(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
22. Dezember 2016 (22.12.2016)

WIPO | PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2016/202598 A2

(51) Internationale Patentklassifikation:
*B23Q 1/70* (2006.01) *F16C 32/06* (2006.01)
*B24B 41/04* (2006.01) *B23Q 1/38* (2006.01)
*F16C 35/10* (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2016/062487

(22) Internationales Anmeldedatum:
2. Juni 2016 (02.06.2016)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
00851/15 15. Juni 2015 (15.06.2015) CH

(71) Anmelder: **REISHAUER AG** [CH/CH]; Industriestrasse 36, 8304 Wallisellen (CH).

(72) Erfinder: **JAKOB, Ronald**; Madetswilerstrasse 4, 8332 Russikon (CH). **HUG, Theo**; Rietstrasse 5, 8360 Wallenwil (CH). **SENNHAUSER, Erwin**; Zielackerstrasse 6, 8451 Kleinandelfingen (CH).

(74) Anwalt: **RUTZ, Andrea**; c/o ISLER & PEDRAZZINI AG, Postfach 1772, 8027 Zürich (CH).

(81) Bestimmungsstaaten *(soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart)*: AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten *(soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart)*: ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

*[Fortsetzung auf der nächsten Seite]*

(54) **Title**: SPINDLE UNIT FOR A MACHINE TOOL FOR FINE-MACHINING WORKPIECES THAT HAVE GROOVED-SHAPED PROFILES

(54) **Bezeichnung** : SPINDELEINHEIT FÜR EINE WERKZEUGMASCHINE ZUR FEINBEARBEITUNG VON WERKSTÜCKEN MIT NUTFÖRMIGEN PROFILEN

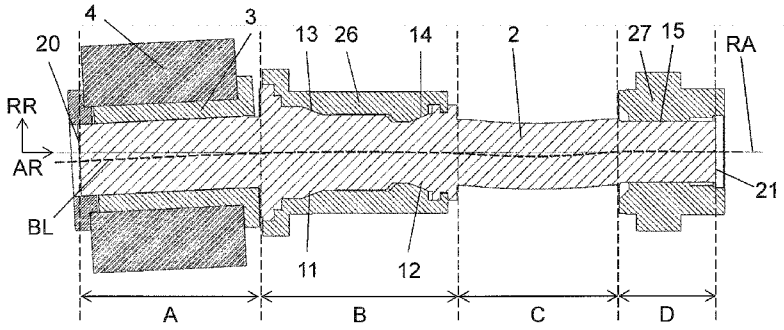



FIG. 3

(57) **Abstract**: A spindle unit for a machine tool for fine-machining workpieces that have groove-shaped profiles, such as, for example, toothings, has a rotatably mounted spindle shaft (2). Said spindle shaft is subdivided in the axial direction (AR), one behind the other, into a fastening portion (A) for fastening a tool (4) or a workpiece to be machined, a first bearing portion (B), a force transmission portion (C), and a second bearing portion (D). A drive unit (5) serves to drive the spindle shaft (2) by way of force transmission onto the force transmission portion (C). A first and a second bearing point (13, 14) are designed to bear the spindle shaft (2) in the first bearing section (B), and a third bearing point (15) serves to mount the spindle shaft (2) on the second bearing portion (D). The first and the second bearing points (13, 14) each have one or more hydrostatic bearings and are designed to receive radial and axial forces. The third bearing point (15) has one or more hydrostatic and/or hydrodynamic bearings and is designed to receive radial forces.

(57) **Zusammenfassung**:

*[Fortsetzung auf der nächsten Seite]*

WO 2016/202598 A2

WO 2016/202598 A2

**Veröffentlicht**:

— *ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe g)*

Eine Spindeleinheit für eine Werkzeugmaschine zur Feinbearbeitung von Werkstücken mit nutförmigen Profilen, wie insbesondere Verzahnungen, weist eine drehbar gelagerte Spindelwelle (2) auf, welche in Axialrichtung (AR) der Reihe nach in einen Befestigungsabschnitt (A) zum Anbringen eines Werkzeugs (4) oder eines zu bearbeitenden Werkstücks, einen ersten Lagerungsabschnitt (B), einen Kraftübertragungsabschnitt (C) und einen zweiten Lagerungsabschnitt (D) unterteilt ist. Eine Antriebseinheit (5) dient zum Antreiben der Spindelwelle (2) mittels Kraftübertragung auf den Kraftübertragungsabschnitt (C). Eine erste und eine zweite Lagerstelle (13, 14) sind zur Lagerung der Spindelwelle (2) im ersten Lagerungsabschnitt (B) vorgesehen, sowie eine dritte Lagerstelle (15) zur Lagerung der Spindelwelle (2) am zweiten Lagerungsabschnitt (D). Die erste und die zweite Lagerstelle (13, 14) weisen jeweils eines oder mehrere hydrostatische Lager auf und sind zur Aufnahme von Radial-und Axialkräften ausgebildet. Die dritte Lagerstelle (15) weist eines oder mehrere hydrostatische und/oder hydrodynamische Lager auf und ist zur Aufnahme von Radialkräften ausgebildet.

TITEL

# Spindeleinheit für eine Werkzeugmaschine zur Feinbearbeitung von Werkstücken mit nutförmigen Profilen

## TECHNISCHES GEBIET

Die vorliegende Erfindung betrifft eine Spindeleinheit für eine Werkzeugmaschine zur Feinbearbeitung von Werkstücken mit nutförmigen Profilen, wie insbesondere Verzahnungen, mit einer drehbar gelagerten Spindelwelle, welche mittels einer Antriebseinheit zur Bearbeitung von Werkstücken in einer Drehbewegung antreibbar ist.

## STAND DER TECHNIK

Bei der Feinbearbeitung von Werkstücken mit nutförmigen Profilen und insbesondere beim Schleifen von Zahnrädern sind immer genauere Oberflächen erwünscht. Die Qualität dieser Werkstücke wird insbesondere durch die Massgenauigkeit, Rauheit, Formgenauigkeit und Welligkeit der Oberflächen des nutförmigen Profils bestimmt. Diese gewünschten Oberflächenqualitäten werden erreicht zum Beispiel durch den Einsatz von Werkzeugmaschinen zum Fräsen, Honen, Schaben, Profilschleifen und Wälzschleifen.

Je nach Art der Feinbearbeitungsmaschine weist diese zumindest eine Spindeleinheit auf, die zumindest eine Spindelwelle in Form einer Werkzeug- oder Werkstückspindel aufweist, welche drehbar gelagert ist. Eine Werkzeugspindel, an welche ein Werkzeug, wie insbesondere eine Profilschleifscheibe und/oder eine Schleifschnecke, angebracht ist, wird zum Beispiel bei Profilschleifmaschinen oder Zahnradschleifmaschinen verwendet. Bei einer Werkzeugspindel kann es sich auch um eine Abrichtspindel handeln, welche zur Befestigung eines Abrichtwerkzeugs dient. An Werkstückspindeln wird nicht das

Werkzeug, sondern das zu bearbeitende Werkstück befestigt.

Für den Feinbearbeitungsprozess wird die Spindelwelle und somit das daran angebrachte Werkzeug bzw. Werkstück mittels einer Antriebseinheit in eine Rotationsbewegung versetzt. Dabei hat der Feinbearbeitungsprozess von nutförmigen Profilen, insbesondere von Zahnrädern, die Besonderheit, dass die Bearbeitung vorwiegend an der Nut- oder Zahnflanke erfolgt, wobei asymmetrische und/oder wechselnde Kräfte auftreten können. In der Regel sind diese Werkstücke auch gehärtet. Deshalb müssen diese Spindeln neben einer hohen Radialsteife auch eine überdurchschnittlich hohe Axialsteife aufweisen.

Um hohe Oberflächenqualitäten erreichen zu können, spielt bei derartigen Werkzeugmaschinen neben der Steifigkeit und der Dämpfung der mechanischen Teile, dem hochpräzisen Antrieb, insbesondere die Lagerung der Spindelwelle eine entscheidende Rolle. Jede noch so kleine Schwingung der Spindelwelle wird auf das daran angebrachte Werkzeug und entsprechend auf die Oberflächen des zu bearbeitenden Werkstücks übertragen. Dasselbe gilt auch für Werkstückspindeln, deren Schwingungen unmittelbar auf das daran angebrachte Werkstück übertragen und an diesem sichtbar und messbar werden.

Um die heutigen extremen Anforderungen an die Oberflächenqualitäten von Werkstücken und insbesondere von Zahnrädern erreichen zu können, werden die Spindelwellen von Feinbearbeitungswerkzeugmaschinen in vorgespannten Spindellagern der bestmöglichen Qualität gelagert. Eine Vielzahl von Werkzeugmaschinen und insbesondere Zahnradschleifmaschinen mit unterschiedlich ausgestalteten Spindellagerungen ist bekannt.

Aus der DE 10 2009 039 752 A1 ist beispielsweise eine Lösung bekannt, bei welcher ein Schleifwerkzeug entlang seiner Rotationsachse beidseitig gelagert und angetrieben ist.

Beim in der EP 1 803 518 A2 gezeigten Werkzeugkopf werden hochgenaue, einreihige, spielfreie und vorgespannte Spindellager eingesetzt, die als ein Lagersatz mit vergrössertem Lagerabstand und in O- Anordnung eingebaut sind. Weiterhin ist ein verschiebbares Gegenlager für das zweiseitig zu lagernde Werkzeug vorgesehen, welches

weitgehend symmetrisch zum ersten Lagersatz aufgebaut ist. Zusätzlich ist am Spindelende noch ein Spindellager angeordnet, welches hauptsächlich radiale aber auch axiale Kräfte aufnehmen kann. Die DE 295 07 871 U1 zeigt eine ähnliche Lagerung mittels Wälzlagern bei einer Wälzfräsmaschine.

In der DE 10 2012 018 358 A1 ist eine Spindelwelle von Wälz- und Profilschleifmaschinen offenbart, welche eine Lagerstelle aufweist, die entlang der Rotationsachse im Bereich der Bohrung eines Schleifwerkzeugs angeordnet ist, wenn ein solches an der Spindelwelle angebracht ist.

Für die Produktivität, das Anregungsverhalten (Schwingungen), die Schnittkräfte und weitere Parameter ist die Rotationsgeschwindigkeit der Spindelwelle von Bedeutung, und somit wäre es auch interessant, eine Bearbeitung mit höheren Umfangsgeschwindigkeiten vorzunehmen, was aber die Spindellager oft nicht zulassen. Wird dagegen der Werkzeugdurchmesser (z.B. der Schleifscheibe) bzw. der Werkstückdurchmesser grösser gewählt, erhöht sich die Umfangsgeschwindigkeit; allerdings steigt dann auch die Belastung auf die Lager. Dadurch müssen grössere Spindellager eingesetzt werden, die aber wiederum nur eine tiefere Drehzahl zulassen. Somit ergibt sich bei üblichen Feinbearbeitungswerkzeugmaschinen zwangsläufig ein Optimum zwischen Drehzahl und Belastung der Spindellager (bei den vorhandenen Platzverhältnissen).

Die EP 0 860 232 B1 offenbart eine Hochgeschwindigkeitsspindel für Fräs- oder Bohroperationen, welche entlang ihrer Rotationsachse beidseitig zum Antriebsmotor mittels hydrostatischen Lagern abgestützt ist und spezielle Abdichtungen für den Hochgeschwindigkeitsbereich besitzt. Die beiden kegelförmigen Lagersitze sind in der bekannten X-Anordnung ausgeführt, so dass bei Temperaturerhöhung der Lagerspalt verkleinert wird. Nachteilig ist diese Anordnung aber für die Aufnahme von Kippmomenten. Da die beiden Lagerstellen durch die dazwischenliegende Antriebseinheit weit auseinander liegen, ist der Einfluss der Wärmeausdehnung auf die Lagerstellen zusätzlich von Nachteil. Eine hydrostatische Lagerung einer Spindelwelle wird auch in der DE 36 41 621 A1 vorgeschlagen.

Weitere Spindeleinheiten für Nockenwellenschleifmaschinen, allgemeine

Schleifmaschinen und Drehmaschinen mit zumindest teilweise hydrostatischen Lagerungen sind in der DE 196 35 687 A1, der EP 0 779 127 A1 und der DE 42 34 049 A1 offenbart.

In der EP 0 840 190 B1 ist ausserdem ein spezieller Druckregler (Progressiv-Mengen-Regler) für ein Hydrostatiklager offenbart, welcher auf ausschliesslich mechanischen bzw. hydraulischen Komponenten basiert und eine kompakte Bauweise aufweist.

## DARSTELLUNG DER ERFINDUNG

Es ist also eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine Spindeleinheit für eine Werkzeugmaschine zur Feinbearbeitung von nutförmigen Profilen, wie insbesondere Verzahnungen, anzugeben, welche mit hohen Drehgeschwindigkeiten betreibbar ist und bei welcher Schwingungen gleichzeitig optimal gedämpft sind. Die Spindeleinheit soll dabei neben einer hohen Radialsteife auch eine möglichst hohe Axialsteife besitzen. Zur Lösung dieser Aufgabe wird eine Spindeleinheit vorgeschlagen, wie sie in Anspruch 1 angegeben ist. Ausserdem wird in Anspruch 17 eine Werkzeugmaschine mit einer derartigen Spindeleinheit angegeben. Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben.

Die vorliegende Erfindung gibt also eine Spindeleinheit für eine Werkzeugmaschine zur Feinbearbeitung von Werkstücken mit nutförmigen Profilen, wie insbesondere Verzahnungen, an. Die Spindeleinheit weist auf

eine Spindelwelle, welche um eine Rotationsachse drehbar gelagert ist und mit dieser Rotationsachse eine Axialrichtung und eine Radialrichtung definiert und welche in Axialrichtung der Reihe nach in einen Befestigungsabschnitt zum Anbringen eines Werkzeugs oder eines zu bearbeitenden Werkstücks, einen ersten Lagerungsabschnitt, einen Kraftübertragungsabschnitt und einen zweiten Lagerungsabschnitt unterteilt ist,

eine Antriebseinheit zum Antreiben der Spindelwelle in einer Drehbewegung um die Rotationsachse mittels Kraftübertragung auf den Kraftübertragungsabschnitt,

eine erste Lagerstelle und eine zweite Lagerstelle zur Lagerung der Spindelwelle im ersten Lagerungsabschnitt, sowie

eine dritte Lagerstelle zur Lagerung der Spindelwelle im zweiten Lagerungsabschnitt.

Die erste und die zweite Lagerstelle weisen jeweils eines oder mehrere hydrostatische Lager auf und sind jeweils zur Aufnahme sowohl von Radial- als auch von Axialkräften ausgebildet. Die dritte Lagerstelle weist eines oder mehrere hydrostatische und/oder hydrodynamische Lager auf und ist zur Aufnahme von Radialkräften ausgebildet.

