wie sie an sich bereits anhand der Figur 2 beschrieben wurde. Auch hier ist die Profilfläche 12b mit einer ersten, inneren Schicht 3 sowie einer zweiten, äußeren Schicht 4 beschichtet. Auch die beiden Stirnflächen 5b, 5d sind mit einer ersten inneren Schicht 3 und einer zweiten, äußeren Schicht 4 beschichtet. Die Wellenenden hingegen sind lediglich zwischen den Stirnflächen 5b, 5d und den Lagersitzen 9b mit einer ersten inneren Schicht 3 (unter Weglassung einer zweiten, äußeren Schicht 4) beschichtet, wobei die Lagersitze 9a allerdings frei, d.h. ohne eine Beschichtung entsprechend der ersten, inneren Schicht 3, also ohne Beschichtung mit einem thermoplastischen Kunststoff ausgebildet sind.

[0091] Figur 5 zeigt eine schematische Schnittansicht eines Schraubenverdichters 20 mit einem Verdichtergehäuse 11 sowie darin gelagert zwei miteinander paarweise verzahnte Rotorschrauben 1, 2, nämlich eine als Hauptrotor aus-

gebildete Rotorschraube 2 sowie eine als Nebenrotor ausgebildete Rotorschraube 1. Die Rotorschrauben 1, 2 sind jeweils über geeignete Lager 15 drehbar in einem durch eine Rotorbohrung 19 definierten Verdichtungsraum 18 im Verdichtergehäuse 11 in einem gehäuseseitigen Lagersitz 10 gelagert. Dichtungen 14b und 14c, die jeweils in einem gehäuseseitigen Dichtungssitz 8a für die Öldichtung und in einem gehäuseseitigen Dichtungssitz 8b für die Luftdichtung aufgenommen sind, verhindern einerseits das Austreten von verdichteter Luft aus dem Verdichtungsraum 18 sowie andererseits das Eindringen von Öl in den Verdichtungsraum 18. Der Verdichtungsraum 18 im Verdichtergehäuse 11 wird seitlich durch eine Rotorbohrung 18, die zwei an die Durchmesser der Rotorschrauben 1, 2 angepasste Teilbohrungen aufweist, begrenzt. Stirnseitig wird der Verdichtungsraum durch eine druckseitige Gehäusestirnfläche 6a und eine saugseitige Gehäusestirnfläche 6b begrenzt. Vorzugsweise sind die druckseitige Gehäusestirnfläche 6a, die saugseitige Gehäusestirnfläche 6b sowie die Rotorbohrung 18 ebenfalls mit der erfindungsgemäßen mehrschichtigen Beschichtung umfassend eine erste innere Schicht 3 sowie eine zweite äußere Schicht 4 versehen.

[0092] Über ein Synchrongetriebe 13 sind die Rotorschrauben 1, 2 in ihrer Drehposition gegeneinander festgelegt und ihre Profilflächen 12a, 12b, insbesondere ihre jeweiligen Rotorflanken werden so auf Abstand gehalten. Eine Antriebsleistung kann auf die Welle 16 der als Hauptrotor ausgebildeten Rotorschraube 2 beispielsweise mittels eines Motors (nicht dargestellt) über eine Kupplung (nicht dargestellt) aufgebracht werden. Am saugseitigen Ende der paarweise ineinander verschraubten Rotorschrauben 1, 2 ist ein Saugbereich 23 des Schraubenverdichters erkennbar.

[0093] In Figur 6 ist eine Ausführungsform eines Schraubenverdichters 20 in Explosionsdarstellung veranschaulicht. Das Verdichtergehäuse 11 begrenzt den Verdichtungsraum 18. Über einen Saugstutzen 27 wird Umgebungsluft angesaugt und gelangt in den Saugbereich 23 des Schraubenverdichters. Nach der Verdichtung über die Rotorschrauben 1, 2 wird die komprimierte Druckluft über einen Druckstutzen 28 aus dem Verdichtergehäuse 11 ausgestoßen.

[0094] In Figur 7 ist die mehrschichtige Beschichtung auf der Profilfläche 12a der Rotorschraube 1 entlang der Linie A-A in Figur 3 veranschaulicht. Auf einen Grundkörper 24 der Rotorschraube 1 ist zunächst die erste, innere Schicht 3 aufgebracht. Auf die erste, innere Schicht 3 ist - diese komplett überdeckend - die zweite, äußere Schicht 4 aufgebracht. Die zweite, äußere Schicht 4 umfasst erfindungsgemäß einen Einlaufvorgang unterstützende Partikel 25, beispielsweise dünnwandige Mikro-Glashohlkugeln. Alternativ oder zusätzlich können auch Poren 32 eingearbeitet sein, was die plastische Komprimierbarkeit der zweiten, äußeren Schicht unterstützt.

[0095] Figur 8 zeigt die mehrschichtige Beschichtung entlang der Linie A-A bei einer Rotorschraube 1 nach Figur 3 nach dem Einlaufvorgang.

[0096] Figur 9 zeigt eine nur einteilige Beschichtung auf dem Wellenende 30 der Rotorschraube 1, die im Bereich des rotorseitigen Dichtungssitzes 7a für die Öldichtung und dem rotorseitigen Dichtungssitz 7b für die Luftdichtung beide Dichtungssitze 7a, 7b überdeckend vorgesehen ist. Konkret ist ein Ausschnitt entlang der Linie B-B in Figur 3 dargestellt. Die erste, innere Schicht ist hier den Grundkörper 24 überdeckend angeordnet und bietet so einen guten und zuverlässigen Korrosionsschutz.

[0097] Figur 10 zeigt eine alternative mehrschichtige Beschichtung für eine Profilfläche 12a, 12b bei einer Rotorschraube 1, 2. Anstelle der anhand von Figur 8 beschriebenen Partikel 25 sind in der zweiten, äußeren Schicht Poren 32 eingebettet, die beispielsweise durch einen Aufschäumvorgang vor oder während des Applizierens der zweiten, äußeren Schicht, beispielsweise im Nasslackverfahren, eingearbeitet wurden.

[0098] Figur 11 zeigt die mehrschichtige Beschichtung nach Figur 10 nach einem Einlaufvorgang. Es ist zu erkennen, dass einige Schichtbereiche abgetragen bzw. komprimiert sind. Auch einige der Poren 32 sind mit Teilen der Schicht abgetragen oder aufgrund des aufgenommenen Gegendrucks komprimiert, so dass insgesamt eine plastische Deformation der zweiten, äußeren Schicht 4 als Einlaufschicht erwirkt wurde.

[0099] Figur 12 zeigt noch schematisch ein Ablaufdiagramm für eine mögliche Ausgestaltung des Beschichtungsverfahrens. In einer Schrittabfolge S01 bis S04 erfolgt eine Vorbehandlung der zu beschichtenden metallischen Oberfläche, beispielsweise der zu beschichtenden Oberfläche einer Rotorschraube. Dabei umfasst der Schritt S01 eine Entfettung der Oberfläche durch Abbrennen bei hoher Temperatur (Pyrolyse). Im anschließenden Schritt S02 wird die Oberfläche gestrahlt, insbesondere sandgestrahlt. Nach dem Strahlen schließt sich ein Schritt S03 an, indem die Oberfläche erneut auf chemischem Wege, beispielsweise mittels Aceton gereinigt wird. In Schritt S04 wird beim vorliegend beschriebenen Ausführungsbeispiel anschließend eine Nanokeramikbeschichtung aufgebracht.

[0100] Es schließt sich ein Auftragen der ersten, inneren Schicht 3 an, wobei die erste, innere Schicht 3 beim vorliegenden Ausführungsbeispiel als Nasslack aufgebracht wird. Es sind aber auch alternative Verfahren denkbar, beispielsweise eine Aufbringung im trockenen Zustand als Pulverlack. Dabei wird der Nasslack für die erste, innere Schicht zuvor vorbereitet, wobei der thermoplastische Kunststoff in Form von PEEK jeweils in Pulverform in Wasser mit Dispergiermittel gemischt wird. Es entsteht eine Suspension, die im Schritt S10 auf die vorbehandelte Oberfläche aufgetragen wird. In einem sich anschließenden Schritt S11 wird der aufgetragene Nasslack getrocknet bzw. abgelüftet. Es erfolgt hierzu in Schritt S11 ein Aufheizen der mit dem Nasslack für die erste Schicht beschichteten Rotorschraube auf ca. 120 °C zur Verdunstung des Wassers. In einem Schritt S12, der optional auch entfallen kann, erfolgt ein Einbrennen der ersten Schicht. Das Einbrennen erfolgt bei Temperaturen von ca. 360 °C bis 420 °C, beispielsweise in einem Umluftofen oder induktiv, bis das PEEK aufgeschmolzen ist und sich eine homogene Schicht ausgebildet hat.

