

(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  
20. November 2014 (20.11.2014)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 2014/183761 A1**

(51) Internationale Patentklassifikation:

H02N 2/10 (2006.01) H01L 41/083 (2006.01)  
H02N 2/00 (2006.01) H02N 2/14 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE2014/200215

(22) Internationales Anmeldedatum:  
14. Mai 2014 (14.05.2014)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:  
10 2013 105 024.7 16. Mai 2013 (16.05.2013) DE

(71) Anmelder: **PHYSIK INSTRUMENTE (PI) GMBH & CO. KG** [DE/DE]; Patentwesen, Auf der Römerstraße 1, 76228 Karlsruhe (DE).

(72) Erfinder: **WISCHNEWSKIY, Wladimir**; Friedensstraße 14, 14712 Rathenow (DE). **WISCHNEWSKI, Alexej**; Robert-Koch-Straße 10, 76744 Wörth (DE).

(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, 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, LT, 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, 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,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: ULTRASONIC MOTOR

(54) Bezeichnung : ULTRASCHALLMOTOR

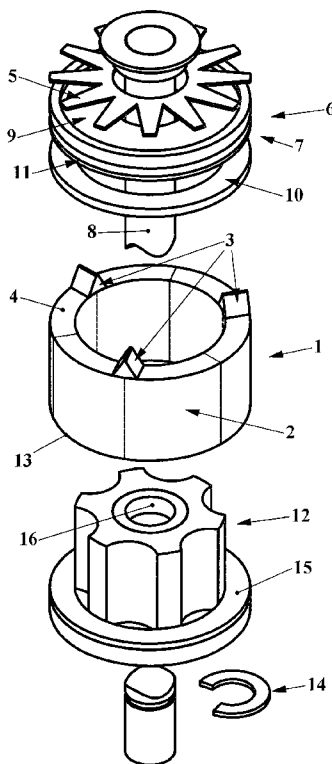


Fig.1

(57) Abstract: The invention relates to an ultrasonic motor comprising an ultrasonic actuator (1) in the form of a piezoelectric hollow cylinder (2), wherein friction elements (3) are arranged on at least one of the front faces (4) thereof, a rotor (6), which is operationally connected to the friction elements, and an electric excitation device, wherein the ultrasonic motor is subdivided in peripheral direction into an even number of sections Sa and Sb with an average length L of a sector in peripheral direction, with a height H of a sector in axial direction and a thickness T of a sector in radial direction, and the sectors form a first sector group A and a second sector group B, wherein the sectors Sa and Sb of the two sector groups A and B alternate and adjoin each other in peripheral direction, and the friction elements (3) are arranged in the region where adjacent sectors adjoin. It is essential to the invention that each of the sectors Sa and Sb be formed by excitation electrodes, which are alternately arranged in axial direction of the hollow cylinder, and by general electrodes, wherein a layer of piezoelectric material is arranged between adjacent excitation electrodes and general electrodes in each case, and all the excitation electrodes and all the general electrodes are all electrically connected to each other in each sector.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft einen Ultraschallmotor mit einem Ultraschallaktor (1) in Form eines piezoelektrischen Hohlzylinders (2), wobei an wenigstens einer seiner Stirnflächen (4) Friktionselemente (3) angeordnet sind, und mit einem mit den Friktionselementen in Wirkkontakt stehenden Rotor (6) und mit einer elektrischen Erregervorrichtung,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2014/183761 A1



SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

— vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen eingehen (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe h)