Dadurch, dass die erste und die zweite Lagerstelle jeweils ein hydrostatisches Lager aufweisen und beide am ersten Lagerungsabschnitt angeordnet sind, welcher an den Befestigungsabschnitt anschliesst oder sogar mit diesem überlappt, werden Schwingungen, welche im Betrieb der Werkzeugmaschine entstehen, nahe beim Werkzeug bzw. Werkstück gedämpft. Die beiden Lagerstellen sind vorteilhaft bezogen auf die Längserstreckung der Spindelwelle möglichst nahe, das heisst insbesondere in unmittelbarer Nähe beim Werkzeug bzw. dem zu bearbeitenden Werkstück angeordnet, wodurch sich allfällige Schwingungen nur minimal auf die Bewegung des Werkzeugs bzw. Werkstücks auswirken. Durch die zusätzliche radiale Lagerung der Spindelwelle im zweiten Lagerungsabschnitt können sich in diesem Abschnitt entstehende Schwingungen nicht verstärken und dadurch die Bewegung des Schleifwerkzeugs bzw. des Werkstücks beeinträchtigen. Siehe hierzu insbesondere auch die in den Figuren 2 und 3 dargestellten Biegelinien sowie die Ausführungen zu diesen beiden Figuren weiter unten.

Die hydrostatische Ausgestaltung der Lager der ersten und zweiten Lagerstelle sowie die hydrostatische und/oder hydrodynamische Ausgestaltung des Lagers der dritten Lagerstelle ermöglichen bei relativ hohen verfahrenstypischen Axialkräften und Kippmomenten relativ hohe Drehzahlen der Spindelwelle von 3000 oder gar noch mehr Umdrehungen pro Minute mit einer gleichzeitig optimalen Dämpfung. Vorteilhaft weisen die erste und die zweite Lagerstelle ausschliesslich hydrostatische Lager auf und die dritte Lagerstelle ausschliesslich hydrostatische und/oder hydrodynamische Lager. Mit dieser Spindeleinheit ist somit eine sehr schnelle und äusserst genaue Feinbearbeitung der nutförmigen Profile eines Werkstücks möglich. Hydrostatische Lager sind in der Regel bei normalen Betriebsbedingungen praktisch verschleissfrei, so dass im Vergleich zum Beispiel zu Wälzlagern eine regelmässige Lagerwartung entfällt. Des Weiteren haben hydrostatische Lager eine wesentlich einfachere und effizientere Lagerkühlung als Wälzlager. Besonders

vorteilhaft ist, dass ihre Eigenschaften über einen grossen Drehzahlbereich weitgehend unverändert bleiben. Insgesamt können die dem Fachmann bekannten technischen Effekte der hydrostatischen bzw. hydrodynamischen Schmierung sehr wirkungsvoll in dieser Spindeleinheit genutzt werden.

Bei der Werkzeugmaschine für die Feinbearbeitung kann es sich zum Beispiel um eine Fräsmaschine, Profilschleifmaschine, Zahnradwälzschleifmaschine oder weitere Zahnradfeinbearbeitungsmaschinen handeln. Bei der Spindeleinheit kann es sich um eine Werkzeugspindel oder eine Werkstückspindel handeln. Im Falle einer Werkzeugspindel (für die Bearbeitung eines Werkstückes, wie beispielsweise eines Zahnrades) kann es sich auch um eine Abrichtspindel (für das Abrichten eines Werkzeuges) handeln. Bei dem zu bearbeitenden Werkstück mit nutförmigem Profil oder mit nutförmigen Profilen kann es sich zum Beispiel um ein Zahnrad handeln. Die Werkzeugmaschine weist in der Regel mindestens zwei mit hoher Drehzahl rotierende Spindelwellen auf, die jeweils in einem feststehenden Gehäuse angeordnet und mittels der ersten, zweiten und dritten Lagerstelle drehbar gelagert sind.

Die Rotationsachse entspricht üblicherweise der Längsmittelachse der Spindelwelle und erstreckt sich in Axialrichtung. Die Radialrichtung bzw. eine Schar von Radialrichtungen erstreckt sich rechtwinklig zur Axialrichtung von der Rotationsachse nach aussen hin. Die Spindelwelle ist in der Regel im Wesentlichen rotationssymmetrisch ausgebildet, mit der Längsmittelachse als Symmetrieachse. Vorteilhaft wäre es, die Spindelwelle als Ganzes einstückig auszubilden, was aber aus fabrikations- und montagetechnischen Gründen nicht immer möglich ist.

Die Unterteilung der Spindelwelle entlang ihrer Rotationsachse der Reihe nach in einen Befestigungsabschnitt, einen ersten Lagerungsabschnitt, einen Kraftübertragungsabschnitt und einen zweiten Lagerungsabschnitt bedeutet, dass in Axialrichtung der erste Lagerungsabschnitt zwischen dem Befestigungsabschnitt und dem Kraftübertragungsabschnitt angeordnet ist und sich der Kraftübertragungsabschnitt zwischen dem ersten und dem zweiten Lagerungsabschnitt befindet. Dabei schliessen entlang der Rotationsachse der Befestigungsabschnitt, der erste Lagerungsabschnitt, der Kraftübertragungsabschnitt und der zweite Lagerungsabschnitt vorteilhaft unmittelbar

aneinander an, das heisst es sind keine dazwischenliegenden zusätzlichen Abschnitte vorhanden.

Der erste Lagerungsabschnitt und der Befestigungsabschnitt, an welchem üblicherweise eine Befestigungsvorrichtung zum Anbringen eines Werkzeugs oder eines zu bearbeitenden Werkstücks angebracht ist, können sich in Axialrichtung überlappen. So kann die erste Lagerstelle in Axialrichtung im Bereich der am Befestigungsabschnitt angebrachten Befestigungsvorrichtung angeordnet sein und sich somit, bezogen auf die Rotationsachse, auf derselben Höhe wie die Befestigungsvorrichtung befinden. Es ist grundsätzlich auch denkbar, dass sich der erste Lagerungsabschnitt und der Kraftübertragungsabschnitt und/oder der Kraftübertragungsabschnitt und der zweite Lagerungsabschnitt gegenseitig überlappen. Der erste Lagerungsabschnitt, der Kraftübertragungsabschnitt und der zweite Lagerungsabschnitt können aber auch jeweils ohne gegenseitige Überlappung aneinander anschliessen.

Die Spindelwelle weist in der Regel zwei freie Enden auf, welche üblicherweise durch den Befestigungsabschnitt und den zweiten Lagerungsabschnitt gebildet werden. Die Befestigungsvorrichtung ist vorteilhaft an dem durch den Befestigungsabschnitt gebildeten freien Ende angeordnet.

Die Spindeleinheit weist bevorzugt ein Gehäuse auf, in welchem die Spindelwelle angeordnet ist. Das Gehäuse ist in der Regel feststehend, so dass die Spindelwelle relativ zu diesem um die Rotationsachse rotieren kann.

Bei der Antriebseinheit handelt es sich bevorzugt um einen Elektromotor mit einer Statoreinheit, die fest mit dem Gehäuse verbunden ist, und mit einer Rotoreinheit, die drehfest am Kraftübertragungsabschnitt der Spindelwelle angebracht ist.

Die erste und die zweite Lagerstelle sind in Axialrichtung an unterschiedlichen Positionen der Spindelwelle angeordnet und dabei mit ihren Lagern und insbesondere Lagertaschen in Axialrichtung in der Regel beabstandet zueinander angeordnet. Die zu demselben Lager gehörenden Lagertaschen sind, bezogen auf die Axialrichtung, bevorzugt jeweils an derselben Stelle und, wenn möglich, in regelmässigen Abständen um die Rotationsachse

herum verteilt angeordnet. Die Lager der ersten und zweiten Lagerstelle können mit gleichen oder unterschiedlichen Durchmessern ausgeführt sein.

Bei der Befestigungsvorrichtung kann es sich um einen Flansch, eine Konus-Aufnahme oder um eine beliebige Befestigungsmöglichkeit handeln. Bevorzugt dient die Befestigungsvorrichtung zum Anbringen eines insbesondere im Wesentlichen hohlzylindrischen Schleifwerkzeugs. Das Schleifwerkzeug kann beispielsweise eine Schleifschnecke oder eine Profilschleifscheibe sein. Die Befestigungsvorrichtung kann aber auch zum Anbringen eines zu bearbeitenden Werkstücks oder eines Abrichtwerkzeugs dienen.

Bevorzugt ist die erste oder die zweite Lagerstelle, noch bevorzugter sowohl die erste als auch die zweite Lagerstelle konisch ausgebildet. Mittels einer konischen Ausbildung des ersten und/oder des zweiten Lagers kann eine sowohl axiale als auch radiale Lagerung der Spindelwelle erreicht werden, wobei dieselben Lagertaschen dann sowohl axiale als auch radiale Kräfte aufnehmen. Alternativ können die erste und/oder die zweite Lagerstelle jeweils auch zumindest ein planares Axial- und/oder zumindest ein zylindrisches Radiallager aufweisen, welche gemeinsam die axialen und auch die radialen Kräfte aufnehmen.

Falls sowohl die erste als auch die zweite Lagerstelle konisch ausgebildet sind, sind die von diesen beiden Lagerstellen gebildeten Koni vorteilhaft in Bezug auf die Rotationsachse in einander entgegengesetzte Richtungen ausgerichtet. Damit können sehr vorteilhaft Kippmomente, aber auch axiale Kräfte sowohl in Richtung der Rotationsachse als auch entgegengesetzt dazu aufgenommen werden. Vorteilhaft verjüngen sich die Koni des ersten und zweiten Lagers jeweils zueinander hin. Eine derartige Lageranordnung mit sich jeweils zueinander hin verjüngenden Koni ist dem Fachmann als sogenannte O-Anordnung bekannt. Eine X-Anordnung des ersten und des zweiten Lagers wäre grundsätzlich auch denkbar. Wegen ihrer höheren Kippsteifigkeit ist eine O-Anordnung aber vorteilhaft.

Die von der ersten und/oder von der zweiten Lagerstelle gebildeten Koni weisen bevorzugt in Bezug auf die Rotationsachse einen Öffnungswinkel in einem Bereich von 10° bis 60°

auf. Es hat sich gezeigt, dass bei einem derartigen Öffnungswinkel radiale und axiale Kräfte optimal aufgenommen werden können, so dass unerwünschte Schwingungen des Schleifwerkzeugs bzw. des Werkstücks minimiert werden.

Beim hydrostatischen und/oder hydrodynamischen Lager der dritten Lagerstelle kann es sich insbesondere um ein Radiallager handeln. Das Lager der dritten Lagerstelle kann aber auch zur Aufnahme von sowohl in Axialrichtung als auch in Radialrichtung wirkenden Kraftkomponenten dienen. In diesem Fall kann die dritte Lagerstelle insbesondere ein konisch ausgebildetes Lager aufweisen, welches vorteilhaft auf die Spindelwelle in Axialrichtung wirkende Zugkräfte aufnehmen kann. Alternativ oder zusätzlich zu einem Radiallager kann die dritte Lagerstelle ein Axiallager aufweisen, welches insbesondere ein hydrostatisches Lager sein kann. Bei der dritten Lagerstelle kann es sich somit auch um ein Axiallager oder ein Axial-Radial-Lager handeln. Indem im zweiten Lagerungsabschnitt auch die in Axialrichtung wirkenden Kraftkomponenten durch die dritte Lagerstelle aufgenommen werden, kann das System zusätzlich gedämpft und/oder versteift werden.

In der Regel weist die erste Lagerstelle eine oder mehrere erste Lagertaschen auf, und die zweite Lagerstelle weist eine oder mehrere zweite Lagertaschen auf. Bevorzugt ist zumindest ein erster Druckregler zur Regelung der in den ersten Lagertaschen herrschenden Druckverhältnisse vorgesehen und zudem zumindest ein zweiter Druckregler, welcher zur Regelung der in den zweiten Lagertaschen herrschenden Druckverhältnisse dient. Der oder die zweiten Druckregler sind dabei vorteilhaft in Bezug auf den oder die ersten Druckregler separat ausgebildet, womit gemeint ist, dass die in den entsprechenden Lagertaschen herrschenden Druckverhältnisse unabhängig voneinander regelbar sind. Indem für die beiden Lager jeweils separat voneinander ausgebildete Druckregler vorgesehen werden, können diese insgesamt einfacher und platzsparender untergebracht werden. Die Lagerdrücke können zudem unabhängig voneinander eingestellt werden, wobei das betriebslastfreie Kräftegleichgewicht im Lagersystem erhalten bleiben muss.

Der oder die ersten und zweiten Druckregler sind vorteilhaft jeweils im Bereich des ersten Lagerungsabschnittes und, falls vorhanden, der oder die dritten Druckregler im Bereich des zweiten Lagerungsabschnittes angeordnet. Insbesondere vorteilhaft sind der oder die ersten

Druckregler, der oder die zweiten Druckregler und bevorzugt auch der oder die dritten Druckregler bezogen auf die Axialrichtung jeweils im Wesentlichen auf derselben Höhe wie die erste, die zweite bzw. die dritte Lagerstelle angeordnet. Die ersten, zweiten und dritten Druckregler können dabei insbesondere jeweils in einer oder mehreren feststehenden Hülsen untergebracht sein, welche insbesondere zur Lagerung der Spindelwelle dienen und drehfest an einem Gehäuse angebracht sind.

Falls mehrere erste Lagertaschen und mehrere zweite Lagertaschen sowie mehrere erste Druckregler und mehrere zweite Druckregler vorhanden sind, sind bevorzugt jeder der ersten Lagertaschen jeweils einer der ersten Druckregler und jeder der zweiten Lagertaschen jeweils einer der zweiten Druckregler zugeordnet. Es sind somit bevorzugt gleich viele erste Druckregler wie erste Lagertaschen und gleich viele zweite Druckregler wie zweite Lagertaschen vorhanden. Die Druckverhältnisse der einzelnen Lagertaschen sind dadurch individuell regelbar.

Vorteilhaft weist die dritte Lagerstelle ein hydrostatisches Lager mit einer oder mehreren dritten Lagertaschen auf, die bezogen auf die Axialrichtung bevorzugt jeweils auf derselben Höhe und, wenn möglich, in regelmässigen Abständen um die Rotationsachse herum verteilt angeordnet sind. Bevorzugt ist dann zumindest ein dritter Druckregler vorgesehen, welcher zur Regelung der in den dritten Lagertaschen herrschenden Druckverhältnisse dient und in Bezug auf den oder die ersten und auf den oder die zweiten Druckregler separat ausgebildet ist. Falls mehrere dritte Lagertaschen sowie mehrere dritte Druckregler vorhanden sind, ist vorteilhaft jeder der dritten Lagertaschen jeweils einer der dritten Druckregler zugeordnet. Es ergeben sich dadurch für die dritte Lagerstelle die in den beiden vorhergehenden Abschnitten bzgl. der ersten und zweiten Lagerstelle erwähnten Vorteile.

Die Wärmeabführung aus der ersten und der zweiten, bevorzugt auch der dritten Lagerstelle wird vorteilhaft durch ein in den Lagertaschen der hydrostatischen Lager vorgesehenes Fluid bewerkstelligt, welches hierzu in einem vorteilhaft gemeinsamen Fluidkreislauf durch die Lagertaschen der ersten, zweiten und bevorzugt auch der dritten Lagerstelle und durch eine Kühleinrichtung zirkuliert. Diese äusserst wirksame Kühlung gewährleistet weiterhin quasi drehzahlunabhängige Lagereigenschaften. Der Fluidkreislauf

kann gleichzeitig auch zur Schmierung der jeweiligen Lagerstellen dienen.