[0101] In weitgehend zu den Schritten S10, S11, S12 analogen Schritten S20, S21, S22 erfolgt das Aufbringen der zweiten Schicht. Hierzu wird erneut ein Nasslack vorbereitet, wobei zweckmäßigerweise - jedoch keinesfalls zwingend - der gleiche thermoplastische Kunststoff wie beim Aufbringen der ersten Schicht - umfassend bzw. aufweisend PEEK als thermoplastischen Kunststoff - Verwendung findet. Hierzu wird das PEEK in Pulverform mit den den Einlaufvorgang unterstützenden Partikeln, beispielsweise den dünnwandigen Mikro-Glashohlkugeln, insbesondere aus Borsilikatglas, zusammen mit Wasser und Dispergiermittel gemischt. Es erfolgt ein Auftragen der zweiten, äußeren Schicht 4 im Schritt S20 direkt auf die erste, innere Schicht 3, die bei dem vorliegenden Ausführungsbeispiel bereits eingebrannt ist. Es ist aber auch möglich, den Schritt S12, nämlich das Einbrennen der ersten Schicht, beiseite zu lassen und erste, innere Schicht 3 sowie zweite, äußere Schicht 4 gemeinsam einzubrennen. An das Auftragen der zweiten, äußeren Schicht im Schritt S20 schließt sich auch hier ein Schritt des Trocknens bzw. Ablüften der zweiten, äußeren Schicht an. Hierzu wird die zu beschichtende Rotorschraube in Schritt S21 erneut auf ca. 120 °C aufgeheizt bzw. auf dieser Temperatur gehalten. Nach ausreichender Trocknung der zweiten, äußeren Schicht erfolgt im Schritt S22 ein Einbrennen der zweiten, äußeren Schicht bei Temperaturen von ca. 360 °C bis 420 °C, beispielsweise in einem Umluftofen oder auf induktive Weise.

[0102] Optional kann sich noch ein (nicht dargestellter) Schritt S23 anschließen, der bevorzugterweise aber vermieden werden soll. In einem Schritt S23 könnte ein Nachschleifen der zweiten, äußeren Schicht 4 erfolgen, um bei Ausbildung der zweiten, äußeren Schicht mit Übermaß eine jeweils gewünschte Dimensionierung durch Nachschleifen zu erzielen. Wie bereits erwähnt, wird es allerdings bevorzugt, die jeweils gewünschte Dimensionierung des Schichtaufbaus bereits mit den Verfahren, wie anhand von Figur 12 dargestellt, zu erzielen.

Bezugszeichenliste

[0103]

1, 2	Rotorschraube
3	erste, innere Schicht
4	zweite äußere Schicht
5a, 5b, 5c, 5d	Stirnflächen
6a	druckseitige Gehäusestirnfläche
6b	saugseitige Gehäusestirnfläche
7a	rotorseitiger Dichtungssitz für eine Luftdichtung
7b	rotorseitiger Dichtungssitz für eine Öldichtung
8a	gehäusesseitiger Dichtungssitz für eine Öldichtung
8b	gehäusesseitiger Dichtungssitz für eine Luftdichtung
9a, 9b	rotorseitiger Lagersitz
10	gehäusesseitiger Lagersitz
11	Verdichtergehäuse
12a, 12b	Profilfläche
13	Synchrongetriebe
14b	Dichtung
14c	Dichtung
15	Lager
16	Welle
18	Verdichtungsraum
19	Rotorbohrung
20	Schraubenverdichter
21	Wälzkreis (Hauptrotor)
22	Wälzkreis (Nebenrotor)
23	Saugbereich
24	Grundkörper
25	Partikel
27	Saugstutzen
28	Druckstutzen
30	vorstehende Wellenenden
32	Poren

Patentansprüche

1. Schraubenverdichter umfassend ein Verdichtergehäuse (11) mit zwei darin achsparallel gelagerten Rotorschrauben (1, 2), die in einem Verdichtungsraum (18) miteinander kämmen, über einen Antrieb antreibbar und in ihrer Drehbewegung zueinander synchronisiert sind, wobei die Rotorschrauben (1, 2) jeweils einen ein- oder mehrteiligen Grundkörper (24) mit zwei Stirnflächen (5a, 5b, 5c, 5d) und einer dazwischen verlaufenden Profilfläche (12a, 12b) sowie über die Stirnflächen (5a, 5b, 5c, 5d) vorstehende Wellenenden (30) aufweisen, wobei mindestens die Profilfläche (12a, 12b) mehrschichtig, umfassend eine erste, innere Schicht (3) sowie eine zweite, äußere Schicht (4) ausgebildet ist, **dadurch gekennzeichnet, dass** die erste, innere Schicht (3) und die zweite, äußere Schicht (4) beide einen thermoplastischen Kunststoff umfassen bzw. aus diesem ausgebildet sind, wobei in der zweiten, äußeren Schicht (4) einen Einlaufvorgang unterstützende Partikel (25) oder Poren (32) eingebettet sind und der thermoplastische Kunststoff eine Matrix zur Aufnahme der Partikel (25) bzw. zur Ausbildung der Poren (32) definiert.
2. Schraubenverdichter nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** der thermoplastische Kunststoff zur Ausbildung der ersten, inneren Schicht (3) und der zweiten, äußeren Schicht (4) ein hochleistungsthermoplastischer Kunststoff, insbesondere ein teilkristalliner hochleistungsthermoplastischer Kunststoff ist.
3. Schraubenverdichter nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** der thermoplastische Kunststoff zur Ausbildung der ersten, inneren Schicht (3) und der zweiten, äußeren Schicht (4) ein Polyaryletherketon (PAEK) umfasst oder zumindest im Wesentlichen aus einem Polyaryletherketon (PAEK) besteht.
4. Schraubenverdichter nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** der thermoplastische Kunststoff zur Ausbildung der ersten, inneren Schicht (3) und der zweiten, äußeren Schicht (4) Polyetheretherketon (PEEK) umfasst oder zumindest im Wesentlichen aus Polyetheretherketon (PEEK) besteht.
5. Schraubenverdichter nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** die erste, innere Schicht (3) ohne einen Einlaufvorgang unterstützende Partikel (25) oder Poren (32), sondern zumindest im Wesentlichen homogen ausgebildet ist.
6. Schraubenverdichter nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** die einen Einlaufvorgang unterstützenden Partikel (25) der zweiten, äußeren Schicht (4) abrasive und/oder schmierende Partikel umfasst.
7. Schraubenverdichter nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Partikel (25) in mikroverkapselter Form vorliegen, wobei mindestens eine erste Substanz von einer zweiten Substanz als Hüllmaterial umgeben ist.
8. Schraubenverdichter nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Partikel (25) Mikro-Hohlkugeln (Microspheres), insbesondere aus Aluminiumoxid (Al_2O_3), Siliziumdioxid (SiO_2) oder aus thermoplastischem Kunststoff, umfassen, insbesondere aus diesen gebildet sind.
9. Schraubenverdichter nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Partikel (25) Mikro-Hohlkugeln (Microspheres) aus Glas, insbesondere Borsilikatglas umfassen, oder aus Glas, insbesondere Borsilikatglas, gebildet sind.
10. Schraubenverdichter nach einem der Ansprüche 1 bis 9,

dadurch gekennzeichnet, dass

die einen Einlaufvorgang unterstützenden Partikel (25) der zweiten, äußeren Schicht (4) eine gegenüber der durch den thermoplastischen Kunststoff definierten Matrix höhere Härte (nach Shore) aufweisen.

- 5 **11.** Schraubenverdichter nach einem der Ansprüche 1 bis 9,
 dadurch gekennzeichnet, dass
 die einen Einlaufvorgang unterstützenden Partikel (25) der zweiten, äußeren Schicht (4) eine gegenüber der durch den thermoplastischen Kunststoff definierten Matrix geringere Härte (nach Shore) aufweisen.
- 10 **12.** Schraubenverdichter nach einem der Ansprüche 1 bis 11,
 dadurch gekennzeichnet, dass
 die erste, innere Schicht (3) mit der zweiten, äußeren Schicht durch Aufschmelzen verbunden ist.
- 15 **13.** Schraubenverdichter nach einem der Ansprüche 1 bis 12,
 dadurch gekennzeichnet, dass
 die erste, innere Schicht (3) einen im Wesentlichen homogenen Überzug und damit eine Korrosionsschutzschicht ausbildet.
- 20 **14.** Schraubenverdichter nach einem der Ansprüche 1 bis 13,
 dadurch gekennzeichnet, dass
 die zweite, äußere Schicht (4) eine sich im Einlaufvorgang bereichsweise abtragende und/oder sich bereichsweise plastisch verformende, mithin eine sich an die konkreten Betriebsverhältnisse adaptierende Einlaufschicht definiert.
- 25 **15.** Schraubenverdichter nach einem der Ansprüche 1 bis 14,
 dadurch gekennzeichnet, dass
 die Partikel Graphit umfassen oder aus Graphit gebildet sind.
- 30 **16.** Schraubenverdichter nach einem der Ansprüche 1 bis 15,
 dadurch gekennzeichnet, dass
 die Partikel umfassen:
 Hexagonales Bornitrid, Kohlenstoff-Nanoröhren (Carbon Nanotubes, CNT), Talkum, Polytetrafluorethylen (PTFE), Perfluoralkoxy-Polymere (PFA), Fluorethylen-Propylen (FEP) und/oder einem anderen Fluor-Polymer.
- 35 **17.** Schraubenverdichter nach einem der Ansprüche 1 bis 15,
 dadurch gekennzeichnet, dass
 die Partikel umfassen:
 Aluminiumoxid (Al_2O_3), Siliciumcarbid (SiC), Siliziumdioxid (SiO_2), und/oder Glas, insbesondere Borsilikatglas.
- 40 **18.** Schraubenverdichter nach einem der Ansprüche 1 bis 17,
 dadurch gekennzeichnet, dass
 die Schichtdicke der ersten, inneren Schicht (3) vor dem Einlaufen 5 μm bis 50 μm beträgt.
- 45 **19.** Schraubenverdichter nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
 dadurch gekennzeichnet, dass
 die Schichtdicke der zweiten, äußeren Schicht (4) vor dem Einlaufen 10 μm bis 120 μm beträgt.
- 50 **20.** Schraubenverdichter nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
 dadurch gekennzeichnet, dass
 der Grundkörper (24) der Rotorschraube aus Stahl und/oder Gusseisen gebildet ist.
- 55 **21.** Schraubenverdichter nach einem der Ansprüche 1 bis 19,
 dadurch gekennzeichnet, dass
 zumindest Abschnitte der Wellenenden (30) nicht mit einem thermoplastischen Kunststoff beschichtet sind.
- 22.** Schraubenverdichter nach einem der Ansprüche 1 bis 21,
 dadurch gekennzeichnet, dass
 zumindest Abschnitte der Wellenenden (30) mit der ersten, inneren Schicht (3) aus thermoplastischem Kunststoff beschichtet sind.