**Veröffentlicht:**

— mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

---

wobei der Ultraschallaktor in Umfangsrichtung in eine gerade Zahl von Sektoren Sa und Sb mit einer mittleren Länge L eines Sektors in Umfangsrichtung, mit einer Höhe H eines Sektors in Axialrichtung und einer Dicke T eines Sektors in radialer Richtung unterteilt ist, und die Sektoren eine erste Sektorengruppe A und eine zweite Sektorengruppe B bilden, wobei sich in Umfangsrichtung die Sektoren Sa und Sb der beiden Sektorengruppen A und B abwechseln und aneinander angrenzen, und im Bereich der Angrenzung benachbarter Sektoren die Friktionselemente (3) angeordnet sind. Erfindungswesentlich ist, dass jeder der Sektoren Sa und Sb gebildet ist durch in Axialrichtung des Hohlzylinders abwechselnd angeordnete Erregerelektroden und allgemeine Elektroden, wobei jeweils zwischen benachbarten Erregerelektroden und allgemeinen Elektroden eine Schicht piezoelektrischen Materials angeordnet ist, und in jedem Sektor alle Erregerelektroden und alle allgemeinen Elektroden jeweils elektrisch miteinander verbunden sind.

**Beschreibung****Ultraschallmotor**

- [0001] Die Erfindung betrifft einen Ultraschallmotor gemäß den Ansprüchen 1 bis 11.
- [0002] Aus dem Stand der Technik gemäß den Druckschriften US 6,765,335 B1 oder US 7,218,031 B2 sind beispielsweise Ultraschallmotoren für einen Rotationsantrieb bekannt, bei welchen der Ultraschallaktor als piezoelektrischer Hohlzylinder ausgeführt ist und bei welchen Elektroden auf seinen Umfangsflächen und Friktionselemente auf seinen Stirnflächen angeordnet sind.
- [0003] Bei diesen Ultraschallmotoren sind sowohl der Polarisationsvektor  $p$ , als auch der Vektor des elektrischen Erregerfeldes  $E$  radial und damit senkrecht zur axialen Richtung des piezoelektrischen Zylinders ausgerichtet. Daraus ergibt sich, dass die durch den Ultraschallaktor in axialer Richtung erzeugte dynamische Kraft  $F_{ad}$  und die in tangentialer Richtung erzeugte dynamische Kraft  $F_{td}$  durch den gleichen Piezomodul  $d_{31}$  bestimmt sind. In Grenzfällen können diese Kräfte gleich sein.
- [0004] Das Antriebsprinzip dieser Ultraschallmotoren beruht auf der Übertragung der durch den Ultraschallaktor erzeugten Kraft an den Rotor über einen zwischen Ultraschallaktor und Rotor bestehenden Wirk- oder Reib- bzw. Friktionskontakt. Auf Grund dieses Antriebsprinzips muss die Reibungskraft  $F_{fk}$  hinsichtlich des Reibkontakts stets größer sein als die Amplitude der dynamischen Kraft  $F_{td}$ . Trifft das nicht zu, resultiert ein ungewollter Schlupf zwischen Ultraschallaktor und Rotor, was zu einer verschlechterten oder sogar Fehl-Funktion des Ultraschallmotors führt.
- [0005] Die Reibungskraft  $F_{fk}$  aufgrund des Friktionskontakts zwischen Ultraschallaktor und Rotor wird durch den Reibungskoeffizienten  $K_f$  der sich kontaktierenden Werkstoffe und der Anpresskraft  $F_a$  bestimmt. Für moderne harte, abriebfeste Werkstoffe beträgt dieser Koeffizient etwa 0,2 - 0,3. Für die Gewährleistung eines linearen Arbeitsbereich des Friktionskontaktes muss die Bedingung  $F_{fk} = K_f \times F_a$  eingehalten werden. Das bedeutet, dass der Friktionskontakt des Ultraschallmotors die Reibungskraft  $F_{fk}$  aufweisen muss und dass das Friktionselement an die

Friktionsoberfläche des Rotors mit einer Kraft  $F_a = F_{fk}/0,2 - 0,3$  angepresst ist. Die Anpresskraft  $F_a$  muss daher etwa 3 – 5 Mal größer als die Amplitude der Kraft  $F_{td}$  sein. Die Anpresskraft  $F_a$  setzt sich hierbei aus der statischen Anpresskraft  $F_{as}$  und der dynamischen Anpresskraft  $F_{ad}$  zusammen, wobei die Kraft  $F_{as}$  durch eine Feder erzeugt wird. Für die optimale Funktion des Friktionskontakts muss die statische Anpresskraft  $F_{as}$  gleich der Amplitude der dynamischen Anpresskraft  $F_{ad}$  sein.