Bevorzugt dient der Fluidkreislauf zudem zur Kühlung der Antriebseinheit. Auf diese Weise kann eine äusserst einfache und effiziente Schmierung und Kühlung der verschiedenen Lagerstellen und der Antriebseinheit mit demselben im Fluidkreislauf zirkulierenden Fluid erreicht werden. Die Kühlung dieses Fluids kann mittels einer einzigen im Kreislauf angeordneten Kühleinrichtung bewerkstelligt werden. Vorzugsweise ist ein gemeinsames Fluidreservoir vorhanden, welches zur Aufnahme des für die Schmierung und/oder Kühlung der Lagerstellen sowie für die Kühlung der Antriebseinheit verwendeten Fluids ausgebildet ist. Die verschiedenen Lagerstellen sind bevorzugt parallel zueinander im Fluidkreislauf angeordnet. Eine Serienschaltung der Lagerstellen im Fluidkreislauf wäre aber auch denkbar. Ebenso ist die Antriebseinheit bevorzugt parallel zu den Lagerstellen im Fluidkreislauf angeordnet, wobei auch hier eine Serienschaltung grundsätzlich denkbar wäre.

Vorteilhaft weisen der oder die ersten, der oder die zweiten und vorzugsweise auch der oder die dritten Druckregler jeweils eine kompakte Bauweise auf. Die Druckregler können insbesondere jeweils in nach aussen hin im Wesentlichen abgeschlossenen, kompakten Gehäusen untergebracht sein, welche mit der bzw. den Lagertaschen der jeweiligen Lagerstelle via eine Druckleitung verbunden sind.

Gemäss einer Weiterbildung der Erfindung basieren der oder die ersten, der oder die zweiten und vorzugsweise auch der oder die dritten Druckregler jeweils ausschliesslich auf mechanischen und/oder hydraulischen Elementen. Dadurch entfällt eine aufwändige elektronische Druckregelung mit einer entsprechenden Verkabelung. Bevorzugt sind die ersten, die zweiten und, falls vorhanden, vorteilhaft auch die dritten Druckregler als sogenannte PM-Regler (Progressiv-Mengen-Regler), wie in der EP 0 840 190 B1 offenbart, ausgebildet, deren Inhalt hiermit in ihrer Gesamtheit durch Bezugnahme in die vorliegende Beschreibung aufgenommen wird. Unter einem PM-Regler wird ein Regler verstanden, welcher gemäss einem der Ansprüche 1, 4, 10, 11 und 14 der EP 0 840 190 B1 ausgebildet ist. Wenn dieser kompakte in der EP 0 840 190 B1 offenbarte PM-Regler in Spindeleinheiten mit hydrostatischer Spindellagerung eingesetzt wird, sind störende Schwingungen quasi vermeidbar, und der relativ einfache miniaturisierbare Aufbau

ermöglicht die Anordnung unmittelbar an der jeweiligen Spindel. Weiterhin arbeitet dieser PM-Regler mit einer relativ geringen Verlustleistung durch mögliche Verwendung niedrigviskoser Öle oder Wasser oder Emulsionen und bei gleichzeitiger Gewährleistung einer höheren Lagersteife gegenüber alternativen Reglersystemen.

Alternativ kann die Druckreglung in den ersten, zweiten und/oder dritten Druckreglern aber zum Beispiel auch mittels Kapillaren und/oder Drosseln und/oder Blenden und/oder mittels elektronischer Steuerung oder weiteren dem Stand der Technik entsprechenden Regelungen von hydrostatischen Lagerungen erfolgen. Ausserdem können auch hydrodynamische Lagerungsprinzipien aus dem Stand der Technik zum Einsatz kommen.

In der Regel ist am Befestigungsabschnitt der Spindelwelle eine Befestigungsvorrichtung zum Anbringen eines Werkzeugs oder eines zu bearbeitenden Werkstücks angebracht. Die erste und die zweite Lagerstelle können in Axialrichtung jeweils zwischen der Befestigungsvorrichtung und dem Kraftübertragungsabschnitt angeordnet sein. Indem die erste und die zweite Lagerstelle in Axialrichtung beabstandet zur Befestigungsvorrichtung und insbesondere ausserhalb des Bereiches, in welchem das Schleifwerkzeug bzw. Werkstück entlang der Rotationsachse zu liegen kommt, angeordnet sind, kann der in Radialrichtung gemessene Spindeldurchmesser im Bereich der Befestigungsvorrichtung minimal sein. Dies ermöglicht ein Anbringen von Schleifwerkzeugen bzw. Werkstücken mit sehr kleinen Bohrungs- bzw. Innendurchmessern. Schleifwerkzeuge bzw. Werkstücke mit kleinen Bohrungsdurchmessern werden beispielsweise dann verwendet, wenn im Hinblick auf hohe Drehzahlen in Radialrichtung eine gewisse Wandstärke bei einem gleichzeitig limitierten Aussendurchmesser benötigt wird.

Die erste Lagerstelle kann in Axialrichtung aber auch im Bereich der Befestigungsvorrichtung, das heisst entlang der Rotationsachse, im Wesentlichen auf derselben Höhe oder zumindest teilweise auf derselben Höhe wie die Befestigungsvorrichtung, angeordnet sein. Der erste Lagerungsabschnitt und der Befestigungsabschnitt überlappen sich dann gegenseitig in Axialrichtung. Dadurch kann die Biegesteifigkeit der Spindelwelle positiv beeinflusst werden; allfällige unerwünschte Schwingungen werden unmittelbar beim Schleifwerkzeug bzw. Werkstück gedämpft, und die Gesamtlänge der Spindelwelle kann minimiert werden.

Insbesondere falls sich der erste Lagerungsabschnitt und der Befestigungsabschnitt in Axialrichtung gegenseitig überlappen, sind der oder die ersten Druckregler bevorzugt entlang der Axialrichtung im Bereich der Befestigungsvorrichtung und insbesondere bevorzugt in Radialrichtung innerhalb der Befestigungsvorrichtung angeordnet.

Vorteilhaft weist die Spindeleinheit zusätzlich ein an der Spindelwelle angeordnetes Winkelmessgerät auf. Dieses Winkelmessgerät hat bevorzugt eine oder mehrere der folgenden Funktionen:

- Drehzahlistwertgeber für die Drehzahlregelung
- Positionsgeber für die Lageregelung
- Elektrische Kommutierung zum Beispiel eines Synchronmotors

Dadurch kann die Drehbewegung des an der Spindelwelle angebrachten Schleifwerkzeugs oder Werkstücks optimal mit derjenigen des Werkstücks bzw. Schleifwerkzeugs synchronisiert werden. Eine genaue Synchronisation der beiden Drehbewegungen von Schleifwerkzeug und Werkstück ist notwendig, um eine hohe Schleifqualität erzielen zu können. Es können eines oder mehrere Winkelmessgeräte vorgesehen sein. Um eine möglichst genaue Messung zu gewährleisten, ist das Winkelmessgerät vorteilhaft am Befestigungsabschnitt oder unmittelbar neben dem Befestigungsabschnitt angeordnet. Alternativ oder zusätzlich kann ein Winkelmessgerät aber auch am zweiten Lagerungsabschnitt angeordnet sein. Eine Anordnung des Winkelmessgeräts am zweiten Lagerungsabschnitt bietet sich deshalb an, weil die Platzverhältnisse für das Winkelmessgerät dort oft günstiger sind und weil der zweite Lagerungsabschnitt üblicherweise besser zugänglich ist, so dass das Winkelmessgerät bei der Montage und/oder zur Wartung einfacher an der Werkzeugmaschine montierbar bzw. von dieser entfernbar ist. Durch die radiale Stabilisierung der Spindelwelle an der dritten Lagerstelle werden durch das Winkelmessgerät registrierte Messfehler infolge Biegung der Spindelwelle erheblich vermindert. Dies ist ein weiterer und wesentlicher Vorteil dieser Lageranordnung. Ist die dritte Lagerstelle derart ausgebildet, dass neben Radialkräften auch noch Axialkräfte, die als Zugkräfte auf die Spindelwelle wirken, aufgenommen werden, dann kann eine noch wirkungsvollere Stabilisierung der Spindelwelle erreicht werden.

Es hat sich gezeigt, dass eine optimale Abdichtung der Lagertaschen der ersten und der zweiten Lagerstelle, bevorzugt auch der dritten Lagerstelle erreicht werden kann, wenn zu diesem Zweck jeweils Sperrluftdichtungen vorgesehen sind. Die Sperrluftdichtungen dichten die Lagertaschen der ersten, zweiten und bevorzugt auch der dritten Lagerstelle jeweils in Axialrichtung vorteilhaft zu beiden Seiten nach aussen hin ab.

## KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

Bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung werden im Folgenden anhand der Zeichnungen beschrieben, die lediglich zur Erläuterung dienen und nicht einschränkend auszulegen sind. In den Zeichnungen zeigen:

Fig. 1 eine perspektivische Ansicht einer erfindungsgemässen Spindeleinheit einer Werkzeugmaschine gemäss einer ersten erfindungsgemässen Ausführungsform;

Fig. 2 eine zentrale Schnittansicht einer nicht erfindungsgemässen Spindeleinheit einer Werkzeugmaschine mit Spindelwelle, welche nur im ersten Lagerungsabschnitt (B), nicht aber im zweiten Lagerungsabschnitt (D) radial gelagert ist, zur Illustration eines möglichen charakteristischen Biegeverhaltens der Spindelwelle;

Fig. 3 eine zentrale Schnittansicht der Spindeleinheit der Fig. 1 mit Spindelwelle, welche sowohl im ersten Lagerungsabschnitt (B) als auch im zweiten Lagerungsabschnitt (D) radial gelagert ist, zur Illustration eines möglichen Biegungsverhaltens der Spindelwelle;

Fig. 4a eine zentrale Schnittansicht durch die Spindeleinheit der Fig. 1;

Fig. 4b eine perspektivische Ansicht der zentral entlang ihrer Rotationsachse aufgeschnittenen Spindeleinheit der Fig. 1 ohne Spindelwelle;

Fig. 4c eine Schnittansicht durch die in der Figur 4a angegebene Ebene I-I;

Fig. 4d eine Schnittansicht durch die in der Figur 4a angegebene Ebene II-II;

Fig. 4e eine Schnittansicht durch die in der Figur 4a angegebene Ebene III-III;

Fig. 5 eine zentrale Schnittansicht durch eine Spindeleinheit einer Werkzeugmaschine gemäss einer zweiten erfindungsgemässen

Ausführungsform;

Fig. 6 eine zentrale Schnittansicht durch eine Spindeleinheit einer Werkzeugmaschine gemäss einer dritten erfindungsgemässen Ausführungsform;

Fig. 7 eine zentrale Schnittansicht durch eine Spindeleinheit einer Werkzeugmaschine gemäss einer vierten erfindungsgemässen Ausführungsform;

Fig. 8 das Schema eines beispielhaften Fluidkreislaufs zur Schmierung der Lagerstellen einer erfindungsgemässen Spindeleinheit einer Werkzeugmaschine sowie

Fig. 9 eine Detailansicht des Schemas der Figur 8 im Bereich der Spindelwelle.

## BESCHREIBUNG BEVORZUGTER AUSFÜHRUNGSFORMEN

In den Figuren 1 bis 7 sind verschiedene Ausführungsformen der Spindeleinheiten von Werkzeugmaschinen zur Feinbearbeitung von Werkstücken mit nutförmigen Profilen gezeigt. Gleichwirkende Elemente sind bei den verschiedenen Ausführungsformen jeweils mit den gleichen Bezugszeichen versehen.

Die in den Figuren 1 bis 7 gezeigten Spindeleinheiten weisen jeweils eine Spindelwelle 2 mit einem daran angebrachten Schleifwerkzeug 4 auf. Die in den Figuren 1 bis 7 gezeigten Spindelwellen sind somit Werkzeugspindeln für den Einsatz in Werkzeugmaschinen, wie insbesondere Zahnradschleifmaschinen.

Die Figur 1 zeigt eine perspektivische Ansicht einer erfindungsgemässen Spindeleinheit einer Werkzeugmaschine mit einem Gehäuse 1 und einer darin drehbar gelagerten Spindelwelle 2. Im Bereich ihres ersten Endes ist an der Spindelwelle 2 ein Schleifwerkzeug 4 angebracht. Beim Schleifwerkzeug 4 kann es sich insbesondere um eine Schleifschnecke handeln, wie sie zum Schleifen von Zahnrädern eingesetzt wird.

Die Figuren 2 und 3 illustrieren in jeweils einer zentralen Schnittansicht schematisch eines von vielen möglichen charakteristischen Biegungsverhalten der Spindelwelle 2, welche bei

der in der Figur 2 beispielhaft gezeigten Zahnradschleifmaschine nur im ersten Lagerungsabschnitt B an den zwei Lagerstellen 13 und 14 gelagert ist und bei der beispielhaften Zahnradschleifmaschine der Figur 3 eine zusätzliche Lagerung an einer dritten Lagerstelle 15 aufweist. Aus darstellerischen Gründen sind in den Figuren 2 und 3 jeweils einige Elemente der Spindeleinheit weggelassen, wie beispielsweise das Gehäuse und die Antriebseinheit. Ebenfalls aus darstellerischen Gründen ist das Biegungsverhalten der Spindelwelle 2 in den Figuren 1 und 2 jeweils stark übertrieben dargestellt. Auch wurde dieses Biegeverhalten schematisch dargestellt. Es ist dem Fachmann bekannt, dass das Biegeverhalten je nach Drehzahl oder Drehfrequenz sehr starke Änderungen aufweisen kann.

Die in den Figuren 2 und 3 gezeigten Spindelwellen 2 weisen jeweils einen Befestigungsabschnitt A auf, an welchem eine Befestigungsvorrichtung in Form eines Schleifwerkzeugflansches 3 mit einem daran angebrachten Schleifwerkzeug 4 angeordnet ist. In den Figuren 2 bis 7 wird das Schleifwerkzeug 4 jeweils beispielhaft mittels eines Schleifwerkzeugflansches 3 auf der Spindelwelle 2 befestigt. Es ist auch denkbar, das Schleifwerkzeug 4 direkt (ohne einen Schleifwerkzeugflansch 3) auf der Spindelwelle 2 zu befestigen. Im Weiteren kann das zylindrisch dargestellte Schleifwerkzeug 4 (bzw. das Abrichtwerkzeug und/ oder das Werkstück) auch scheibenförmig sein. In einem Kraftübertragungsabschnitt C wird die Spindelwelle 2 mittels einer hier nicht gezeigten Antriebseinheit in eine Drehbewegung um die Rotationsachse RA versetzt. Zwischen dem Befestigungsabschnitt A und dem Kraftübertragungsabschnitt C weisen die in den Figuren 2 und 3 gezeigten Spindelwellen 2 jeweils einen ersten Lagerungsabschnitt B mit den zwei Lagerstellen 13 und 14 auf. Die dritte Lagerstelle 15, welche bei der in der Figur 3 gezeigten Spindelwelle 2 zusätzlich vorgesehen ist, ist in einem zweiten Lagerungsabschnitt D auf der zum ersten Lagerungsabschnitt B gegenüberliegenden Seite des Kraftübertragungsabschnitts C angeordnet. Die ersten und zweiten Lagerstellen 13 und 14 werden jeweils durch ein konisch ausgebildetes Axial-Radial-Lager gebildet, die dritte Lagerstelle 15 durch ein zylindrisches Radiallager

Bei hohen Drehgeschwindigkeiten der Spindelwelle 2 um die Rotationsachse RA tendiert die Spindelwelle 2 aus verschiedenen Gründen dazu, zu schwingen und sich entsprechend zu verbiegen. Die üblicherweise im Ruhezustand mit der Rotationsachse RA

zusammenfallende Längsmittellinie der Spindelwelle 2 biegt sich dann in gewissen Bereichen in radialer Richtung von der Rotationsachse RA weg, wie es in den Figuren 2 und 3 mittels der Biegelinie BL dargestellt ist.