23. Schraubenverdichter nach einem der Ansprüche 1 bis 22,

dadurch gekennzeichnet, dass

zusätzlich zu der Profilfläche (12a, 12b) mindestens einer Rotorschraube (1, 2) eine oder beide Stirnflächen (5a, 5b, 5c, 5d) mehrschichtig umfassend eine erste, innere Schicht (3) sowie eine zweite, äußere Schicht (4) beschichtet sind, wobei die erste, innere Schicht (3) und die zweite, äußere Schicht (4) beide einen thermoplastischen Kunststoff umfassen bzw. aus diesem ausgebildet sind, wobei in der zweiten, äußeren Schicht (4) einen Einlaufvorgang unterstützende Partikel (25) oder Poren (32) eingebettet sind und der thermoplastische Kunststoff eine Matrix zur Aufnahme der Partikel (25) bzw. zur Ausbildung der Poren (32) definiert.

24. Schraubenverdichter nach einem der Ansprüche 1 bis 23,

dadurch gekennzeichnet, dass

Innenwandungen, wie eine Mantelfläche einer Rotorbohrung (19), druckseitige und/oder saugseitige Gehäusestirnflächen (6a, 6b) des Verdichtungsraums (18) mindestens mit einer ersten Schicht (3), vorzugsweise auch mit einer zweiten Schicht (4) beschichtet sind, wobei die erste Schicht (3) und die zweite Schicht (4) beide einen thermoplastischen Kunststoff umfassen bzw. aus diesem gebildet sind und wobei in der zweiten, äußeren Schicht (4) einen Einlaufvorgang unterstützende Partikel (25) oder Poren (32) eingebettet sind und der thermoplastische Kunststoff eine Matrix zur Aufnahme der Partikel (25) bzw. zur Ausbildung der Poren (32) definiert.

25. Schraubenverdichter nach einem der Ansprüche 1 bis 24,

dadurch gekennzeichnet, dass

der Schraubenverdichter ein ölfrei verdichtender, insbesondere trocken verdichtender, Schraubenverdichter ist.

26. Rotorschraube zur Verwendung in einem Schraubenverdichter nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Rotorschraube (1, 2) einen ein- oder mehrteiligen Grundkörper (24) mit zwei Stirnflächen (5a, 5b, 5c, 5d) und einer dazwischen verlaufenden Profilfläche (12a, 12b) sowie über die Stirnflächen (5a, 5b, 5c, 5d) vorstehende Wellenenden (30) aufweisen,

wobei mindestens die Profilfläche (12a, 12b) mehrschichtig, umfassend eine erste, innere Schicht (3) sowie eine zweite, äußere Schicht (4) ausgebildet ist,

dadurch gekennzeichnet, dass

die erste, innere Schicht (3) und die zweite, äußere Schicht (4) beide einen thermoplastischen Kunststoff umfassen bzw. aus diesem ausgebildet sind,

wobei in der zweiten, äußeren Schicht (4) einen Einlaufvorgang unterstützende Partikel (25) oder Poren (32) eingebettet sind und der thermoplastische Kunststoff eine Matrix zur Aufnahme der Partikel (25) bzw. zur Ausbildung der Poren (32) definiert.

27. Verfahren zur Aufbringung einer mehrschichtigen Beschichtung auf eine zu beschichtende metallische Fläche einer Rotorschraube oder eines Verdichtungsraums eines Schraubenverdichters umfassend die nachfolgenden Schritte:

- Vorbehandeln der zu beschichtenden metallischen Fläche,

- Aufbringen einer ersten, inneren Schicht (3), die einen thermoplastischen Kunststoff umfasst bzw. aus diesem gebildet ist, auf die zu beschichtende metallische Fläche oder auf eine Unterschicht, die insbesondere als Vorbehandlungsschicht ausgebildet sein kann, und

- Aufbringen einer zweiten, äußeren Schicht (4) auf die erste, innere Schicht (3),

wobei die zweite, äußere Schicht (4) ebenfalls einen thermoplastischen Kunststoff umfasst bzw. aus diesem gebildet ist und wobei in der zweiten, äußeren Schicht (4) einen Einlaufvorgang unterstützende Partikel (25) oder Poren (32) eingebettet sind und der thermoplastische Kunststoff eine Matrix zur Aufnahme der Partikel (25) bzw. zur Ausbildung der Poren (32) definiert.

28. Verfahren nach Anspruch 26,

dadurch gekennzeichnet, dass

die erste, innere Schicht (3) und/oder die zweite, äußere Schicht (4) als Nasslack oder als Pulverlack aufgebracht werden.

29. Verfahren nach Anspruch 27 oder 28,

dadurch gekennzeichnet, dass

die erste, innere Schicht (3) und die zweite, äußere Schicht (4) eingebrannt werden derart, dass der thermoplastische Kunststoff aufschmilzt.

30. Verfahren nach einem der Ansprüche 27 bis 29,

dadurch gekennzeichnet, dass

die Vorbehandlung der zu beschichtenden metallischen Fläche ein Entfetten und vorzugsweise eine weitere Konditionierung der metallischen Fläche, beispielsweise durch Aufrauen der Oberfläche, durch Strahlen oder Ätzen oder durch Aufbringen einer Konversionsschicht, z.B. Phosphatieren oder Aufbringen einer Nanokeramik, umfasst.

Claims

1. Screw compressor, comprising a compressor housing (11) with two rotor screws (1, 2) mounted therein in an axially parallel manner, which mesh with one another in a compression space (18), can be driven by means of a drive and are synchronized with one another in their rotational movement, wherein the rotor screws (1, 2) each comprise a single-part or multi-part main body (24) with two end faces (5a, 5b, 5c, 5d) and a profiled surface (12a, 12b) extending therebetween, as well as shaft ends (30) projecting beyond the end faces (5a, 5b, 5c, 5d), wherein at least the profiled surface (12a, 12b) is formed in a multi-layer manner, comprising a first, inner layer (3) as well as a second, outer layer (4), **characterized in that** the first, inner layer (3) and the second, outer layer (4) both comprise or are made from a thermoplastic material, wherein particles (25) or pores (32) promoting a running-in process are embedded in the second, outer layer (4), and the thermoplastic material defines a matrix for receiving the particles (25) or for forming the pores (32).
2. Screw compressor according to claim 1, **characterized in that** the thermoplastic material for forming the first, inner layer (3) and the second, outer layer (4) is a high-performance thermoplastic material, in particular a semi-crystalline high-performance thermoplastic material.
3. Screw compressor according to claim 1 or 2, **characterized in that** the thermoplastic material for forming the first, inner layer (3) and the second, outer layer (4) comprises a polyaryl ether ketone (PAEK) or at least substantially consists of a polyaryl ether ketone (PAEK).
4. Screw compressor according to one of claims 1 to 3, **characterized in that** the thermoplastic material for forming the first, inner layer (3) and the second, outer layer (4) comprises polyether ether ketone (PEEK) or at least substantially consists of polyether ether ketone (PEEK).
5. Screw compressor according to one of claims 1 to 4, **characterized in that** the first, inner layer (3) is formed without particles (25) or pores (32) promoting a running-in process, but at least substantially homogeneously.
6. Screw compressor according to one of claims 1 to 5, **characterized in that** the particles (25) of the second, outer layer (4) promoting a running-in process comprise abrasive and/or lubricating particles.
7. Screw compressor according to one of claims 1 to 6, **characterized in that** the particles (25) are present in micro-encapsulated form, wherein at least a first substance is surrounded by a second substance as enveloping material.
8. Screw compressor according to claim 6, **characterized in that** the particles (25) comprise micro hollow spheres (microspheres), in particular of aluminum oxide (Al_2O_3), silicon dioxide (SiO_2) or of thermoplastic material, in particular are formed from these.
9. Screw compressor according to claim 6, **characterized in that** the particles (25) comprise micro hollow spheres (microspheres) of glass, in particular borosilicate glass, or are formed from glass, in particular borosilicate glass.
10. Screw compressor according to one of claims 1 to 9, **characterized in that** the particles (25) of the second, outer layer (4) promoting a running-in process have a higher hardness (according to Shore) relative to the matrix defined by the thermoplastic material.
11. Screw compressor according to one of claims 1 to 9, **characterized in that** the particles (25) of the second, outer layer (4) promoting a running-in process have a lower hardness (according to Shore) relative to the matrix defined by the thermoplastic material.
12. Screw compressor according to one of claims 1 to 11, **characterized in that** the first, inner layer (3) is connected to the second, outer layer by melting.