- [0006] Bei den aus dem Stand der Technik bekannten Ultraschallmotoren entwickelt der Aktor sowohl die in axialer Richtung wirkende Kraft  $F_{ad}$  als auch die in tangentialer Richtung wirkende Kraft  $F_{td}$ . Das ist damit erklärbar, dass beide Kräfte durch den gleichen Piezomodul  $d_{31}$  bestimmt sind. Deshalb kann in diesen Motoren die Amplitude der Anpresskraft  $F_a$  nur zweimal größer als die Amplitude der Kraft  $F_{td}$  sein.
- [0007] Daher ist auch die Reibungskraft  $F_{fk}$  im Friktionskontakt begrenzt und mit ihr die durch den Ultraschallmotor erzeugbare maximale Kraft, so dass es mit den aus dem Stand der Technik bekannten Ultraschallmotoren nicht möglich ist, die aufgrund der piezoelektrischen Parameter eigentlich erzielbaren maximalen Kräfte zu erzeugen.
- [0008] Außerdem entstehen bei diesen Ultraschallmotoren unter hoher Last sehr große mechanische Verluste im Friktionskontakt (Schlupf).
- [0009] Überdies erfordern derartige Motoren eine vergleichsweise hohe Erregerspannung, wodurch sich die Verluste in den Aktoren erhöhen.
- [0010] All diese Effekte zusammen führen zu einer Erwärmung der Aktoren und zu einer entsprechenden Verringerung der maximalen Arbeitstemperatur. Insgesamt weisen die aus dem Stand der Technik gemäß den Druckschriften US 6,765,335 B1 oder US 7,218,031 B2 bekannten Ultraschallmotoren einen vergleichsweise geringen Wirkungsgrad auf.
- [0011] Es ist daher Aufgabe der Erfindung, einen Ultraschallmotor bereitzustellen, der die Nachteile der Ultraschallmotoren gemäß dem zuvor genannten Stand der Technik überwindet, und insbesondere einen Ultraschallmotor mit hoher Effektivität bzw. einem hohen Wirkungsgrad bereitzustellen.
- [0012] Die Lösung der Aufgabe der Erfindung erfolgt durch einen Ultraschallmotor gemäß Patentanspruch 1, wobei die daran

anschließenden Unteransprüche mindestens zweckmäßige Ausgestaltungen und Weiterbildungen umfassen.

- [0013] Es wird demnach von einem Ultraschallmotor ausgegangen, der einen Ultraschallaktor in Form eines piezoelektrischen Hohlzylinders mit einer inneren Umfangsfläche und einer äußeren Umfangsfläche und die innere und äußere Umfangsfläche miteinander verbindende Stirnflächen umfasst, wobei an wenigstens einer Stirnfläche Friktionselemente angeordnet sind. Weiterhin umfasst der Ultraschallmotor einen mit den Friktionselementen in Wirkkontakt stehenden Rotor aufweisend wenigstens eine Scheibe oder eine Plattform, sowie eine elektrische Erregervorrichtung.
- [0014] Der Ultraschallaktor ist entlang seines Umfangs bzw. in Umfangsrichtung in eine gerade Zahl von Sektoren  $S_a$  und  $S_b$  unterteilt, wobei jeder Sektor durch dessen geometrische Abmessungen  $L$ ,  $H$  und  $T$  charakterisiert ist. Hierbei bezeichnet  $L$  die mittlere Länge des Sektors, und zwar in Umfangsrichtung des Hohlzylinders in der Mitte zwischen Außenumfang und Innenumfang.  $H$  bezeichnet die Höhe des Sektors in Richtung der Längs- oder Rotationsachse des Hohlzylinders (Axialrichtung), und  $T$  bezeichnet die Dicke des Sektors, also den Abstand zwischen Innen- und Außenumfangsfläche in radialer Richtung. Die mittlere Länge  $L$  ist demnach die Länge des Sektors in Umfangsrichtung bei der halben Dicke  $T$ , d.h. bei  $T/2$ . Alle Sektoren  $S_a$  bilden zusammen die Sektorengruppe A, während alle Sektoren  $S_b$  zusammen die Sektorengruppe B bilden. An jeden Sektor  $S_a$  grenzen an in Umfangsrichtung gesehen gegenüberliegenden Seiten zwei Sektoren  $S_b$  an, und an jeden Sektor  $S_b$  grenzen in gleicher Weise zwei Sektoren  $S_a$  an, so dass sich in Umfangsrichtung die Sektoren  $S_a$  und  $S_b$  der beiden Sektorengruppen A und B abwechseln und aneinander angrenzen. Im Bereich der Grenzfläche zwischen zwei benachbarten Sektoren  $S_a$  und  $S_b$ , d.h. im Bereich der Angrenzung benachbarter Sektoren, sind die Friktionselemente angeordnet.
- [0015] Erfindungswesentlich ist, dass jeder der Sektoren  $S_a$  und  $S_b$  durch in Axialrichtung des Hohlzylinders abwechselnd angeordnete Erregerelektroden und allgemeine Elektroden gebildet ist, wobei jeweils