Bei der in der Figur 2 gezeigten nicht erfindungsgemässen Spindeleinheit einer Werkzeugmaschine ist die Spindelwelle 2 nur im ersten Lagerungsabschnitt B an den zwei Lagerstellen 13 und 14 gelagert. In diesem Fall biegt sich die Spindelwelle 2 in ihren Endbereichen, also im Bereich des ersten Spindelendes 20 und im Bereich des zweiten Spindelendes 21, jeweils stark mit ihrer Längsmittellinie von der Rotationsachse RA weg. Das Wegbiegen eines Bereiches der Spindelwelle 2 von der Rotationsachse RA ist umso stärker, je weiter weg sich der Bereich von der nächsten Lagerstelle 13 bzw. 14 befindet. Das Schwingungsverhalten der Spindelwelle 2 ist somit in den Bereichen des ersten und zweiten Spindelendes 20 und 21 am stärksten ausgeprägt. Dies ist gerade deshalb ungünstig, weil das erste Spindelende 20 durch den Befestigungsabschnitt A gebildet wird, an welchem das Schleifwerkzeug 4 angebracht ist. Die verhältnismässig starken Schwingungen des ersten Spindelendes 20 übertragen sich dadurch direkt auf das Schleifwerkzeug 4 und beeinträchtigen somit die Oberflächenqualität des Werkstücks. Genauso oder bei bestimmten Frequenzen / Drehzahlen noch ausgeprägter verhält es sich mit dem Spindelende 21, an dem in den meisten Ausführungen ein Winkelmessgerät 19a (siehe Figur 4a) angeordnet ist. Auch hier beeinflussen die relativ starken Schwingungen das Schleifergebnis, da es hier zu Messfehlern kommen kann.

Bei einer zusätzlichen radialen Lagerung der Spindelwelle 2 im zweiten Lagerungsabschnitt D, wie es in der Figur 3 gezeigt ist, werden Schwingungen nicht nur im Bereich des zweiten Lagerungsabschnitts D selbst vermindert, was für das Winkelmessgerät 19a von hoher Bedeutung ist, sondern auch im Befestigungsabschnitt A. Die Spindelwelle 2 wird somit bei hohen Drehgeschwindigkeiten insgesamt und insbesondere im Bereich des Befestigungsabschnitts A wie auch im zweiten Lagerungsabschnitt D weniger stark verbogen. Die wesentlich verminderten Schwingungen des Befestigungsabschnitts A und des Lagerungsabschnitts D führen zu einer verbesserten Schleifqualität.

Die Figuren 4a bis 4d zeigen ein erfindungsgemässes Ausführungsbeispiel einer

Spindeleinheit einer Zahnradschleifmaschine mit einer Spindelwelle 2, welche entlang der Rotationsachse RA der Reihe nach in einen Befestigungsabschnitt A, einen ersten Lagerungsabschnitt B, einen Kraftübertragungsabschnitt C und einen zweiten Lagerungsabschnitt D unterteilt ist. Die einzelnen Abschnitte A, B, C und D grenzen dabei jeweils, ohne sich gegenseitig zu überlappen, unmittelbar aneinander an.

Die Rotationsachse RA entspricht der Längsmittelachse der Spindelwelle 2. Die Spindelwelle 2 definiert mit ihrer Rotationsachse RA eine mit der Rotationsachse RA korrespondierende Axialrichtung AR sowie eine dazu rechtwinklig stehende Schar von Radialrichtungen RR.

Mit dem Gehäuse 1 drehfest verbunden ist eine Statoreinheit 6. Die Statoreinheit 6 ist Teil einer Antriebseinheit 5 in Form eines elektrischen Motors, der zum Antreiben der Spindelwelle 2 in einer Rotationsbewegung um ihre Rotationsachse RA dient. An der Spindelwelle 2 ist unmittelbar angrenzend zur Statoreinheit 6 eine Rotoreinheit 7 drehfest angebracht, welche ebenfalls einen Teil der Antriebseinheit 5 bildet. Die Rotoreinheit 7 wird hier durch eine Vielzahl von Permanentmagneten gebildet, welche umlaufend an der Aussenseite der Spindelwelle 2 angebracht sind. Während die Spindelwelle 2 von der Rotoreinheit 7 radial umgeben ist, umgibt die Statoreinheit 6 die Rotoreinheit 7. Die Spindelwelle 2, die Rotoreinheit 7 und die Statoreinheit 6 sind konzentrisch zueinander angeordnet. In Radialrichtung zwischen der Statoreinheit 6 und dem Gehäuse 1 ist ein Kühlkanal 25 oder sind mehrere Kühlkanäle zum Durchführen eines Kühlmittels vorgesehen, um die im Betrieb in der Antriebseinheit 5 entstehende Wärmeenergie abzuführen.

Der Kraftübertragungsabschnitt C der Spindelwelle 2 wird durch die Anordnung der Antriebseinheit 5 und insbesondere der Rotoreinheit 7 entlang der Rotationsachse RA definiert und erstreckt sich in Axialrichtung AR zumindest von einem ersten Ende 8 der Rotoreinheit 7 bis zu einem zweiten Ende 9 der Rotoreinheit 7. Im Betrieb der Spindeleinheit wird entlang des Kraftübertragungsabschnitts C Antriebskraft von der Antriebseinheit 5 auf die Spindelwelle 2 übertragen, wodurch die Spindelwelle 2 in eine Drehbewegung um ihre Rotationsachse RA versetzt wird.

Im Bereich des ersten Spindelendes 20 ist am Befestigungsabschnitt A der Spindelwelle 2 ein Schleifwerkzeugflansch 3 angebracht, welcher als Befestigungsvorrichtung zum drehfesten Anbringen eines Schleifwerkzeugs 4 dient. Wenn das Schleifwerkzeug 4 am Schleifwerkzeugflansch 3 montiert ist, ragt die Spindelwelle 2 in Axialrichtung AR in eine Bohrung des Schleifwerkzeugs 4 hinein oder hindurch. Es ist genauso denkbar, ein Schleifwerkzeug derart zu befestigen, dass das Spindelende nicht oder nur teilweise durch dieses hindurch ragt.

Am zweiten Spindelende 21 ist beispielhaft ein erstes Winkelmessgerät 19a zur Erfassung der jeweiligen Winkelposition der Spindelwelle 2 um ihre Rotationsachse RA vorgesehen. Ein zweites Winkelmessgerät 19b ist ebenfalls beispielhaft am ersten Lagerungsabschnitt B, unmittelbar angrenzend zum Befestigungsabschnitt A, an der Spindelwelle angeordnet. Mit Hilfe der Winkelmessgeräte 19a und/oder 19b kann gewährleistet werden, dass die Rotationsgeschwindigkeit der Spindelwelle 2 und somit des Schleifwerkzeugs 4 während des Schleifvorgangs möglichst genau dem Sollwert der Steuerung der Maschine entspricht. Die Winkelmessgeräte können auch an einer anderen Stelle längs der Spindelachse, beispielhaft im Übergangsbereich vom ersten Lagerungsabschnitt B zum Kraftübertragungsabschnitt C, angeordnet sein und/oder es kann auch nur ein Winkelmessgerät angeordnet sein.

Die Spindelwelle 2 weist entlang der Axialrichtung AR eine erste, eine zweite und eine dritte Lagerstelle 13, 14, 15 auf. Die erste Lagerstelle 13 und die zweite Lagerstelle 14 sind jeweils an einer ersten feststehenden Hülse 26 vorgesehen, welche drehfest am Gehäuse 1 angebracht ist. Die dritte Lagerstelle 15 ist an einer zweiten feststehenden Hülse 27 angeordnet, welche ebenfalls drehfest am Gehäuse 1 angebracht ist.

Die erste Lagerstelle 13 und die zweite Lagerstelle 14 sind in Axialrichtung AR beabstandet zueinander am ersten Lagerungsabschnitt B, welcher sich zwischen dem Schleifwerkzeugflansch 3 und der Rotoreinheit 7 erstreckt, angeordnet. Um hohe Drehgeschwindigkeiten zu ermöglichen und zudem allfällig auftretende Schwingungen optimal zu dämpfen, werden sowohl die erste Lagerstelle 13 als auch die zweite Lagerstelle 14 jeweils durch ein hydrostatisches Lager gebildet. Die Lager der Lagerstellen 13 und 14 sind jeweils konisch ausgebildet und weisen mehrere (beispielhaft sind jeweils 4

Lagertaschen dargestellt) in regelmässigen Abständen um die Spindelwelle 2 herum angeordnete Lagertaschen 13a, 13b, 13c, 13d bzw. 14a, 14b, 14c, 14d auf (siehe Figuren 4c und 4d). In Axialrichtung AR sind die Lagertaschen 13a, 13b, 13c, 13d bzw. 14a, 14b, 14c, 14d der Lagerstellen 13 und 14 zu beiden Seiten hin jeweils mittels Sperrluftdichtungen nach aussen hin abgedichtet. In Axialrichtung AR zwischen den Lagerstellen und den Sperrluftdichtungen befinden sich zu beiden Seiten hin in der Regel beispielhaft Rückführkanäle für das Fluid.

Die konische Ausbildung der ersten Lagerstelle 13 und der zweiten Lagerstelle 14 bedingt, dass diese jeweils in einem Bereich der Spindelwelle 2 angeordnet sind, welcher sich entlang der Axialrichtung AR konisch verjüngt bzw. konisch aufweitet. In der vorliegenden Ausführungsform verjüngt sich das Lager der ersten Lagerstelle 13 entlang der sich vom ersten Spindelende 20 zum zweiten Spindelende 21 erstreckenden Axialrichtung AR. Das Lager der zweiten Lagerstelle 14 weitet sich dagegen in Richtung vom ersten Spindelende 20 zum zweiten Spindelende 21 konisch auf. Die von den Lagern der ersten und der zweiten Lagerstelle 13, 14 gebildeten Koni sind somit mit ihren Öffnungswinkeln $\alpha$ entlang der Axialrichtung AR in einander entgegengesetzte Richtungen ausgerichtet. Die bezogen auf die Rotationsachse RA gemessenen Öffnungswinkel $\alpha$ (siehe Fig. 4) der Lager der ersten und der zweiten Lagerstelle 13, 14 betragen bevorzugt jeweils zwischen 10° und 60°. Aufgrund ihrer konischen Ausgestaltung sind die Lager der Lagerstellen 13 und 14 jeweils zur Aufnahme von sowohl in Radialrichtung RR als auch in Axialrichtung AR wirkenden Kräften ausgebildet.

Die dritte Lagerstelle 15 wird durch ein zylindrisches Radiallager gebildet, welches am zweiten Lagerungsabschnitt D der Spindelwelle 2 angeordnet ist. Der zweite Lagerungsabschnitt D erstreckt sich in Axialrichtung AR vom Kraftübertragungsabschnitt C bis zum zweiten Spindelende 21. Das Lager der dritten Lagerstelle 15 dient dazu, das zweite Spindelende 21 der Spindelwelle 2 in Radialrichtung RR zu stabilisieren. Dadurch wird einerseits verhindert, dass sich radiale Schwingungen im Bereich der Befestigungseinrichtung verstärken und dadurch den Rundlauf des Schleifwerkzeugs 4 und somit die Schleifqualität beeinträchtigen. Andererseits vermindert das Lager der dritten Lagerstelle 15 Messfehler, welche infolge der Spindelbiegung am zweiten Spindelende 21 und somit beim Winkelmessgerät 19a entstehen. Derartige Messfehler können im Betrieb

der Zahnradschleifmaschine zu asynchronen Rotationsbewegungen des Schleifwerkzeugs 4 und des zu schleifenden Werkstücks und somit zu einer beeinträchtigten Schleifqualität führen.

Um relativ hohe Drehzahlen von 3000 oder gar noch mehr Umdrehungen pro Minute zu ermöglichen, wird auch die dritte Lagerstelle 15 durch ein hydrostatisches Lager gebildet. Dieses weist mehrere (beispielhaft sind auch hier 4 Lagertaschen dargestellt) Lagertaschen 15a, 15b, 15c, 15d auf, welche in regelmässigen Abständen um die im Bereich des dritten Lagers 15 entsprechend zylindrisch ausgebildete Spindelwelle 2 herum angeordnet sind (siehe Figur 4e). Auch die Lagertaschen 15a, 15b, 15c, 15d der dritten Lagerstelle 15 sind in Axialrichtung AR jeweils zu beiden Seiten hin mittels Sperrluftdichtungen nach aussen hin abgedichtet. In Axialrichtung AR zwischen den Lagerstellen und den Sperrluftdichtungen befinden sich zu beiden Seiten hin in der Regel beispielhaft Rückführkanäle für das Fluid. Die dritte Lagerstelle 15 kann anstatt durch ein hydrostatisches auch durch ein hydrodynamisches Lager gebildet werden.

Die dritte Lagerstelle 15 ist hier insbesondere derart ausgebildet und an der Spindelwelle 2 angeordnet, dass Bewegungen der Spindelwelle 2 entlang der Axialrichtung AR durch das Lager der dritten Lagerstelle 15 hindurch zu einem gewissen Masse möglich sind. Längenausdehnungen der Spindelwelle 2, welche während dem Betrieb der Zahnradschleifmaschine aufgrund der Erwärmung der Spindelwelle 2 verursacht werden, wirken sich dadurch nicht auf die Spindellagerung in der dritten Lagerstelle 15 aus. Da die erste Lagerstelle 13 und die zweite Lagerstelle 14 zudem sehr nahe nebeneinander und beim Schleifwerkzeug 4 angeordnet sind, führt eine temperaturbedingte Längenänderung der Spindelwelle 2 zwar zu einer gewissen Verschiebung der Spindelwelle 2 entlang der Axialrichtung AR im Bereich ihres zweiten Lagerungsabschnitts D, jedoch nur in minimalem Masse zu einer Verschiebung des Befestigungsabschnitts A und insbesondere des Schleifwerkzeugs 4.

Zur Regelung des hydrostatischen Druckes im Lager der ersten Lagerstelle 13 sind mehrere erste Druckregler 16 vorgesehen. Da jede der zum Lager der ersten Lagerstelle 13 gehörenden Lagertaschen 13a, 13b, 13c, 13d jeweils einem dieser ersten Druckregler 16 zugeordnet und mit diesem verbunden ist, entspricht die Anzahl der ersten Druckregler 16

derjenigen der Lagertaschen 13a, 13b, 13c, 13d, welche das Lager der ersten Lagerstelle 13 aufweist. Dasselbe gilt für die mehreren zweiten Druckregler 17 sowie die mehreren dritten Druckregler 18, welche zur Regelung der Druckverhältnisse in den Lagertaschen 14a, 14b, 14c, 14d bzw. 15a, 15b, 15c, 15d der zur zweiten bzw. zur dritten Lagerstelle 14 bzw. 15 gehörenden Lager dienen. Auch hier ist jeder der Lagertaschen 14a, 14b, 14c, 14d der zweiten Lagerstelle 14 jeweils einer der zweiten Druckregler 17 und jeder der Lagertaschen 15a, 15b, 15c, 15d der dritten Lagerstelle 15 jeweils einer der dritten Druckregler 18 zugeordnet.