13. Screw compressor according to one of claims 1 to 12, **characterized in that** the first, inner layer (3) forms a substantially homogeneous coating and thus a corrosion protection layer.
- 5 14. Screw compressor according to one of claims 1 to 13, **characterized in that** the second, outer layer (4) defines a running-in layer which is eroding and/or plastically deforming in certain areas during the running-in process and thus adapts to the concrete operating conditions.
- 10 15. Screw compressor according to one of claims 1 to 14, **characterized in that** the particles comprise graphite or are formed from graphite.
16. Screw compressor according to one of claims 1 to 15, **characterized in that** the particles comprise: hexagonal boron nitride, carbon nanotubes (CNT), talcum, polytetrafluoroethylene (PTFE), perfluoroalkoxy polymers (PFA), fluorinated ethylene propylene (FEP) and/or another fluoropolymer.
- 15 17. Screw compressor according to one of claims 1 to 15, **characterized in that** the particles comprise aluminum oxide (Al_2O_3), silicon carbide (SiC), silicon dioxide (SiO_2), and/or glass, in particular borosilicate glass.
18. Screw compressor according to one of claims 1 to 17, **characterized in that** the layer thickness of the first, inner layer (3) before running-in is 5 μm to 50 μm .
- 20 19. Screw compressor according to one of the preceding claims, **characterized in that** the layer thickness of the second, outer layer (4) before running-in is 10 μm to 120 μm .
- 25 20. Screw compressor according to one of the preceding claims, **characterized in that** the main body (24) of the rotor screw is formed of steel and/or cast iron.
21. Screw compressor according to one of claims 1 to 19, **characterized in that** at least sections of the shaft ends (30) are not coated with a thermoplastic material.
- 30 22. Screw compressor according to one of claims 1 to 21, **characterized in that** at least sections of the shaft ends (30) are coated with the first, inner layer (3) of thermoplastic material.
- 35 23. Screw compressor according to one of claims 1 to 22, **characterized in that** in addition to the profiled surface (12a, 12b) of at least one rotor screw (1, 2), one or both end faces (5a, 5b, 5c, 5d) are coated with a multi-layer coating comprising a first, inner layer (3) and a second, outer layer (4), wherein the first, inner layer (3) and the second, outer layer (4) both comprise or are made from a thermoplastic material, wherein particles (25) or pores (32) promoting a running-in process are embedded in the second, outer layer (4), and the thermoplastic material defines a matrix for receiving the particles (25) or for forming the pores (32).
- 40 24. Screw compressor according to one of claims 1 to 23, **characterized in that** inner walls, such as a jacket surface of a rotor bore (19), pressure-side and/or suction-side housing end faces (6a, 6b) of the compression chamber (18) are coated at least with a first layer (3), preferably also with a second layer (4), wherein the first layer (3) and the second layer (4) both comprise or are made from a thermoplastic material, and wherein particles (25) or pores (32) promoting a running-in process are embedded in the second, outer layer (4), and the thermoplastic material defines a matrix for receiving the particles (25) or for forming the pores (32).
- 45 25. Screw compressor according to one of claims 1 to 24, **characterized in that** the screw compressor is an oil-free compressing, in particular dry-compressing, screw compressor.
- 50 26. Rotor screw for use in a screw compressor according to one of the preceding claims, wherein the rotor screw (1, 2) comprises a one-part or multi-part main body (24) having two end faces (5a, 5b, 5c, 5d) and a profiled surface (12a, 12b) extending therebetween as well as shaft ends (30) projecting beyond the end faces (5a, 5b, 5c, 5d), wherein at least the profiled surface (12a, 12b) is formed in a multi-layer manner, comprising a first, inner layer (3) and a second, outer layer (4), **characterized in that** the first, inner layer (3) and the second, outer layer (4) both comprise or are formed from a thermoplastic material, wherein particles (25) or pores (32) promoting a running-in process are embedded in the second, outer layer (4) and the thermoplastic material defines a matrix for receiving the particles (25) or for forming the pores (32).
- 55

27. Method for applying a multi-layer coating to a metallic surface to be coated of a rotor screw or a compression chamber of a screw compressor, comprising the following steps:

- pretreatment of the metallic surface to be coated,
- applying a first, inner layer (3), which comprises or is formed from a thermoplastic material, to the metallic surface to be coated or to an underlayer, which may be formed in particular as a pretreatment layer, and
- applying a second, outer layer (4) to the first, inner layer (3), wherein the second, outer layer (4) also comprises or is formed from a thermoplastic material and wherein particles (25) or pores (32) promoting a running-in process are embedded in the second, outer layer (4), and the thermoplastic material defines a matrix for receiving the particles (25) or for forming the pores (32).

28. Method according to claim 26, **characterized in that** the first, inner layer (3) and/or the second, outer layer (4) are applied as a wet paint or as a powder paint.

29. Method according to claim 27 or 28, **characterized in that** the first, inner layer (3) and the second, outer layer (4) are baked in such a way that the thermoplastic material melts.

30. Method according to one of claims 27 to 29, **characterized in that** the pretreatment of the metallic surface to be coated comprises degreasing and preferably further conditioning of the metallic surface, for example by roughening the surface, by blasting or etching or by applying a conversion layer, for example phosphating or applying a nanoceramic.

Revendications

1. Compresseur à vis comprenant un carter de compresseur (11) avec deux vis de rotor (1, 2) qui y sont montées de manière que leurs axes soient parallèles, qui engrènent l'une dans l'autre dans une chambre de compression (18), qui peuvent être entraînées par un entraînement et qui sont synchronisées l'une avec l'autre dans leur mouvement de rotation, les vis de rotor (1, 2) présentant chacune un corps de base (24) en une ou plusieurs parties avec deux faces frontales (5a, 5b, 5c, 5d) et une surface profilée (12a, 12b) s'étendant entre elles ainsi que des extrémités d'arbre (30) faisant saillie des faces frontales (5a, 5b, 5c, 5d), au moins la surface profilée (12a, 12b) étant constituée de plusieurs couches, comprenant une première couche intérieure (3) et une deuxième couche extérieure (4), **caractérisé en ce que**

la première couche intérieure (3) et la deuxième couche extérieure (4) comprennent ou sont constituées toutes deux d'une matière synthétique thermoplastique, des particules (25) ou des pores (32) facilitant un processus de rodage étant incorporés dans la deuxième couche extérieure (4) et la matière synthétique thermoplastique définissant une matrice pour recevoir les particules (25) ou pour former les pores (32).

2. Compresseur à vis selon la revendication 1, **caractérisé en ce que**

la matière synthétique thermoplastique servant à former la première couche intérieure (3) et la deuxième couche extérieure (4) est une matière synthétique thermoplastique à haute performance, en particulier une matière synthétique thermoplastique à haute performance semi-cristalline.

3. Compresseur à vis selon la revendication 1 ou 2, **caractérisé en ce que**

la matière synthétique thermoplastique servant à former la première couche intérieure (3) et la deuxième couche extérieure (4) comprend une polyaryléthercétone (PAEK) ou est constituée au moins sensiblement d'une polyaryléthercétone (PAEK).

4. Compresseur à vis selon l'une des revendications 1 à 3, **caractérisé en ce que**

la matière synthétique thermoplastique servant à former la première couche intérieure (3) et la deuxième couche extérieure (4) comprend du polyétheréthercétone (PEEK) ou est constituée au moins sensiblement de polyétheréthercétone (PEEK).

5. Compresseur à vis selon l'une des revendications 1 à 4,

caractérisé en ce que

la première couche intérieure (3) est formée sans particules (25) ni pores (32) facilitant un processus de rodage, mais au moins de manière sensiblement homogène.

- 5 **6.** Compresseur à vis selon l'une des revendications 1 à 5,
caractérisé en ce que
les particules (25) de la deuxième couche extérieure (4) facilitant un processus de rodage comprennent des particules abrasives et/ou lubrifiantes.

- 10 **7.** Compresseur à vis selon l'une des revendications 1 à 6,
caractérisé en ce que
les particules (25) sont présentes sous forme micro-encapsulée, au moins une première substance étant entourée d'une deuxième substance sous forme de matériau d'enveloppe.

- 15 **8.** Compresseur à vis selon la revendication 6,
caractérisé en ce que
les particules (25) comprennent des microsphères creuses, en particulier en oxyde d'aluminium (Al_2O_3), en dioxyde de silicium (SiO_2) ou en matière synthétique thermoplastique, en particulier sont formées de celles-ci.

- 20 **9.** Compresseur à vis selon la revendication 6,
caractérisé en ce que
les particules (25) comprennent des microsphères creuses en verre, en particulier en verre borosilicaté, ou sont formées de verre, en particulier de verre borosilicaté.

- 25 **10.** Compresseur à vis selon l'une des revendications 1 à 9,
caractérisé en ce que
les particules (25) de la deuxième couche extérieure (4) facilitant un processus de rodage présentent une dureté (selon Shore) plus élevée que la matrice définie par la matière synthétique thermoplastique.

- 30 **11.** Compresseur à vis selon l'une des revendications 1 à 9,
caractérisé en ce que
les particules (25) de la deuxième couche extérieure (4) facilitant un processus de rodage présentent une dureté (selon Shore) plus faible que la matrice définie par la matière thermoplastique.

- 35 **12.** Compresseur à vis selon l'une des revendications 1 à 11,
caractérisé en ce que
la première couche intérieure (3) est liée à la deuxième couche extérieure par fusion.

- 40 **13.** Compresseur à vis selon l'une des revendications 1 à 12,
caractérisé en ce que
la première couche intérieure (3) forme un revêtement sensiblement homogène et donc une couche de protection contre la corrosion.

- 45 **14.** Compresseur à vis selon l'une des revendications 1 à 13,
caractérisé en ce que
la deuxième couche extérieure (4) définit une couche de rodage qui s'érode et/ou se déforme plastiquement par endroits lors du processus de rodage et s'adapte ainsi aux conditions de fonctionnement concrètes.

- 50 **15.** Compresseur à vis selon l'une des revendications 1 à 14,
caractérisé en ce que
les particules comprennent du graphite ou sont formées de graphite.