zwischen benachbarten Erregerelektroden und allgemeinen Elektroden eine Schicht piezoelektrischen Materials angeordnet ist, und alle Erregerelektroden und alle allgemeinen Elektroden des Ultraschallaktors elektrisch miteinander verbunden sind.

- [0016] Durch eine an die Erregerelektroden und die allgemeinen Elektroden über die elektrische Erregervorrichtung angelegte elektrische Spannung bildet sich zwischen ihnen das elektrische Feld  $E$  aus, wobei der Vektor des elektrischen Feldes  $E$  mit der Richtung der Längs- oder Rotationsachse des Ultraschallaktors zusammenfällt. Durch den umgekehrten piezoelektrischen Effekt erzeugt das elektrische Feld  $E$  in Richtung der Längs- oder Rotationsachse die Kraft  $F_{ad}$  und in tangentialer Richtung die Kraft  $F_{td}$ .
- [0017] Die Kraft  $F_{ad}$  besteht aus der statischen Anpresskraft  $F_{as}$ , wodurch die Kraft  $F_a$  entsteht, die das Friktionselement an den Rotor anpresst. Die Kraft  $F_a$  wirkt der Elastizitätskraft  $F_s$  des Friktionskontaktes entgegen. Die Kraft  $F_{td}$  veranlasst den Rotor, sich entgegen der Kraft  $F_r$  zu bewegen.
- [0018] Im Einklang mit der Theorie ist die piezoelektrische Kraft  $F_{ad}$  proportional zum Piezomodul  $d_{33}$  und die Kraft  $F_{td}$  proportional zum Piezomodul  $d_{31}$ .
- [0019] Bei harter PZT Keramik liegt das Verhältnis von  $d_{33}/d_{31}$  im Bereich zwischen 2,5 und 3. Das bedeutet, dass der Aktor 1 des erfindungsgemäßen Ultraschallmotors eine in axialer Richtung (d.h. längs zur bzw. entlang der Längs- oder Rotationsachse) wirkende dynamische Kraft  $F_{ad}$  entwickelt, die 2,5 bis 3 Mal größer als die in tangentialer Richtung entwickelte Kraft  $F_{td}$  ist.
- [0020] Aus der Bedingung für eine optimale Funktion des Friktionskontaktes, nach der die statische Anpresskraft  $F_{as}$  gleich der Amplitude der dynamischen Kraft  $F_{ad}$  sein muss, folgt, dass in diesem Fall die gesamte Anpresskraft  $F_a$  gleich der doppelten Amplitude der dynamischen Anpresskraft  $F_{ad}$  sein muss. Das bedeutet, dass bei Einhaltung dieser Bedingung im vorgeschlagenen Motor die Anpresskraft  $F_a$  gleich 5 - 6  $F_{td}$  ist. D. h. beim Anlegen einer elektrischen Spannung an die Erregerelektroden und allgemeinen Elektroden entsteht im Friktionskontakt des erfindungsgemäßen Ultraschallmotors die

Anpresskraft  $F_a$ , die 5 bis 6 Mal größer als die Amplitude der Tangentialkraft  $F_{td}$  ist.