Die ersten, zweiten und dritten Druckregler 16, 17 und 18 weisen jeweils eine kompakte Bauweise auf, so dass sie in einem nach aussen hin abgeschlossenen Gehäuse untergebracht werden können. Via jeweils eine Druckleitung ist jeder der mehreren ersten, zweiten und dritten Druckregler 16, 17 und 18 mit der entsprechend zugeordneten Lagertasche 13a, 13b, 13c, 13d bzw. 14a, 14b, 14c, 14d bzw. 15a, 15b, 15c, 15d der ersten, zweiten bzw. dritten Lagerstelle 13, 14 bzw. 15 verbunden.

Die ersten, zweiten und dritten Druckregler 16, 17 und 18 basieren bevorzugt jeweils ausschliesslich auf mechanischen Komponenten, wie zum Beispiel Federelementen, und auf hydraulischen Komponenten, wie zum Beispiel Drosseln. Der Druck in den Druck- bzw. Lagertaschen 13a, 13b, 13c, 13d bzw. 14a, 14b, 14c, 14d bzw. 15a, 15b, 15c, 15d kann dadurch ohne elektrische Energie geregelt werden, wodurch auch eine entsprechende Verkabelung entfällt. Vorteilhaft sind die Druckregler 16, 17 und 18 gemäss einem der in der EP 0 840 190 B1 offenbarten Ausführungsbeispiele ausgebildet.

Die mehreren ersten, zweiten und dritten Druckregler 16, 17 und 18 sind jeweils direkt an einem Bauteil der Spindeleinheit angebracht, welches in Radialrichtung RR unmittelbar angrenzend zu demjenigen Spindelwellenabschnitt angeordnet ist, an dem sich die mit diesem Druckregler verbundene Lagertasche 13a, 13b, 13c, 13d bzw. 14a, 14b, 14c, 14d bzw. 15a, 15b, 15c, 15d befindet. Entlang der Axialrichtung AR sind die Druckregler 16, 17 und 18 jeweils ungefähr auf der Höhe der entsprechenden Lagerstelle 13, 14 bzw. 15 angeordnet. Bei der in den Figuren 4a-4e gezeigten Ausführungsform sind die ersten Druckregler 16 und die zweiten Druckregler 17 jeweils am ersten Lagerungsabschnitt B und insbesondere in Axialrichtung AR zwischen der ersten Lagerstelle 13 und der zweiten

Lagerstelle 14 angeordnet. Die dritten Druckregler 18, von denen zwei auch in der Figur 1 erkennbar sind, befinden sich am zweiten Lagerungsabschnitt D.

Die jeweils mehreren Druckregler 16, 17 und 18 sowie die individuellen Lagertaschen 13a, 13b, 13c, 13d bzw. 14a, 14b, 14c, 14d bzw. 15a, 15b, 15c, 15d der ersten, zweiten und dritten Lagerstelle 13, 14 und 15 sind mittels eines in der Figur 4a nicht erkennbaren, aber in den Figuren 8 und 9 gezeigten und weiter unten beschriebenen, gemeinsamen Fluidkreislaufs miteinander verbunden. Im Fluidkreislauf zirkuliert ein Fluid, welches nicht nur zur Regelung der in den einzelnen Lagertaschen herrschenden Druckverhältnisse dient, sondern auch zum Kühlen und Schmieren der ersten, zweiten und dritten Lagerstelle 13, 14 und 15. Dasselbe Fluid kann zudem zur Kühlung der Antriebseinheit 5 verwendet werden.

In der Figur 5 wird eine weitere Ausführungsform einer erfindungsgemässen Spindeleinheit, welche beispielhaft an einer Zahnradschleifmaschine dargestellt wird, gezeigt. Diese Ausführungsform der Fig. 5 entspricht weitgehend der Ausführungsform der Fig. 4, mit dem Unterschied, dass die erste Lagerstelle 13 hier entlang der Axialrichtung AR auf derselben Höhe wie der Schleifwerkzeugflansch 3 und, falls ein Schleifwerkzeug 4 an diesem angebracht ist, auch auf derselben Höhe wie dieses Schleifwerkzeug 4 angeordnet ist. Der Befestigungsabschnitt A und der erste Lagerungsabschnitt B überlappen sich hier also in Axialrichtung AR teilweise. Entlang der Radialrichtung RR ist die erste Lagerstelle 13 bei der zweiten Ausführungsform dabei innerhalb des Schleifwerkzeugflansches 3 angeordnet, so dass es, falls am Schleifwerkzeugflansch 3 ein Schleifwerkzeug 4 angebracht ist, von diesem radial umgeben ist. Auch die ersten Druckregler 16 sind hier in Axialrichtung AR an derselben Stelle wie der Schleifwerkzeugflansch 3 und somit am Befestigungsabschnitt A angeordnet. Bei einem am Schleifwerkzeugflansch 3 angebrachten zylindrischen Schleifwerkzeug 4 befinden sich die ersten Druckregler 16 ebenso wie die erste Lagerstelle 13 innerhalb der Bohrung des Schleifwerkzeugs 4. Die zweite Lagerstelle 14 ist wie bei der Ausführungsform der Fig. 4 in Axialrichtung AR zwischen dem Schleifwerkzeugflansch 3 und dem ersten Rotorende 8 angeordnet.

Indem sich die erste Lagerstelle 13 innerhalb des Befestigungsabschnitts A und somit

unmittelbar im Bereich des Schleifwerkzeugflanschs 3 befindet, werden Schwingungen des Schleifwerkzeugs 4 optimal gedämpft. Ausserdem kann die Spindelwelle 2 dadurch eine kürzere Gesamtlänge aufweisen oder/und der Abstand der beiden Lager 13 und 14 lässt sich vergrössern.

Die in der Figur 5 illustrierte Ausführungsform eignet sich für Schleifwerkzeuge 4 ab einem gewissen Bohrungsdurchmesser. Für Schleifwerkzeuge 4, deren Bohrungsdurchmesser verhältnismässig klein ist, ist die in den Figuren 4a-4e illustrierte Ausführungsform aber besser geeignet, da dort die erste Lagerstelle 13 und die ersten Druckregler 16 nicht innerhalb der Bohrung des Schleifwerkzeuges 4 untergebracht werden müssen, sondern ausserhalb von dieser angeordnet sind. Die Ausführungsform der Fig. 4 eignet sich somit insbesondere für Schleifwerkzeuge 4, die für ein Schleifen mit einer sehr hohen Umfangsgeschwindigkeit ausgebildet sind und deshalb eine grosse radiale Wandstärke aufweisen.

Im Gegensatz zu der in den Figuren 4a-4e gezeigten Ausführungsform ist bei der Ausführungsform der Figur 5 das zweite Winkelmessgerät 19c beispielhaft unmittelbar angrenzend zum Kraftübertragungsabschnitt C am ersten Lagerungsabschnitt B angeordnet.

Eine weitere Ausführungsform einer erfindungsgemässen Spindeleinheit einer Zahnradschleifmaschine ist in der Figur 6 gezeigt. Diese Ausführungsform entspricht weitgehend derjenigen der Figur 5, könnte aber auch wie in den Figuren 4a-4e gestaltet sein, mit der Ausnahme, dass hier eine Einschubhülse 22 vorgesehen ist, in welcher die Spindelwelle 2 sowie die Antriebseinheit 5 untergebracht sind. Eine erste Hülsenabstützung 23a dient zur Befestigung der Einschubhülse 22 in einem entsprechend am Gehäuse 1 vorgesehenen Aufnahmebereich. Die Hülsenabstützung 23a ist beispielhaft eine Schraubverbindung, welche derart ausgebildet und angeordnet ist, dass sowohl axiale als auch radiale Kräfte von der Einschubhülse 22 auf das Gehäuse 1 übertragen werden, um von diesem aufgenommen werden zu können. Entlang der Axialrichtung AR sind weitere Hülsenabstützungen denkbar welche sich bevorzugt jeweils auf derselben Höhe wie die Lagerstellen 14 und 15 befinden und so ausgebildet sind, dass sie radiale Kräfte auf das Gehäuse 1 übertragen können. Beispielhaft sind in der Figur 6 die Hülsenabstützungen

23b und 24 dargestellt. Die Einschubhülse 22 weist einen ungefähr gleich grossen Aussendurchmesser auf wie der Innendurchmesser des entsprechenden Aufnahmebereiches des Gehäuses 1. Die Hülsenabstützung 24 kann als separates Bauteil, das beispielhaft mittels Schraubverbindung mit dem Gehäuse 1 verbunden wird, oder aber einstückig aus dem Gehäuse 1 gebildet werden.

Die in der Figur 7 gezeigte erfindungsgemässe Ausführungsform unterscheidet sich dadurch von derjenigen der Figuren 4a-4e sowie auch von denjenigen der Figuren 5 und 6, dass die Rotoreinheit 7 hier auf der Aussenseite einer Halterungshülse 10 fixiert ist, welche auf die Spindelwelle 2 aufgeschoben und drehfest an dieser befestigt ist. Die Rotoreinheit 7 kann dadurch bei der Montage bzw. zu Reparaturzwecken sehr einfach an die Spindelwelle angebracht bzw. von dieser entfernt werden. Um das Anbringen der Halterungshülse 10 zu ermöglichen, ist aber der Aussendurchmesser der Spindelwelle 2 im Kraftübertragungsabschnitt C sowie im zweiten Lagerungsabschnitt D gegenüber demjenigen der in der Figur 4a gezeigten Spindelwelle 2 etwas verringert.

In den Figuren 8 und 9 ist ein beispielhaftes Schema eines Fluidkreislaufes zur Schmierung bzw. Lagerung und Kühlung der Lagerstellen 13, 14, 15 sowie zur Kühlung der Antriebseinheit 5 gezeigt. Das in den Figuren 8 und 9 gezeigte Schema kann bei allen Ausführungsformen gemäss den Figuren 1 bis 7 eingesetzt werden.

In den Fluidkreislauf integriert ist ein gemeinsames Fluidreservoir 28, welches zur Aufnahme des Fluids dient. Das im Fluidreservoir 28 aufgenommene Fluid wird sowohl für die gesamte hydrostatische Lagerung 13, 14 und 15 als auch zur Kühlung der Antriebseinheit 5, welche zum Antreiben der Spindelwelle 2 dient, verwendet.

Mittels einer ersten und einer zweiten Fluidpumpe 30 und 31, welche gemeinsam durch einen oder getrennt durch mehrere (nicht dargestellt) Antriebsmotoren 29 angetrieben werden, kann das Fluid aus dem Fluidreservoir 28 in eine erste Fluidleitung 32a angesogen werden. Die erste Fluidleitung 32a verzweigt sich in eine zweite Fluidleitung 32b und eine dritte Fluidleitung 32c.

Innerhalb der zweiten Fluidleitung 32b ist die zweite Fluidpumpe 31 angeordnet, welche

das Fluid unter Druck den ersten, zweiten und dritten Druckreglern 16, 17 und 18 zuführt, um diese zu schmieren und zu kühlen. Die ersten, zweiten und dritten Druckregler 16, 17 und 18 sind dabei parallel zueinander im Fluidkreislauf angeordnet.

Die dritte Fluidleitung 32c, innerhalb welcher die erste Fluidpumpe 30 angeordnet ist, verzweigt sich in eine vierte Fluidleitung 32d und eine fünfte Fluidleitung 32e. Die vierte Fluidleitung 32d führt zurück zum Verzweigungspunkt, wo die erste Fluidleitung 32a in die zweite und die dritte Fluidleitung 32b und 32c mündet. Die vierte Fluidleitung 32d dient zur Kühlung und Filtration des Fluids. Ein Vorspannventil 33 und ein Wärmetauscher 34 sind hintereinander innerhalb der vierten Fluidleitung 32d angeordnet. Via die fünfte Fluidleitung 32e gelangt das Fluid zur Antriebseinheit 5, welche somit vom Fluid zu Kühlzwecken parallel in Bezug zu den Druckreglern 16, 17 und 18 durchströmt wird. Von den Druckreglern 16, 17 und 18 gelangt das Fluid via eine sechste Fluidleitung 32f zurück in das Fluidreservoir 28. Parallel dazu gelangt das Fluid via eine siebte Fluidleitung 32g von der Antriebseinheit 5 zurück in das Fluidreservoir 28.

Das beispielhafte Fluidschema für das Schmieren bzw. Lagern und Kühlen der Lagerstellen 13, 14, 15 sowie das Kühlen der Antriebseinheit 5 zeigt einen Fluidkreislauf. In den Figuren 1 bis 7 ist dieses Zu- und Rückführen des Fluids nicht dargestellt.

Dieses Schema eines Fluidkreislaufs zum Schmieren bzw. Lagern und Kühlen der Lagerstellen 13, 14, 15 sowie dem Kühlen der Antriebseinheit 5 stellt lediglich eine mögliche Anordnung dar. Es ist beispielhaft auch denkbar den Schmierungs- bzw. Lagerungsprozess und Kühlprozess der Lagerstellen 13, 14, 15 komplett unabhängig vom Kühlprozess der Antriebseinheit 5 zu gestalten, auch könnten die einzelnen Lagerstellen 13, 14, 15 unabhängig voneinander mit dem Fluid versorgt werden. Ebenfalls ist denkbar, dass beispielsweise unterschiedliche Fluide für die Kühlung der Antriebseinheit 5 und der Lagerstellen 13, 14, 15 verwendet werden.

Selbstverständlich ist die hier beschriebene Erfindung nicht auf die erwähnten Ausführungsformen beschränkt und eine Vielzahl von Abwandlungen ist möglich. So kann die Spindelwelle 2 anstelle eines Schleifwerkzeugflansches 3 zum Beispiel auch eine Befestigungsvorrichtung zum Anbringen eines zu schleifenden Werkstücks aufweisen. Bei

der Spindelwelle 2 würde es sich dann nicht um eine Werkzeugspindel, sondern um eine Werkstückspindel handeln. Auch für eine Abrichtspindel gelten analog diese Aussagen. Bei der Antriebseinheit muss es sich nicht zwingend um einen Elektromotor mit einer die Spindelwelle 2 umgebenden Statoreinheit und eine an der Spindelwelle 2 angebrachte Rotoreinheit handeln, sondern es sind beliebige andere Antriebe aus dem Stand der Technik denkbar wie beispielsweise ein Riemenantrieb o.ä. Die erste Lagerstelle 13 und/oder die zweite Lagerstelle 14 müssen nicht zwingend konisch ausgebildet sein, sondern könnten aus jeweils einem hydrostatischen Radial- und einem hydrostatischen Axiallager gebildet werden. Eine Vielzahl weiterer Abwandlungen ist denkbar.