- 55 **16.** Compresseur à vis selon l'une des revendications 1 à 15,
caractérisé en ce que
les particules comprennent :
du nitrure de bore hexagonal, des nanotubes de carbone (CNT), du talc, du polytétrafluoroéthylène (PTFE), des polymères perfluoroalcoxy (PFA), du fluoroéthylène-propylène (FEP) et/ou un autre polymère fluoré.

17. Compresseur à vis selon l'une des revendications 1 à 15,
caractérisé en ce que
les particules comprennent :
de l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3), du carbure de silicium (SiC), du dioxyde de silicium (SiO_2) et/ou du verre, en
particulier du verre borosilicaté.
18. Compresseur à vis selon l'une des revendications 1 à 17,
caractérisé en ce que
l'épaisseur de couche de la première couche intérieure (3) avant le rodage est de 5 μm à 50 μm .
19. Compresseur à vis selon l'une des revendications précédentes,
caractérisé en ce que
l'épaisseur de couche de la deuxième couche extérieure (4) avant le rodage est de 10 μm à 120 μm .
20. Compresseur à vis selon l'une des revendications précédentes,
caractérisé en ce que
le corps de base (24) de la vis de rotor est formé d'acier et/ou de fonte.
21. Compresseur à vis selon l'une des revendications 1 à 19,
caractérisé en ce
qu'au moins des parties des extrémités d'arbre (30) ne sont pas revêtues d'une matière synthétique thermoplastique.
22. Compresseur à vis selon l'une des revendications 1 à 21,
caractérisé en ce
qu'au moins des parties des extrémités d'arbre (30) sont revêtues de la première couche intérieure (3) en matière synthétique thermoplastique.
23. Compresseur à vis selon l'une des revendications 1 à 22,
caractérisé en ce que,
en plus de la surface profilée (12a, 12b) d'au moins une vis de rotor (1, 2), une ou les deux faces frontales (5a, 5b, 5c, 5d) sont revêtues de plusieurs couches comprenant une première couche intérieure (3) et une deuxième couche extérieure (4), la première couche intérieure (3) et la deuxième couche extérieure (4) comprenant ou étant constituées toutes deux d'une matière synthétique thermoplastique, des particules (25) ou des pores (32) facilitant un processus de rodage étant incorporés dans la deuxième couche extérieure (4) et la matière synthétique thermoplastique définissant une matrice pour recevoir les particules (25) ou pour former les pores (32).
24. Compresseur à vis selon l'une des revendications 1 à 23,
caractérisé en ce que
des parois intérieures, telles qu'une surface périphérique d'un alésage de rotor (19), des faces frontales de carter (6a, 6b) côté refoulement et/ou côté aspiration de la chambre de compression (18) sont revêtues au moins d'une première couche (3), de préférence également d'une deuxième couche (4), la première couche (3) et la deuxième couche (4) comprenant ou étant constituées toutes deux d'une matière synthétique thermoplastique, des particules (25) ou des pores (32) facilitant un processus de rodage étant incorporés dans la deuxième couche extérieure (4) et la matière synthétique thermoplastique définissant une matrice pour recevoir les particules (25) ou pour former les pores (32) .
25. Compresseur à vis selon l'une des revendications 1 à 24,
caractérisé en ce que
le compresseur à vis est un compresseur à vis sans huile, en particulier un compresseur à vis sèches.
26. Vis de rotor destinée à être utilisée dans un compresseur à vis selon l'une des revendications précédentes, la vis de rotor (1, 2) présentant un corps de base (24) en une ou plusieurs parties avec deux faces d'extrémité (5a, 5b, 5c, 5d) et une surface profilée (12a, 12b) s'étendant entre elles ainsi que des extrémités d'arbre (30) faisant saillie des faces frontales (5a, 5b, 5c, 5d), au moins la surface profilée (12a, 12b) étant constituée de plusieurs couches, comprenant une première couche intérieure (3) et une deuxième couche extérieure (4),
caractérisée en ce que
la première couche intérieure (3) et la deuxième couche extérieure (4) comprennent ou sont constituées toutes deux d'une matière synthétique thermoplastique,

des particules (25) ou des pores (32) facilitant un processus de rodage étant incorporés dans la deuxième couche extérieure (4) et la matière synthétique thermoplastique définissant une matrice pour recevoir les particules (25) ou pour former les pores (32).

5 27. Procédé pour appliquer un revêtement multicouche sur une surface métallique à revêtir d'une vis de rotor ou d'une chambre de compression d'un compresseur à vis, comprenant les étapes suivantes :

- prétraitement de la surface métallique à revêtir,
- 10 - application d'une première couche intérieure (3) qui comprend ou est formée d'une matière synthétique thermoplastique sur la surface métallique à revêtir ou sur une sous-couche qui peut être en particulier formée comme une couche de prétraitement, et
- application d'une deuxième couche extérieure (4) sur la première couche intérieure (3),
- la deuxième couche extérieure (4) comprenant également ou étant également formée d'une matière synthétique thermoplastique, et des particules (25) ou des pores (32) facilitant un processus de rodage étant incorporés
- 15 dans la deuxième couche extérieure (4) et la matière synthétique thermoplastique définissant une matrice pour recevoir les particules (25) ou pour former les pores (32).

28. Procédé selon la revendication 26,
caractérisé en ce que
 20 la première couche intérieure (3) et/ou la deuxième couche extérieure (4) sont appliquées sous forme de peinture liquide ou de peinture en poudre.

29. Procédé selon la revendication 27 ou 28,
caractérisé en ce que
 25 la première couche intérieure (3) et la deuxième couche extérieure (4) sont cuites de manière à ce que la matière synthétique thermoplastique fonde.

30. Procédé selon l'une des revendications 27 à 29,
caractérisé en ce que
 30 le prétraitement de la surface métallique à revêtir comprend un dégraissage et, de préférence, un conditionnement supplémentaire de la surface métallique, par exemple par abrasion de la surface, par sablage ou attaque chimique ou par application d'une couche de conversion, par exemple par phosphatage ou application d'une nanocéramique.

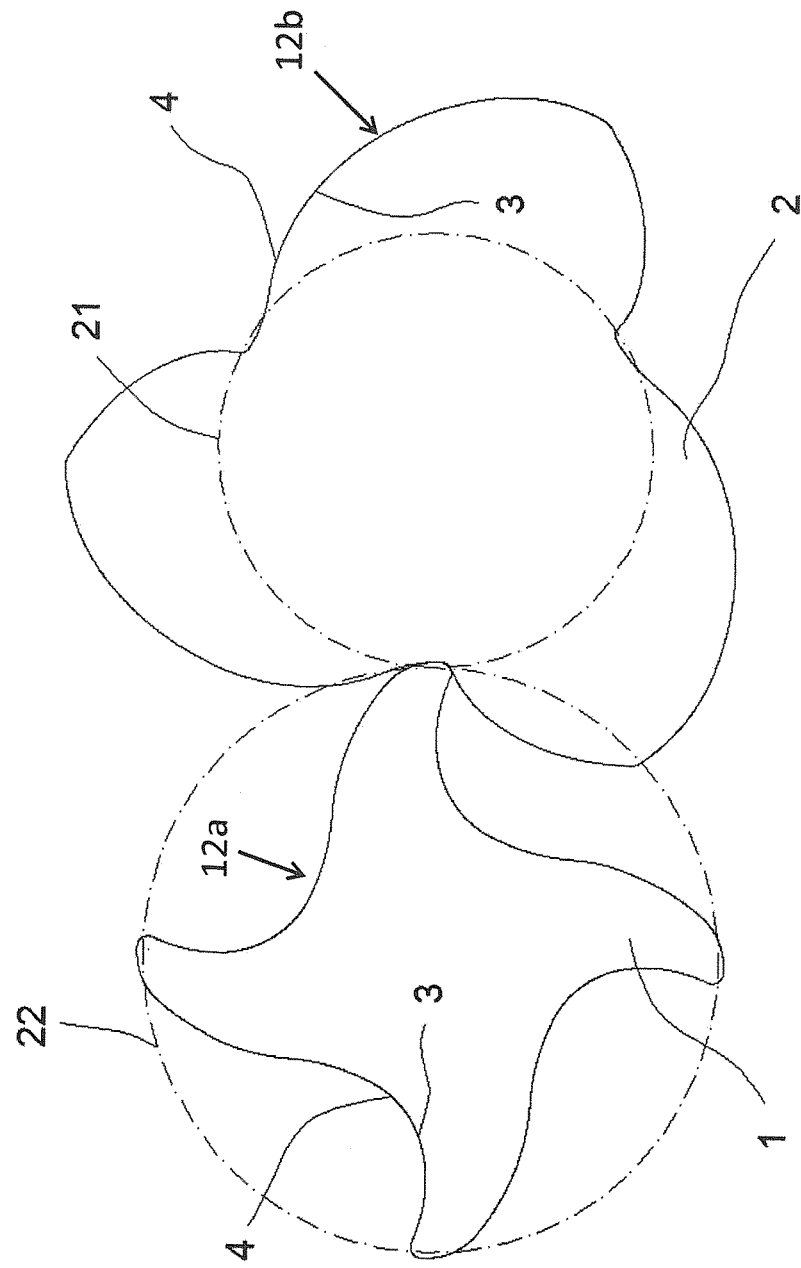
35

40

45

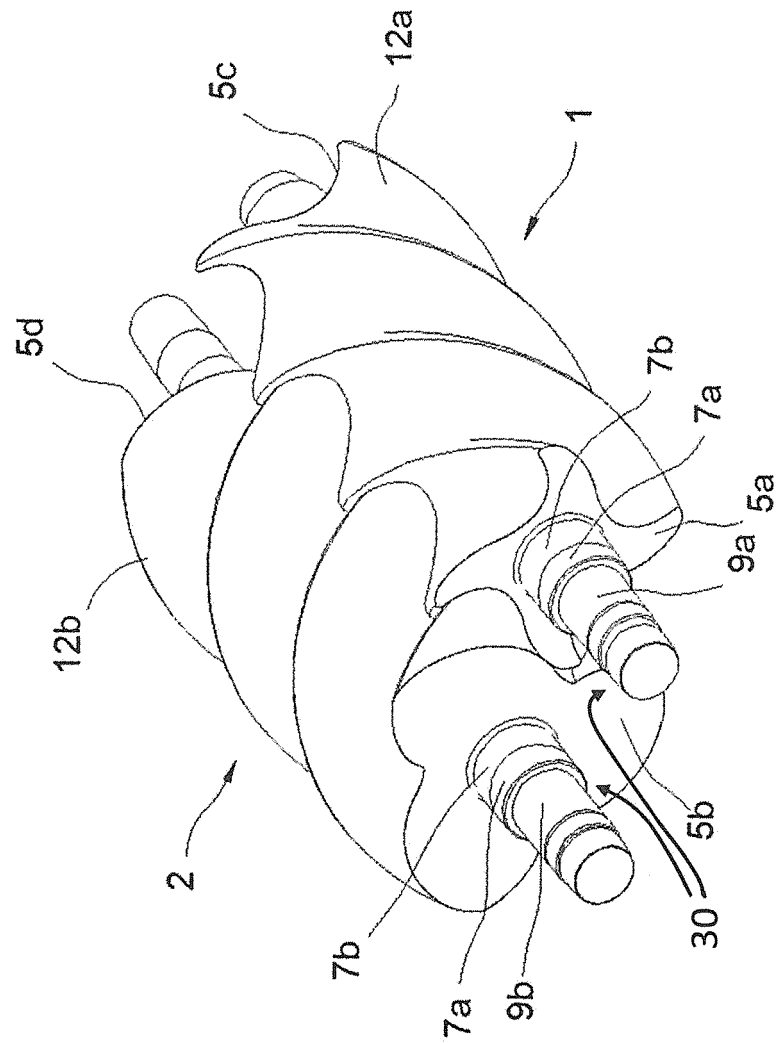
50

55

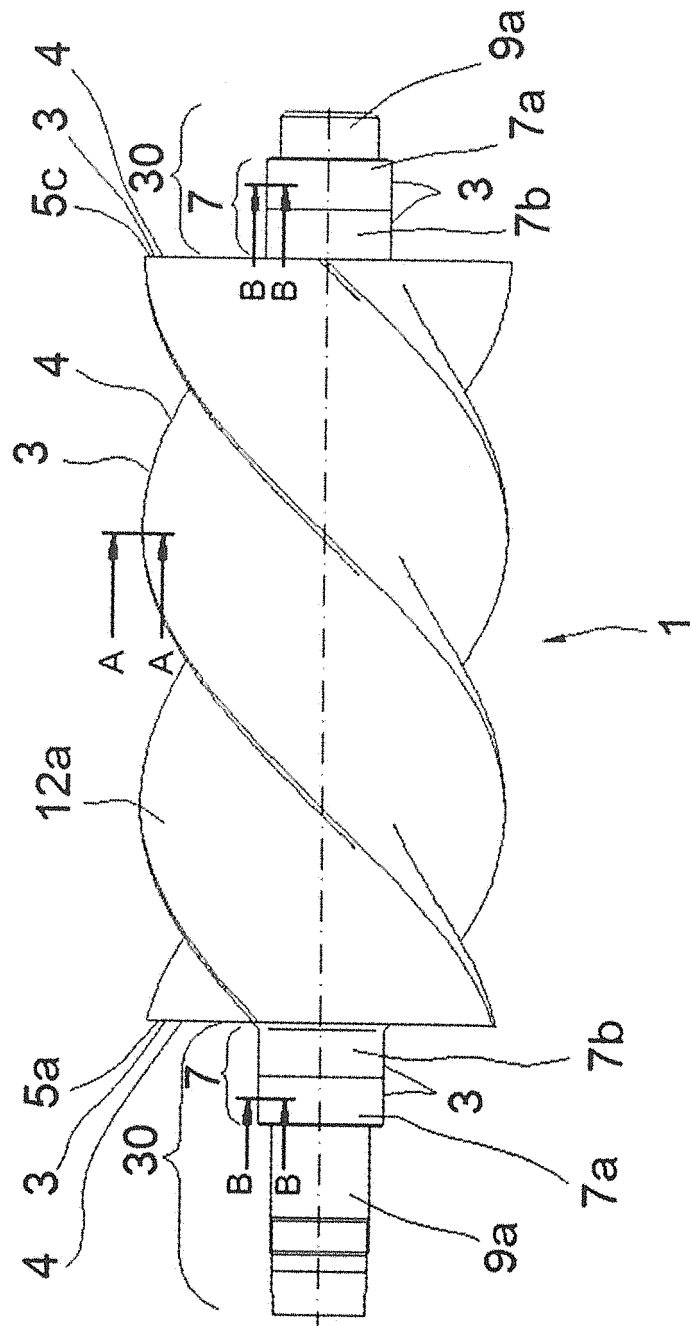


Figur 1

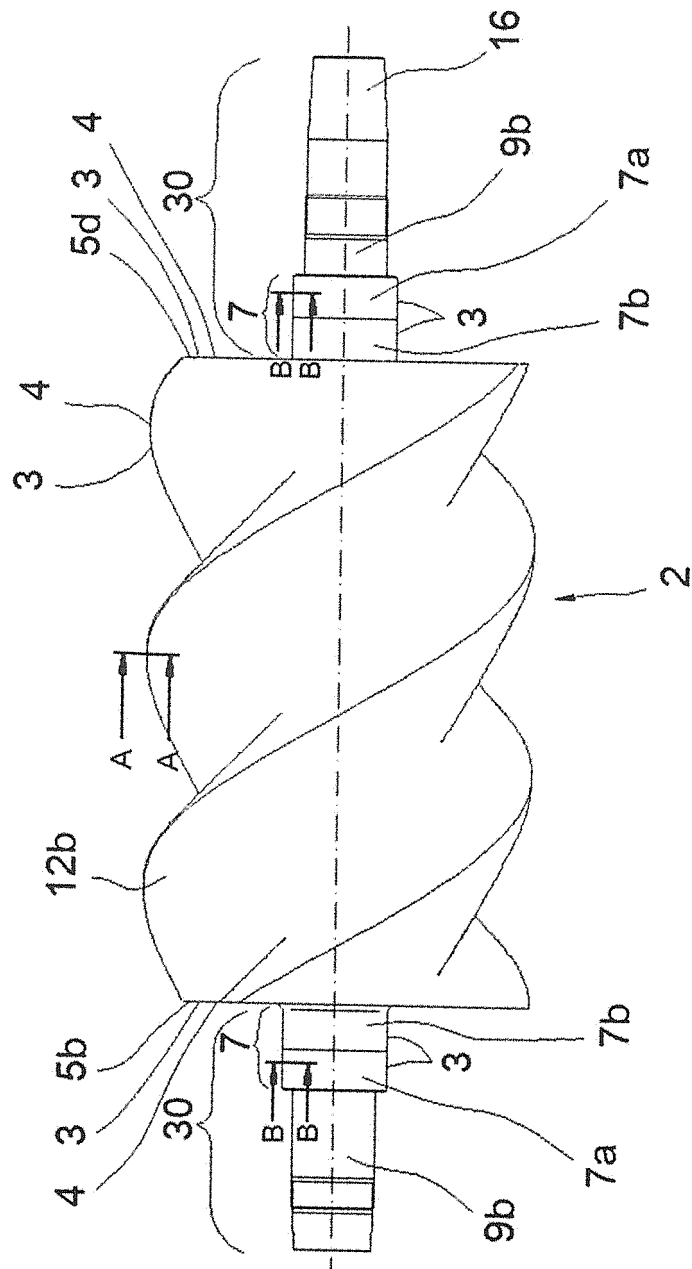
Figur 2



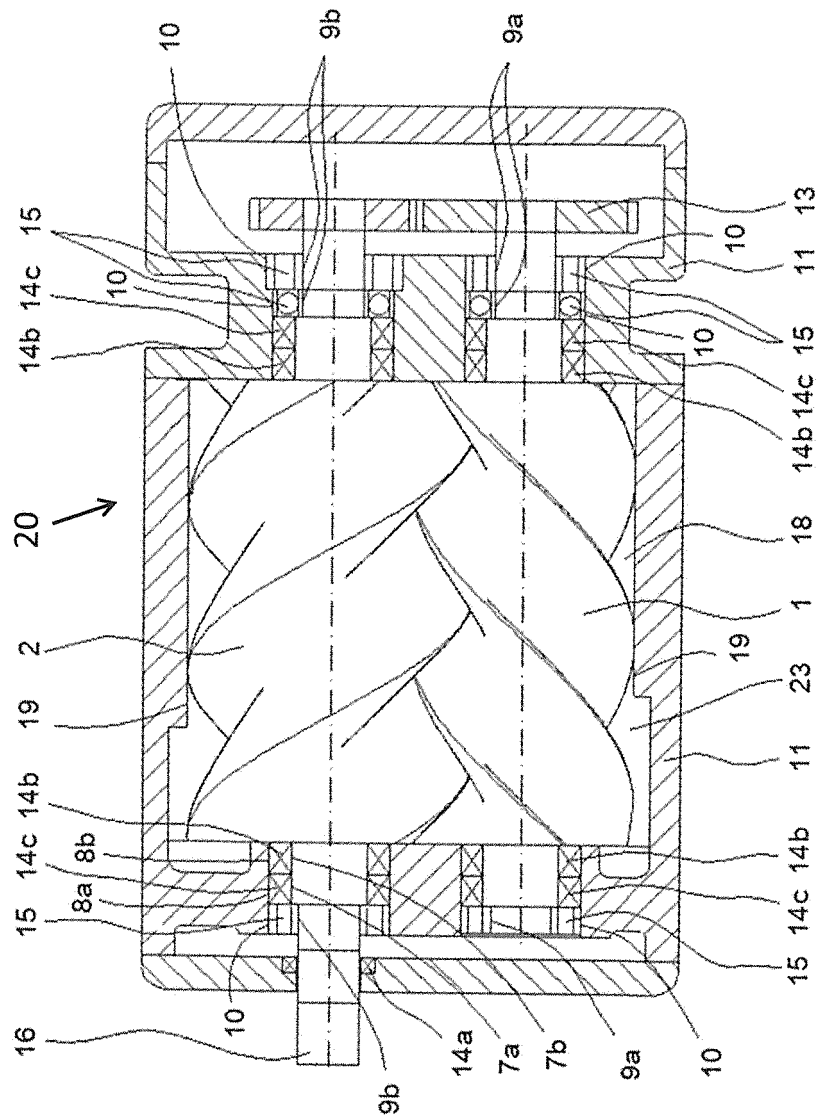
Figur 3