BEZUGSZEICHENLISTE

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1 | Gehäuse | 23a | Erste Hülsenabstützung |
| 2 | Spindelwelle | 23b | Zweite Hülsenabstützung |
| 3 | Schleifwerkzeugflansch | 24 | Dritte Hülsenabstützung |
| 4 | Schleifwerkzeug | 25 | Kühlkanal |
| 5 | Antriebseinheit | 26 | Erste feststehende Hülse |
| 6 | Statoreinheit | 27 | Zweite feststehende Hülse |
| 7 | Rotoreinheit | 28 | Fluidreservoir |
| 8 | Erstes Ende der Rotoreinheit | 29 | Antriebsmotor |
| 9 | Zweites Ende der Rotoreinheit | 30 | Erste Fluidpumpe |
| | | 31 | Zweite Fluidpumpe |
| 10 | Halterungshülse | 32a-g | Fluidleitungen |
| 11 | Erster konischer Bereich | 33 | Vorspannventil |
| 12 | Zweiter konischer Bereich | 34 | Wärmetauscher |
| 13 | Erste Lagerstelle | | |
| 13a, b, c, d | Lagertasche | A | Befestigungsabschnitt |
| 14 | Zweite Lagerstelle | B | Erster Lagerungsabschnitt |
| 14a, b, c, d | Lagertasche | C | Kraftübertragungsabschnitt |
| 15 | Dritte Lagerstelle | D | Zweiter Lagerungsabschnitt |
| 15a, b, c, d | Lagertasche | | |
| 16 | Erster Druckregler | RA | Rotationsachse |
| 17 | Zweiter Druckregler | AR | Axialrichtung |
| 18 | Dritter Druckregler | RR | Radialrichtung |
| 19a, b, c | Winkelmessgerät | | |
| 20 | Erstes Spindelende | BL | Biegelinie |
| 21 | Zweites Spindelende | | |
| 22 | Einschubhülse | α | Öffnungswinkel |

# PATENTANSPRÜCHE

1. Spindeleinheit für eine Werkzeugmaschine zur Feinbearbeitung von Werkstücken mit nutförmigen Profilen wie insbesondere Verzahnungen, aufweisend

eine Spindelwelle (2), welche um eine Rotationsachse (RA) drehbar gelagert ist und mit dieser Rotationsachse (RA) eine Axialrichtung (AR) und eine Radialrichtung (RR) definiert und welche in Axialrichtung (AR) der Reihe nach in einen Befestigungsabschnitt (A) zum Anbringen eines Werkzeugs (4) oder eines zu bearbeitenden Werkstücks, einen ersten Lagerungsabschnitt (B), einen Kraftübertragungsabschnitt (C) und einen zweiten Lagerungsabschnitt (D) unterteilt ist;

eine Antriebseinheit (5) zum Antreiben der Spindelwelle (2) in einer Drehbewegung um die Rotationsachse (RA) mittels Kraftübertragung auf den Kraftübertragungsabschnitt (C);

eine erste Lagerstelle (13) und eine zweite Lagerstelle (14) zur Lagerung der Spindelwelle (2) im ersten Lagerungsabschnitt (B) sowie

eine dritte Lagerstelle (15) zur Lagerung der Spindelwelle (2) im zweiten Lagerungsabschnitt (D),

dadurch gekennzeichnet, dass

die erste und die zweite Lagerstelle (13, 14) jeweils eines oder mehrere hydrostatische Lager aufweisen und jeweils zur Aufnahme sowohl von Radial- als auch von Axialkräften ausgebildet sind, und dass die dritte Lagerstelle (15) eines oder mehrere hydrostatische und/oder hydrodynamische Lager aufweist und zur Aufnahme von Radialkräften ausgebildet ist.

2. Spindeleinheit nach Anspruch 1, wobei die erste und/oder die zweite Lagerstelle (13, 14) konisch ausgebildet ist.

3. Spindeleinheit nach Anspruch 2, wobei sowohl die erste als auch die zweite Lagerstelle (13, 14) konisch ausgebildet ist und wobei die von diesen beiden Lagerstellen (13, 14) gebildeten Koni in Bezug auf die Rotationsachse (RA) in einander entgegengesetzte Richtungen ausgerichtet sind.

4. Spindeleinheit nach Anspruch 2 oder 3, wobei die von der ersten und/oder von der zweiten Lagerstelle (13, 14) gebildeten Koni in Bezug auf die Rotationsachse (RA) einen Öffnungswinkel ($\alpha$) in einem Bereich von 10° bis 60° aufweisen.

5. Spindeleinheit nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die dritte Lagerstelle (15) zusätzlich zur Aufnahme von Axialkräften ausgebildet ist.

6. Spindeleinheit nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die erste Lagerstelle (13) eine oder mehrere erste Lagertaschen (13a, 13b, 13c, 13d) aufweist und die zweite Lagerstelle (14) eine oder mehrere zweite Lagertaschen (14a, 14b, 14c, 14d) aufweist und wobei zumindest ein erster Druckregler (16) vorgesehen ist, welcher zur Regelung der in den ersten Lagertaschen (13a, 13b, 13c, 13d) herrschenden Druckverhältnisse dient, und zudem zumindest ein zweiter Druckregler (17) vorgesehen ist, welcher zur Regelung der in den zweiten Lagertaschen (14a, 14b, 14c, 14d) herrschenden Druckverhältnisse dient und in Bezug auf den oder die ersten Druckregler (16) separat ausgebildet ist.

7. Spindeleinheit nach Anspruch 6, wobei mehrere erste Lagertaschen (13a, 13b, 13c, 13d) und mehrere zweite Lagertaschen (14a, 14b, 14c, 14d) sowie mehrere erste Druckregler (16) und mehrere zweite Druckregler (17) vorhanden sind und wobei jede der ersten Lagertaschen (13a, 13b, 13c, 13d) jeweils einem der ersten Druckregler (16) und jede der zweiten Lagertaschen (14a, 14b, 14c, 14d) jeweils einem der zweiten Druckregler (17) zugeordnet ist.

8. Spindeleinheit nach Anspruch 6 oder 7, wobei die dritte Lagerstelle (15) ein hydrostatisches Lager mit einer oder mehreren dritten Lagertaschen (15a, 15b, 15c, 15d) aufweist und wobei zumindest ein dritter Druckregler (18) vorgesehen ist, welcher zur Regelung der in den dritten Lagertaschen (15a, 15b, 15c, 15d) herrschenden Druckverhältnisse dient und in Bezug auf den oder die ersten und den oder die zweiten Druckregler (16, 17) separat ausgebildet ist.

9. Spindeleinheit nach Anspruch 8, wobei mehrere dritte Lagertaschen sowie

mehrere dritte Druckregler (18) vorhanden sind und wobei jede der dritten Lagertaschen (15a, 15b, 15c, 15d) jeweils einem der dritten Druckregler (18) zugeordnet ist.

10. Spindeleinheit nach einem der Ansprüche 6 bis 9, wobei der oder die ersten, der oder die zweiten und vorzugsweise auch der oder die dritten Druckregler (16, 17, 18) jeweils als Progressiv-Mengen-Regler mit insbesondere jeweils ausschliesslich mechanischen und/oder hydraulischen Elementen ausgebildet sind.

11. Spindeleinheit nach einem der Ansprüche 6 bis 10, wobei der oder die ersten, der oder die zweiten und vorzugsweise auch der oder die dritten Druckregler (16, 17, 18) jeweils eine kompakte Bauweise aufweisen, und wobei die entsprechenden Druckregelungen zum Beispiel mittels Kapillaren und/oder Drosseln und/oder Blenden und/oder mittels elektronischer Steuerung erfolgen.

12. Spindeleinheit nach einem der Ansprüche 6 bis 10, wobei der oder die ersten Druckregler (16) bezogen auf die Axialrichtung (AR) jeweils im Wesentlichen auf derselben Höhe wie die erste Lagerstelle 13 angeordnet sind, wobei der oder die zweiten Druckregler (17) bezogen auf die Axialrichtung (AR) jeweils im Wesentlichen auf derselben Höhe wie die zweite Lagerstelle 14 angeordnet sind und wobei bevorzugt der oder die dritten Druckregler (18) bezogen auf die Axialrichtung (AR) jeweils im Wesentlichen auf derselben Höhe wie die dritte Lagerstelle 15 angeordnet sind.

13. Spindeleinheit nach einem der Ansprüche 6 bis 12, wobei am Befestigungsabschnitt (A) der Spindelwelle (2) eine Befestigungsvorrichtung (3) zum Anbringen eines Werkzeugs (4) oder eines zu bearbeitenden Werkstücks angebracht ist und wobei der oder die ersten Druckregler (16) entlang der Axialrichtung (AR) im Bereich der Befestigungsvorrichtung (3) und bevorzugt in Radialrichtung (RR) innerhalb der Befestigungsvorrichtung (3) angeordnet sind.

14. Spindeleinheit nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei ein oder mehrere Fluidkreisläufe vorgesehen sind, welcher/welche sowohl zur Schmierung als auch zur Kühlung der ersten, der zweiten und bevorzugt auch der dritten Lagerstelle (13, 14, 15) und insbesondere auch zur Kühlung der Antriebseinheit (5) dienen.

15. Spindeleinheit nach einem der vorhergehenden Ansprüche, zusätzlich aufweisend mindestens ein Winkelmessgerät (19a, 19b, 19c) zur Erfassung der Drehzahl der Spindelwelle (2), welches vorteilhaft am Befestigungsabschnitt (A) oder am ersten Lagerungsabschnitt (B) oder am zweiten Lagerungsabschnitt (D), insbesondere vorteilhaft im Übergangsbereich zwischen dem ersten Lagerungsabschnitt (B) und dem Befestigungsabschnitt (A), angeordnet ist.

16. Spindeleinheit nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei Sperrluftdichtungen vorgesehen sind, um die Lagertaschen (13a, 13b, 13c, 13d; 14a, 14b, 14c, 14d) der ersten und der zweiten Lagerstelle (13, 14), bevorzugt auch die Lagertaschen (15a, 15b, 15c, 15d) der dritten Lagerstelle (15), in Axialrichtung (AR) nach aussen hin abzudichten.