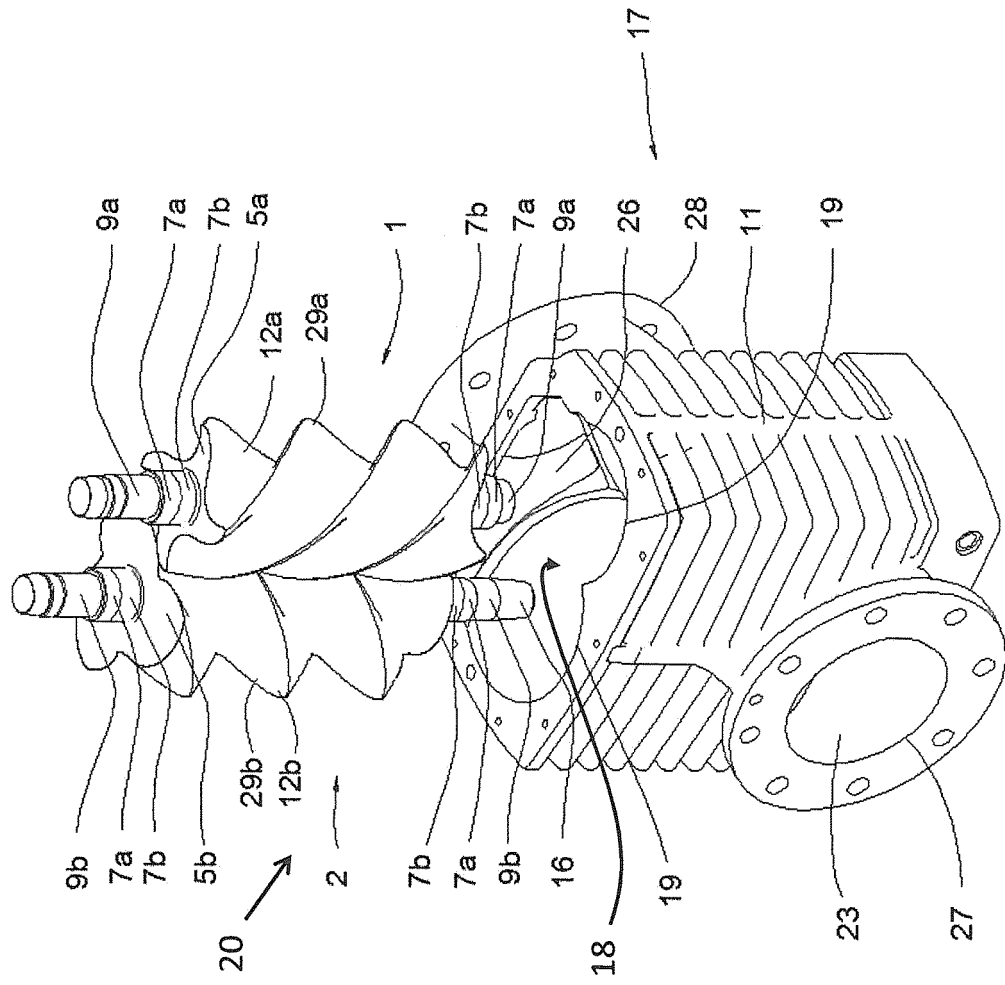
Figur 4



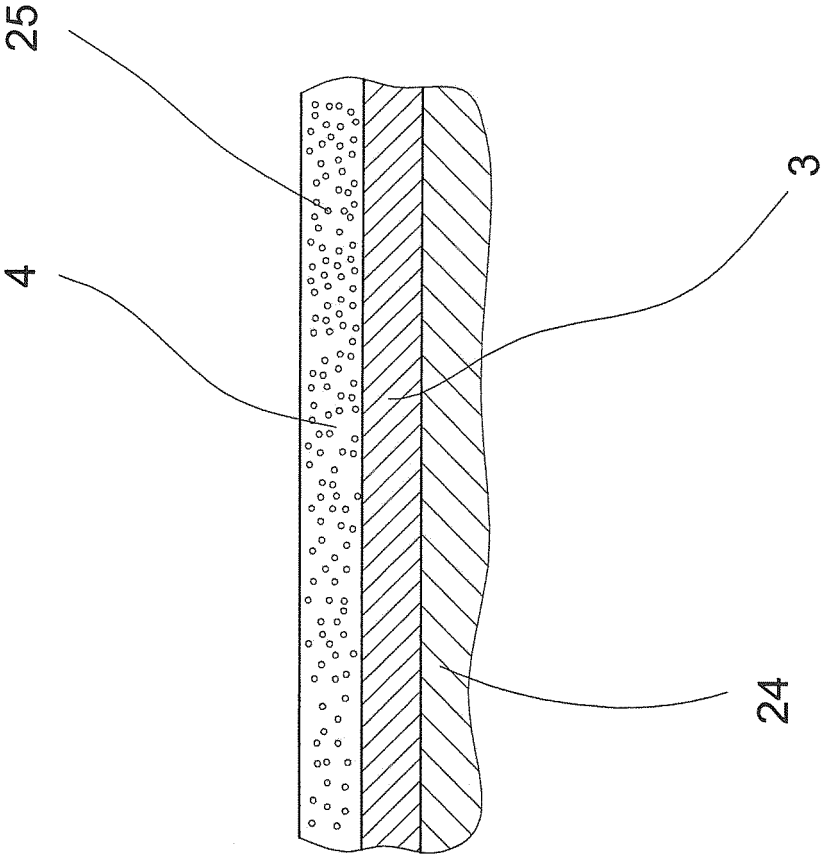
Figur 5



Figur 6



Figur 7



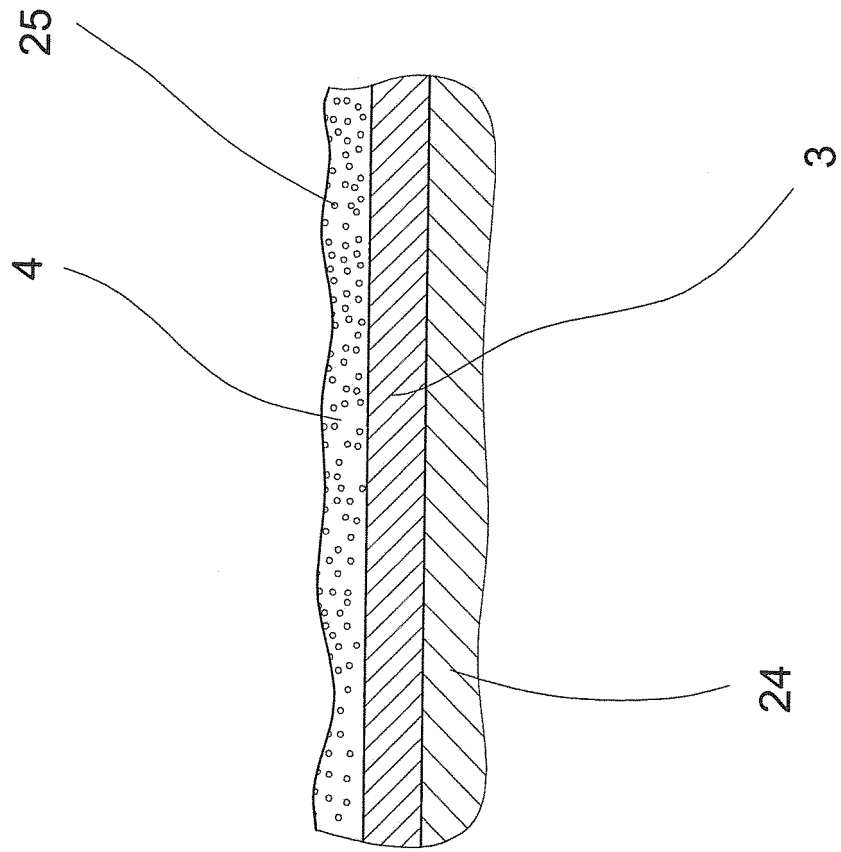


Figure 8

Figur 9

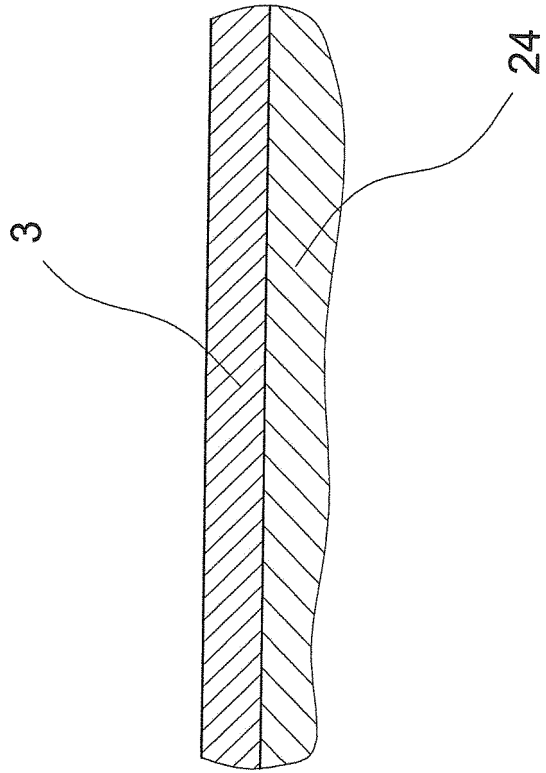
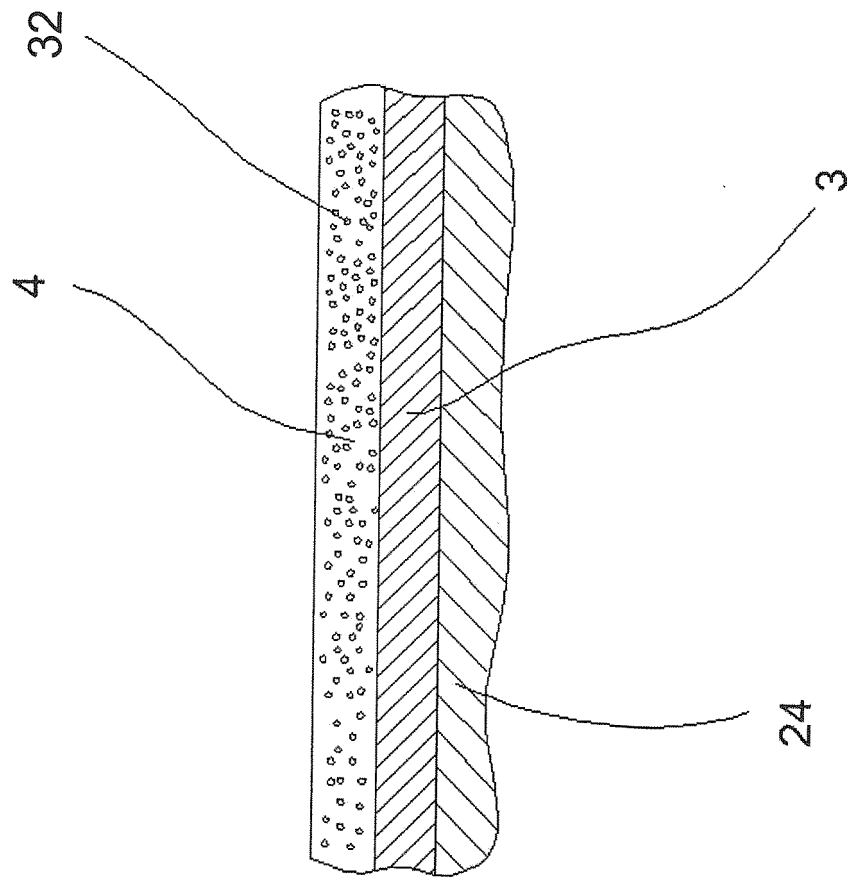
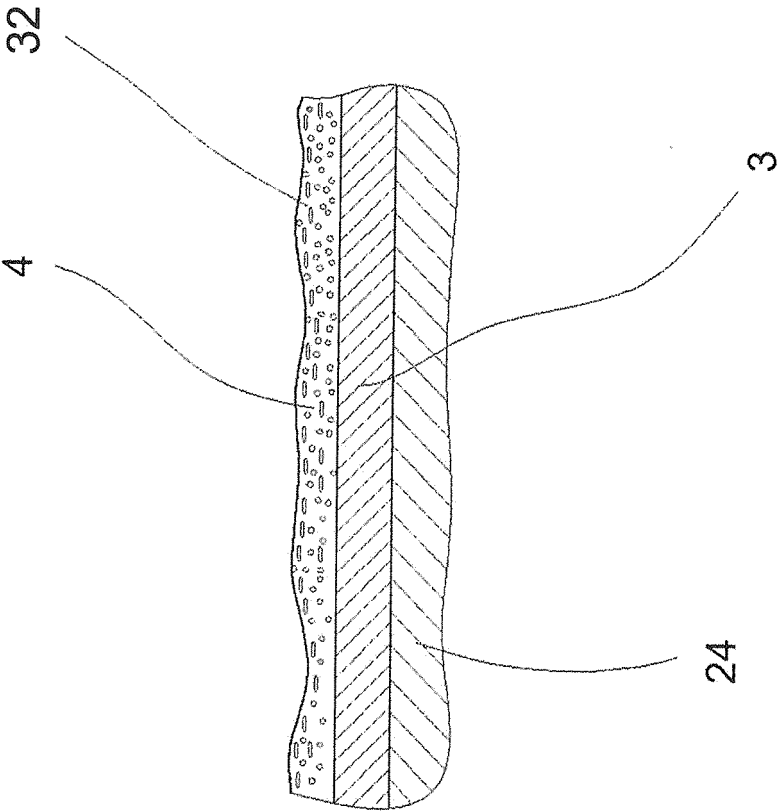


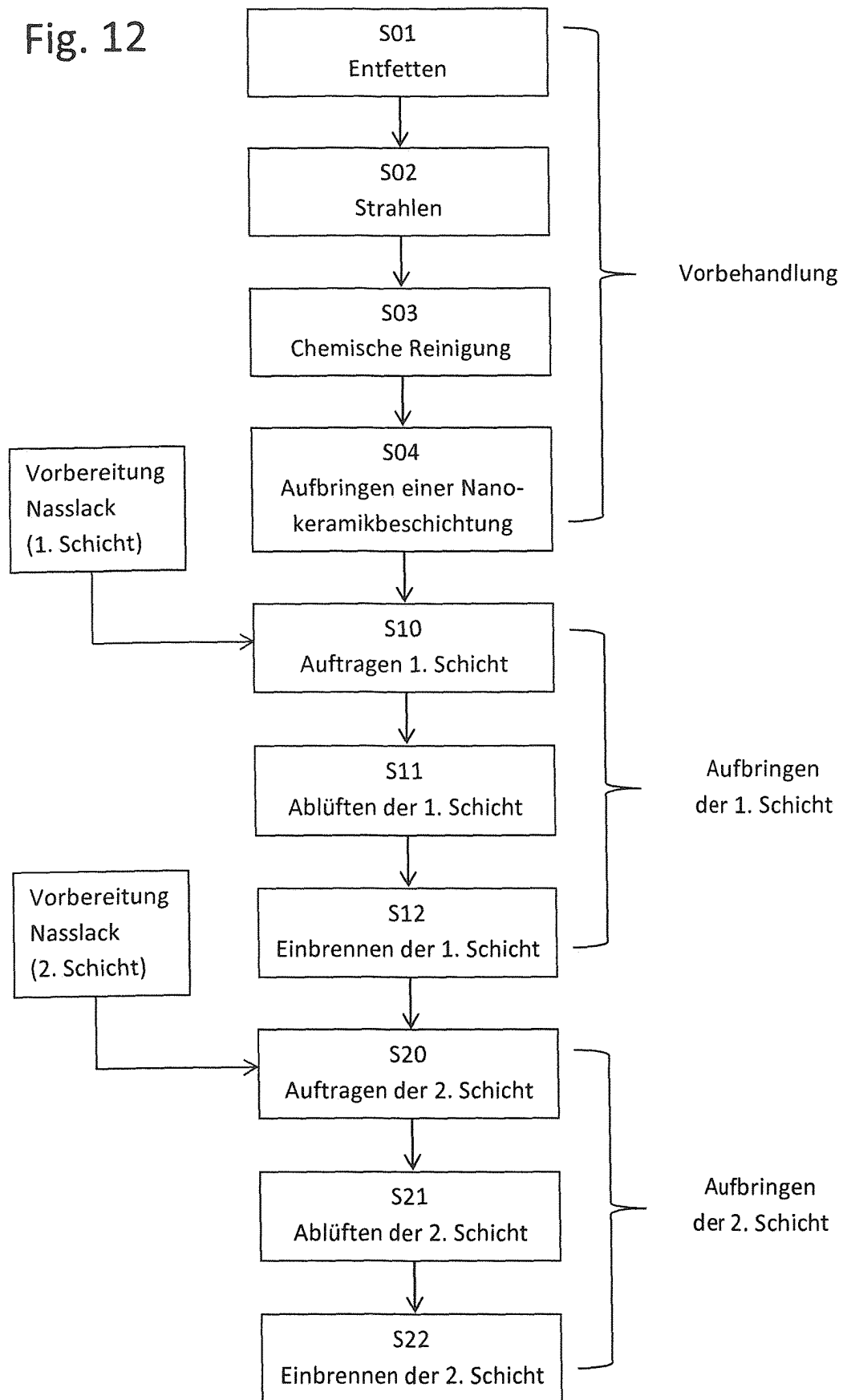
Figure 10





Figur 11

Fig. 12



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 2784324 A1 [0013]
- WO 2014018530 A [0015]
- US 20030126733 A1 [0016]
- EP 0190823 A1 [0016]