17. Werkzeugmaschine aufweisend eine Spindeleinheit nach einem der vorhergehenden Ansprüche.

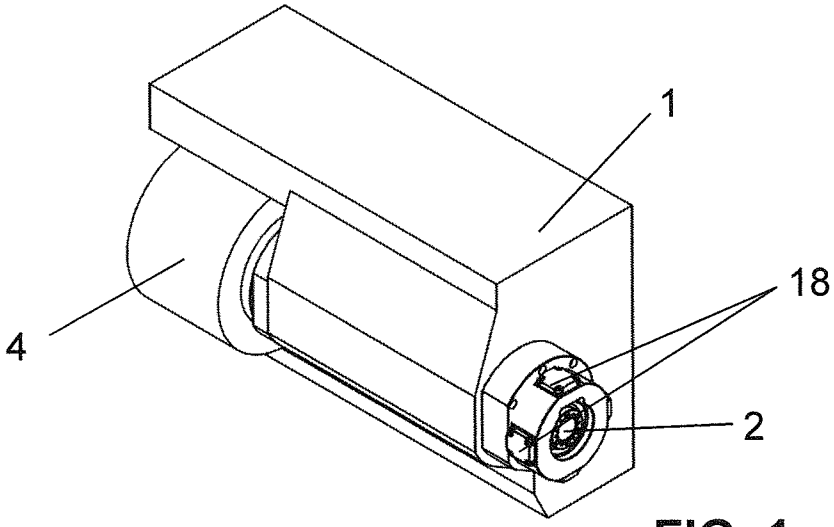



FIG. 1

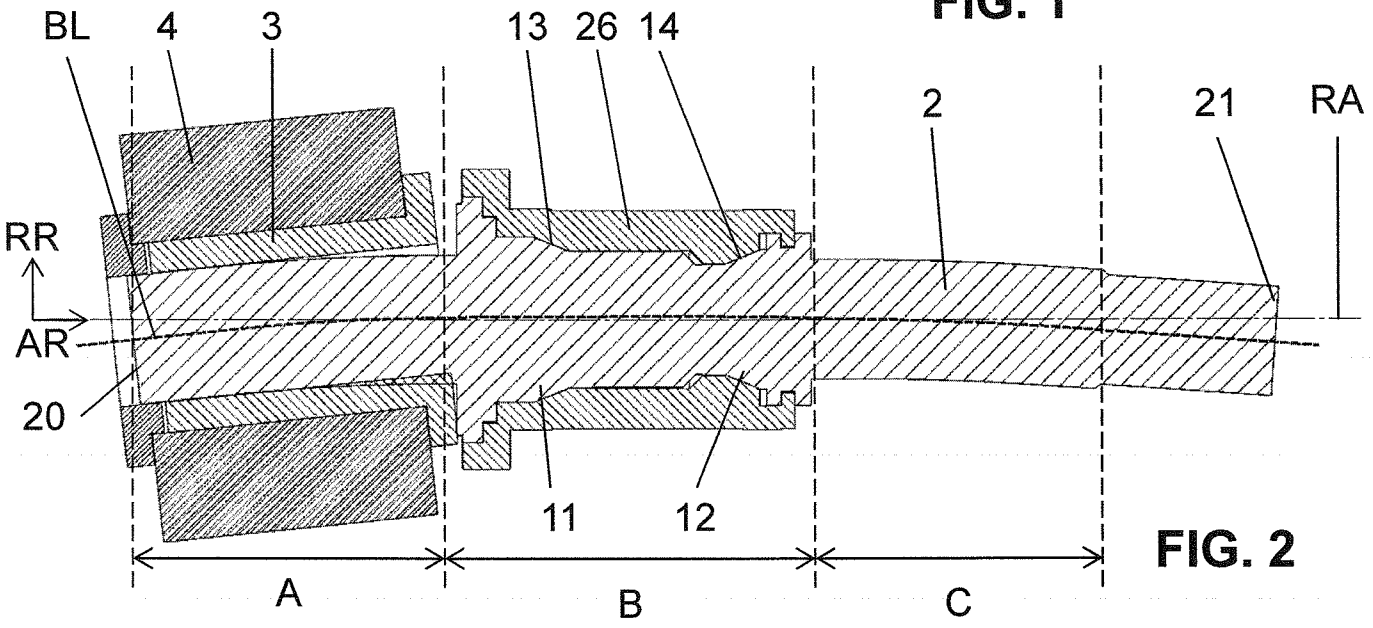



FIG. 2

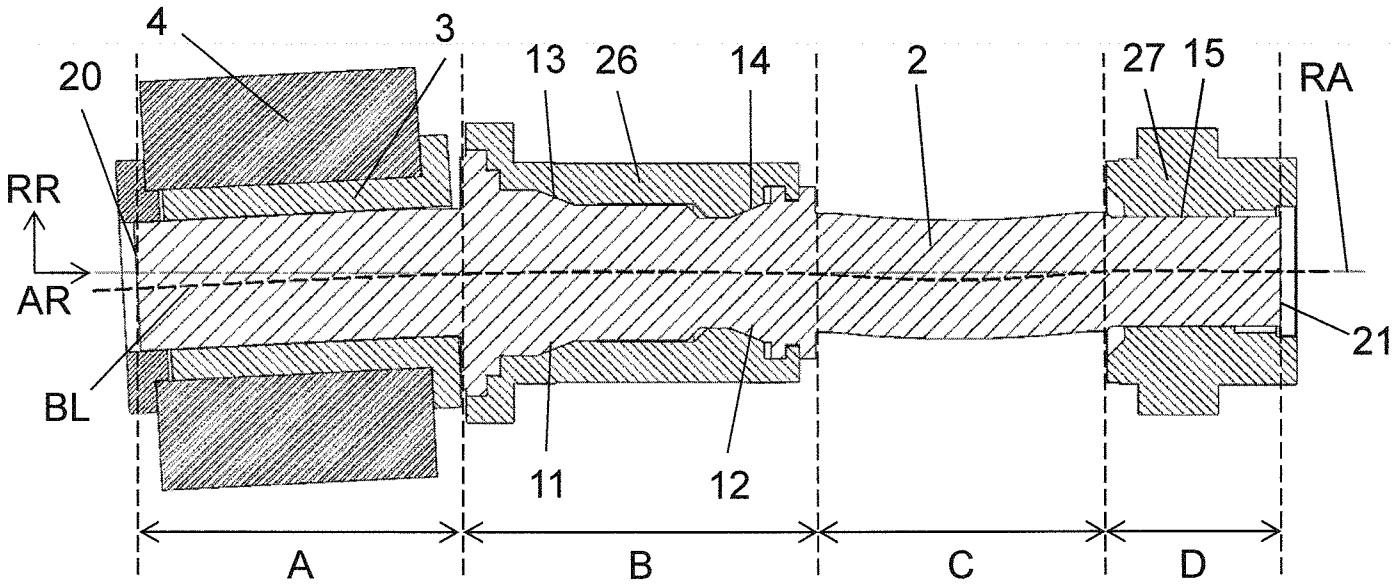



FIG. 3

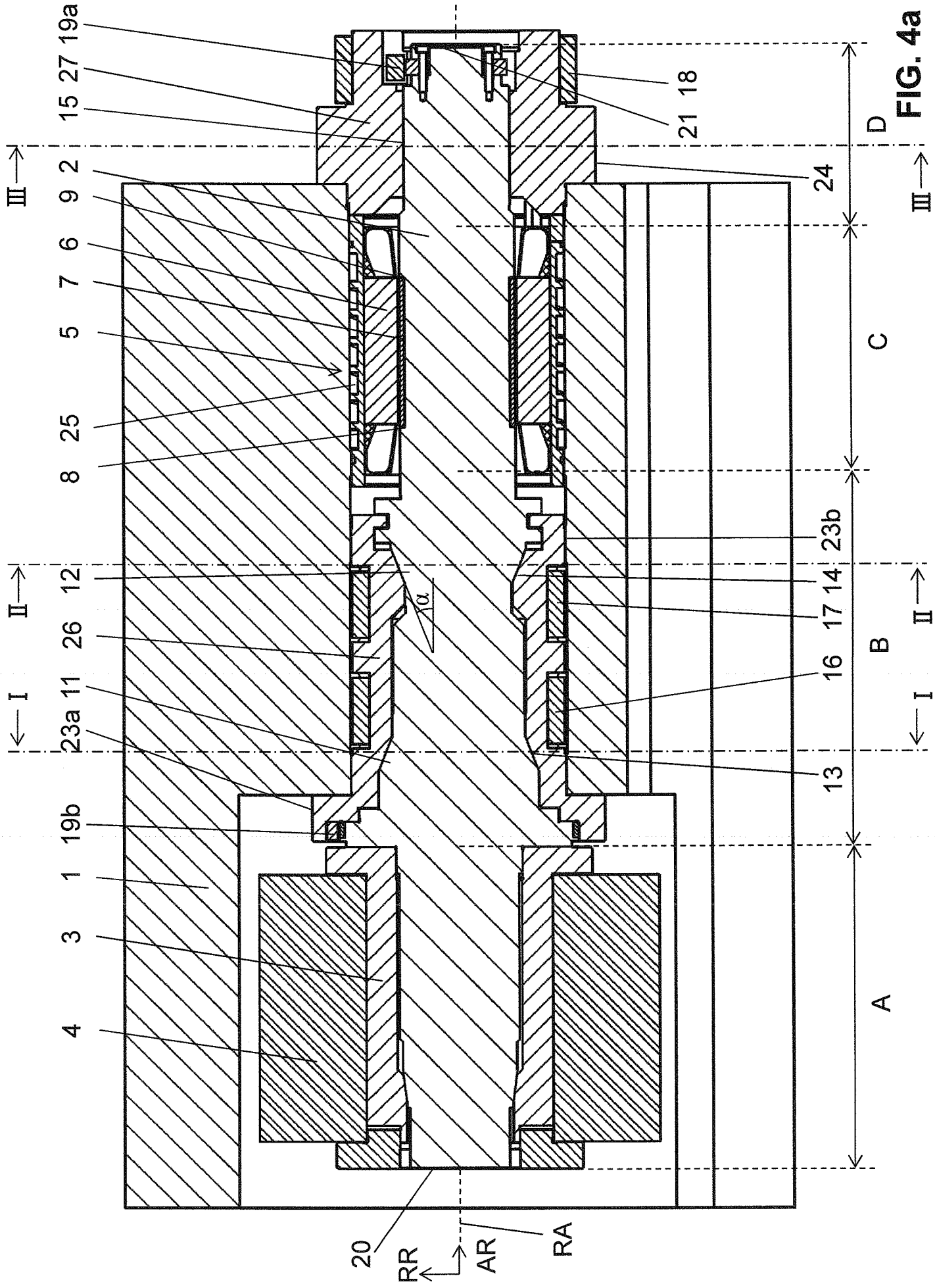

19a
27
15
2
9
6
7
5
25
8
12
26
11
23a
19b
1
3
4
20
RR
AR
RA
18
21
24
23b
14
17
16
13
α
D
C
B
A
I
II
III

FIG. 4a

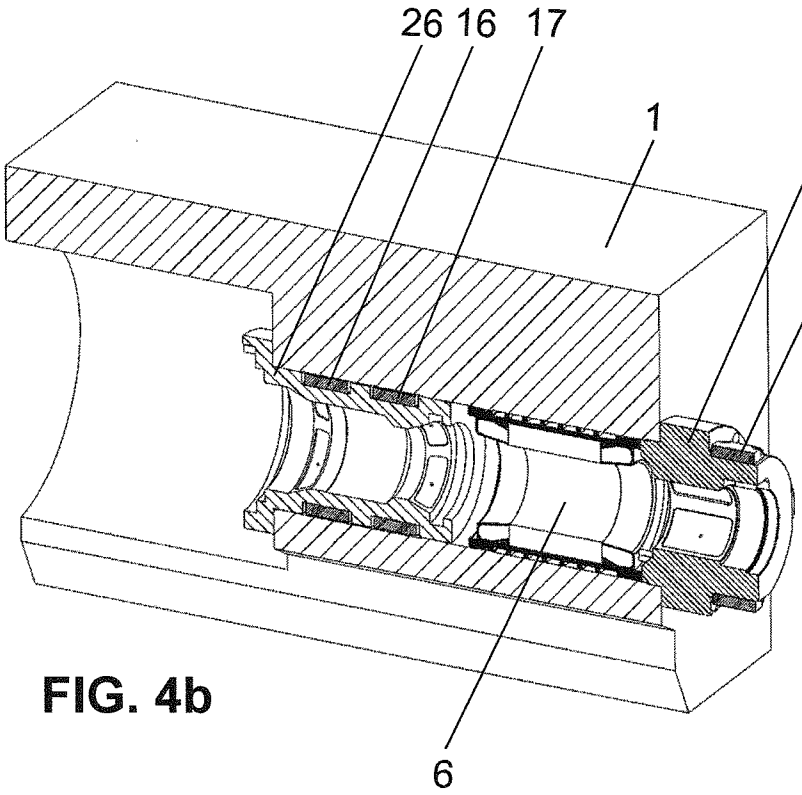



FIG. 4b

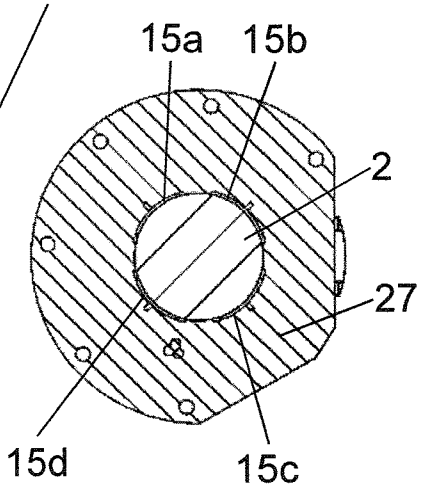



FIG. 4e

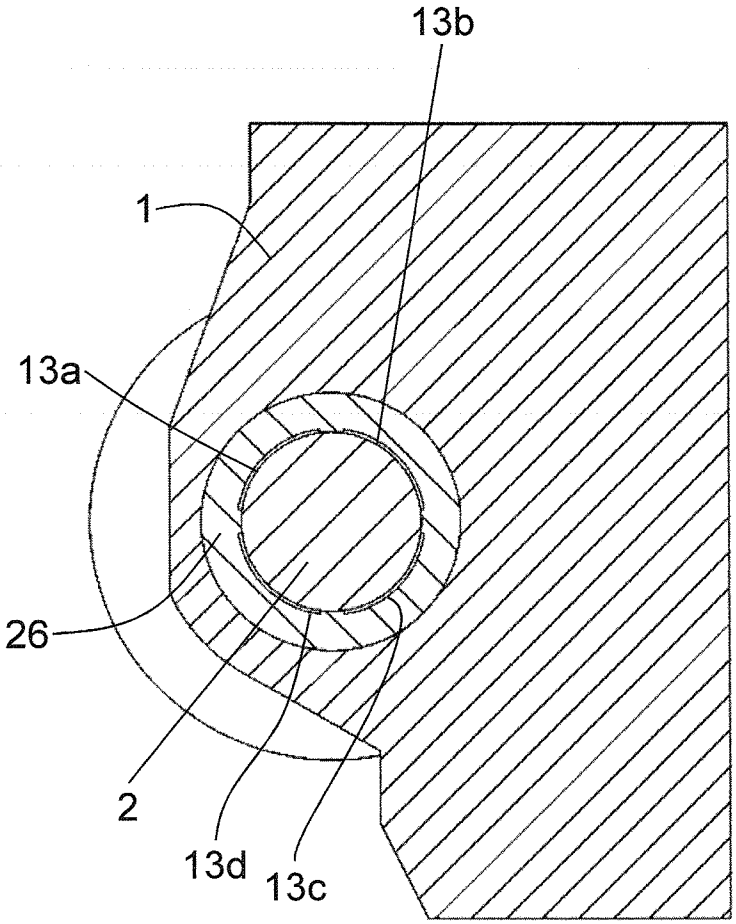



FIG. 4c

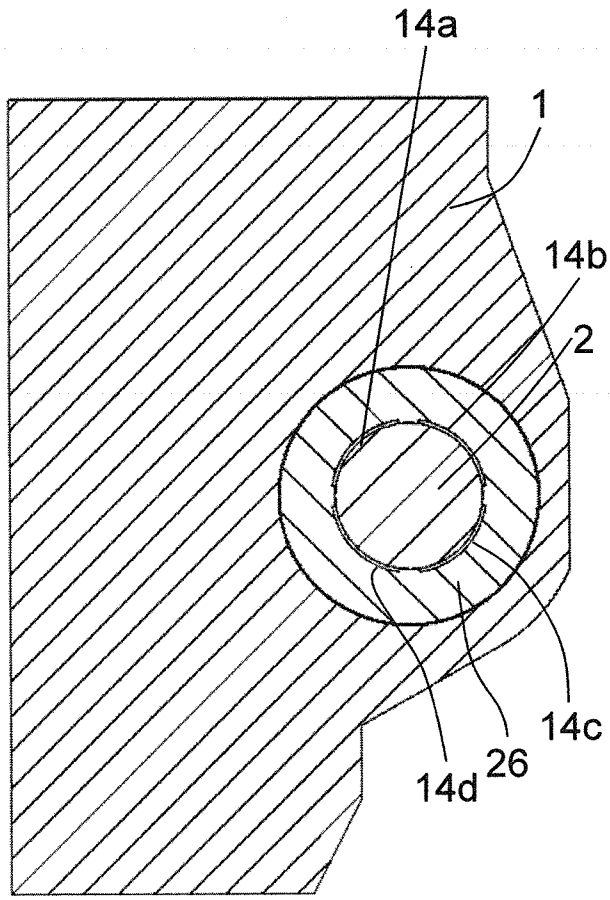



FIG. 4d

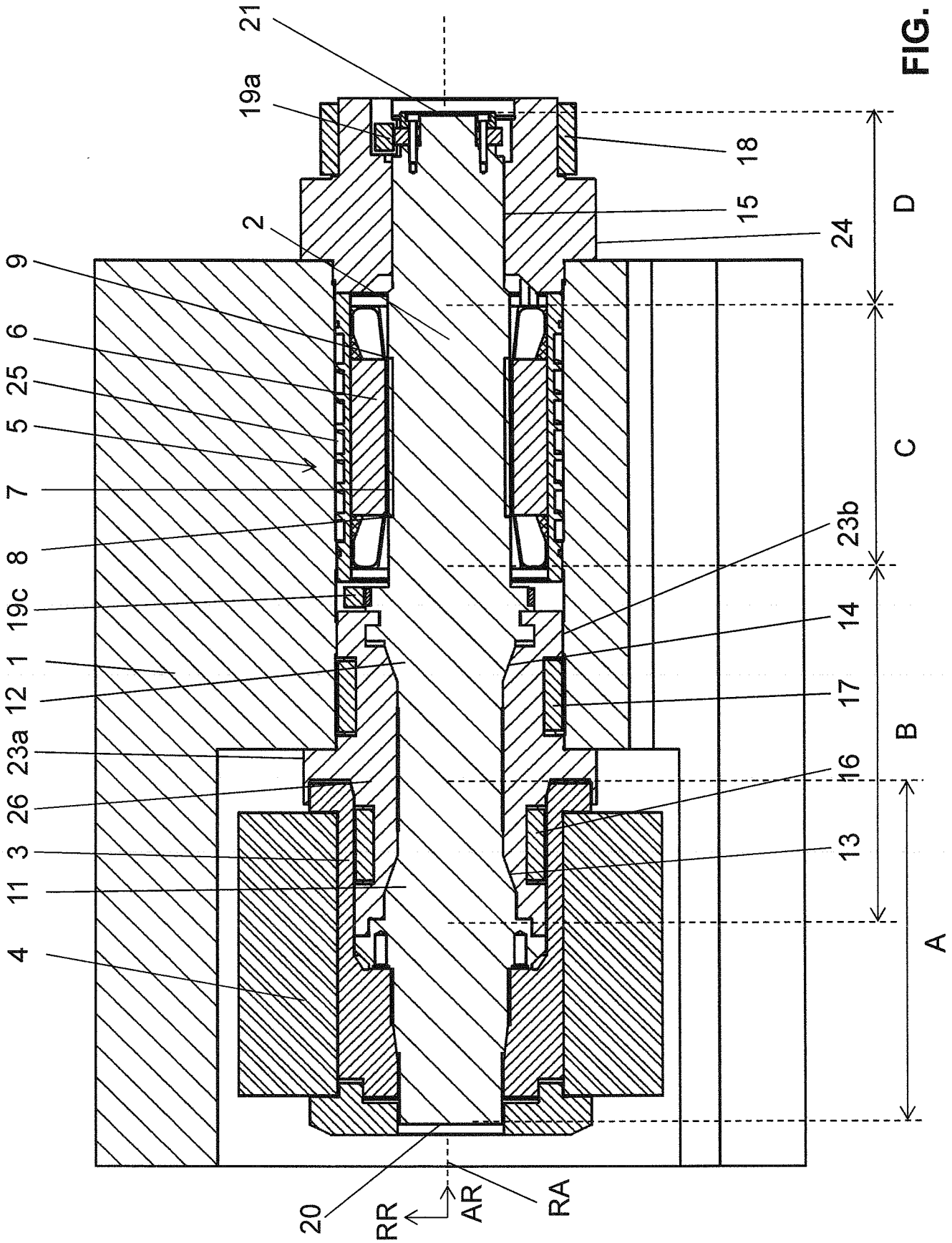

21
19a
18
15
24
2
9
6
25
5
7
8
19c
1
12
23a
26
3
11
4
23b
14
17
16
13
D
C
B
A
20
RR
AR
RA

FIG. 5

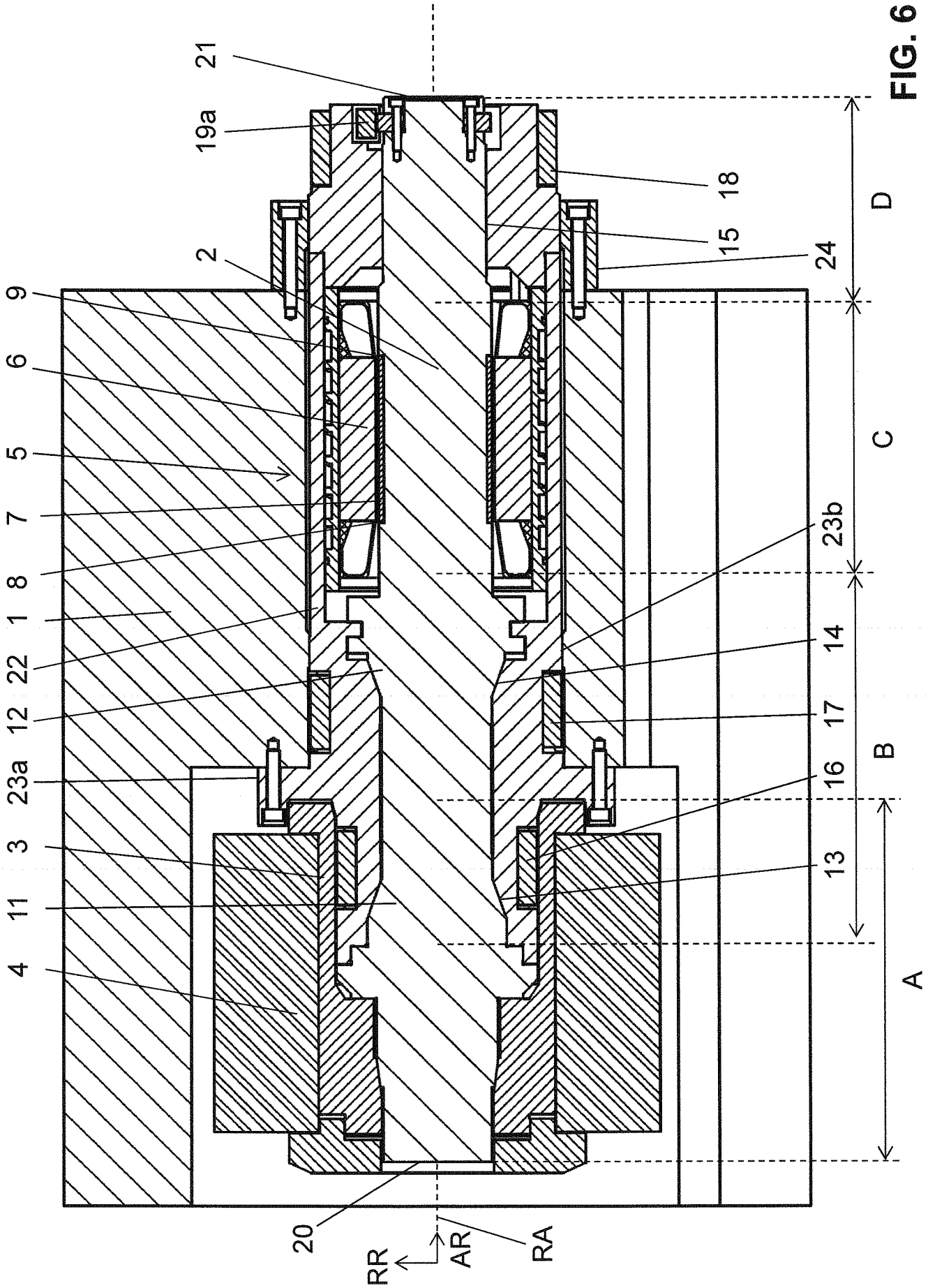

21
19a
18
15
24
2
9
6
5
7
8
1
22
12
23a
3
11
4
23b
14
17
16
13
D
C
B
A
20
RR
AR
RA

FIG. 6

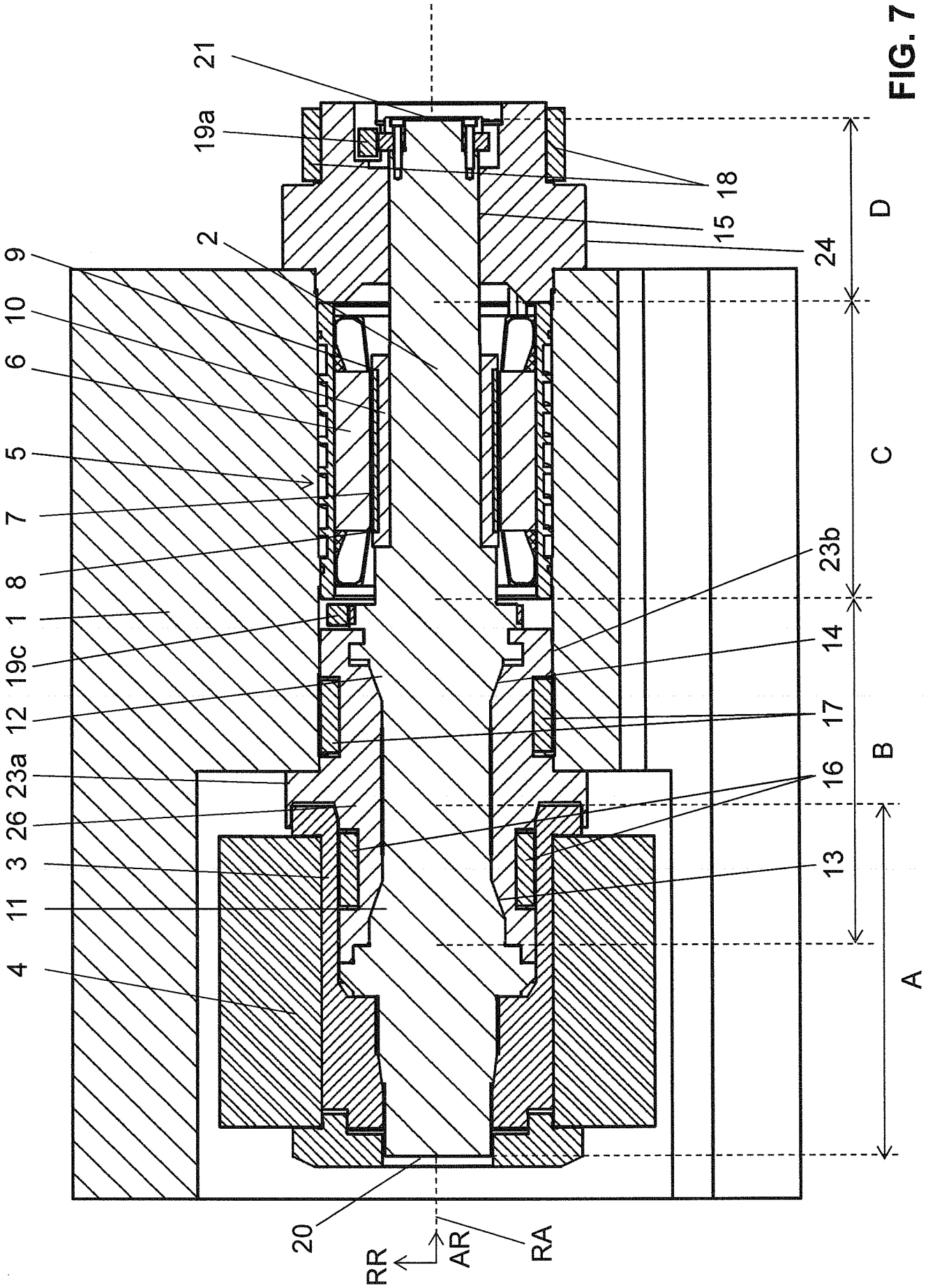

21
19a
18
15
24
2
9
10
6
5
7
8
1
19c
12
23a
26
3
11
4
23b
14
17
16
13
20
RR
AR
RA
D
C
B
A

FIG. 7

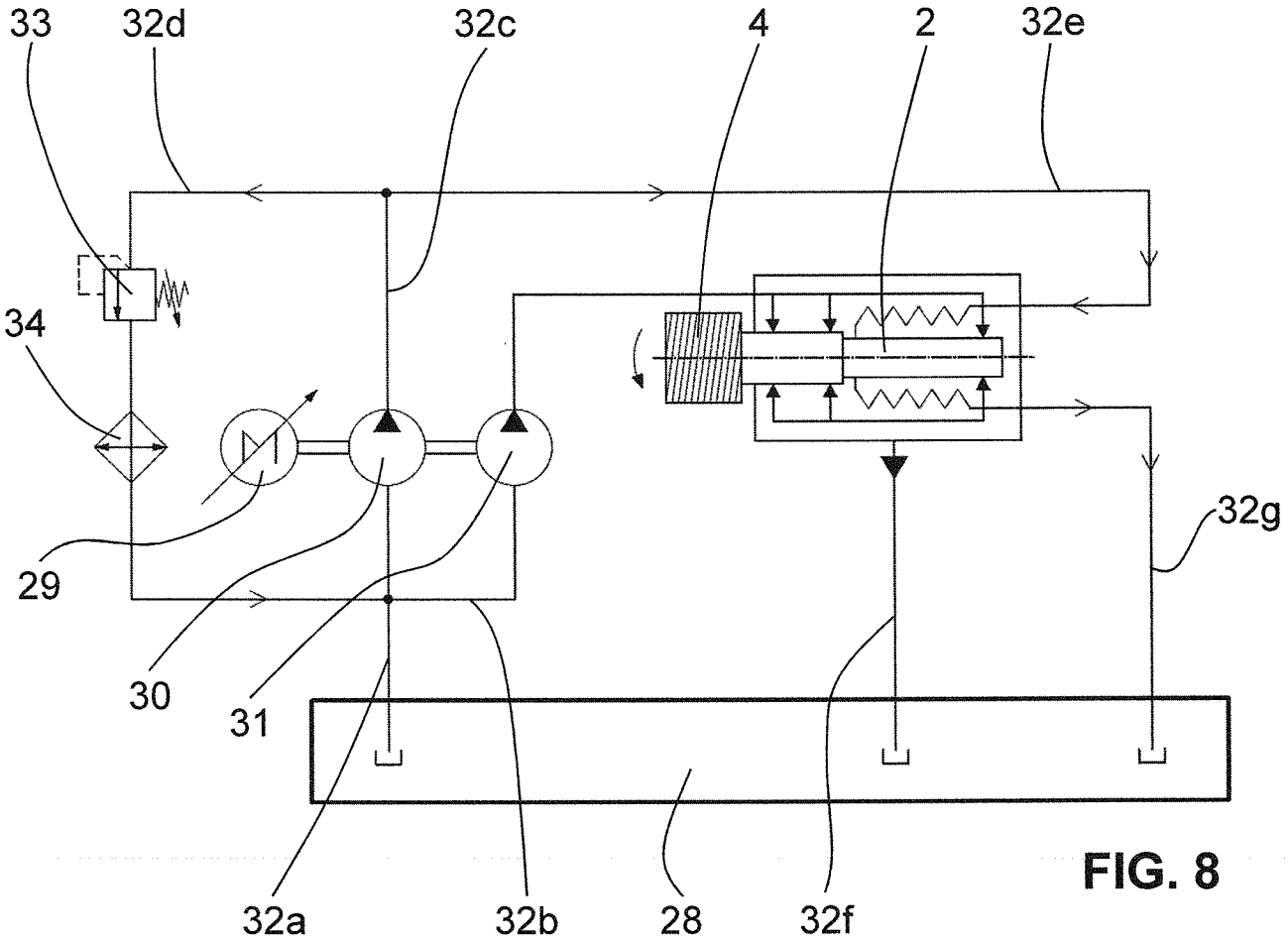



FIG. 8

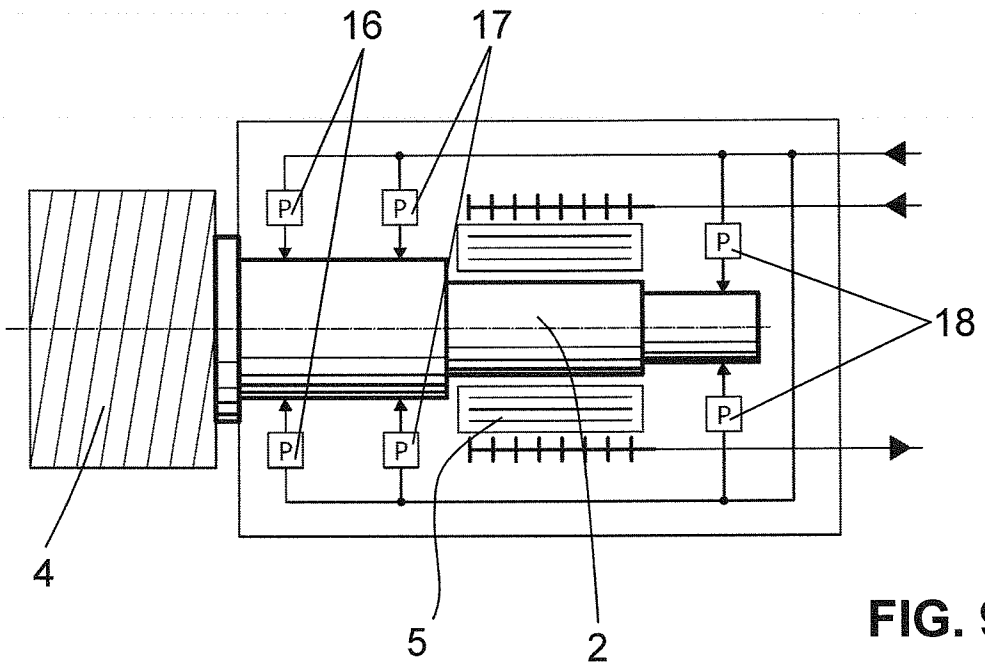



FIG. 9