- [0021] Entsprechend den obigen Darlegungen zeichnet sich der Friktionskontakt des erfindungsgemäßen Ultraschallmotors durch eine 2,5 bis 3 mal größere Reibungskraft  $F_{fk}$  im Friktionskontakt aus, als dies bei den Motoren nach dem Stand der Technik gemäß der eingangs erwähnten Druckschriften US 6,765,335 B2 und US 7,218,031 B2 der Fall ist. Das ermöglicht es ihm, bedeutend größere maximale Kräfte als im Vergleich zu den Ultraschallmotoren nach US 6,765,335 B2 oder US 7,218,031 B2 zu entwickeln, und ein Schlupf innerhalb des Friktionskontaktes bei hohen Zugkräften wird deutlich reduziert bzw. sogar vermieden. Insgesamt resultiert ein Ultraschallmotor mit hoher Zugkraft bei gleichzeitig niedrigen Verlusten und damit einer niedrigen Eigenerwärmung.
- [0022] Im Folgenden werden die Begriffe ‚Hohlzylinder‘ und ‚Zylinder‘, bzw. ‚Ultraschallaktor‘ und ‚Aktor‘, bzw. ‚Ultraschallmotor‘ und ‚Motor‘ synonym verwendet.
- [0023] Es kann von Vorteil sein, dass die Erregerelektroden und die allgemeinen Elektroden und die jeweils zwischen benachbarten Erregerelektroden und allgemeinen Elektroden angeordneten Schichten piezoelektrischen Materials der Sektoren einer Sektorengruppe einen Generator für akustische Longitudinalstehwellen bilden, und die so gebildeten Generatoren derart elektrisch ansteuerbar sind, dass sich eine erste Longitudinalstehwelle längs der Erzeugenden des Ultraschallaktors und sich eine zweite akustische Longitudinalstehwelle längs der Höhe des Ultraschallaktors ausbreitet. Die Ausbreitung längs der Erzeugenden des Ultraschallaktors ist hier und auch im Folgenden so zu verstehen, dass sich die Longitudinalstehwelle in Umfangsrichtung ausbreitet.
- [0024] Daneben kann es von Vorteil sein, dass die Erregerelektroden und die allgemeinen Elektroden und die jeweils zwischen benachbarten Erregerelektroden und allgemeinen Elektroden angeordneten Schichten piezoelektrischen Materials der Sektoren einer Sektorengruppe einen Generator für eine akustische asymmetrische Stehwelle bilden, und die so gebildeten Generatoren derart elektrisch ansteuerbar sind, dass sich die

akustischen asymmetrischen Stehwellen längs der Erzeugenden des Ultraschallaktors ausbreitet.

- [0025] Weiterhin kann es von Vorteil sein, dass das Verhältnis L zu H zwischen 1 und 1,3 ist, und dass das Verhältnis H zu T zwischen 2 und 20 ist. Hierdurch resultiert ein besonders effektiv betreibbarer Ultraschallmotor.
- [0026] Es kann ebenso von Vorteil sein, dass der Rotor Dämpfungselemente umfasst, welche die Amplitude parasitärer Schwingungen des Rotors verringern.
- [0027] Außerdem kann es von Vorteil sein, dass die elektrische Erregervorrichtung eine elektrische Einphasenerregerspannung bereitstellt, und die elektrische Erregervorrichtung einen Umschalter zum Anlegen der Einphasenerregerspannung an die Erregerelektroden und die allgemeinen Elektroden entweder der ersten oder der zweiten Sektorengruppe zur Umkehr der Drehrichtung des Rotors umfasst.
- [0028] Darüber hinaus kann es von Vorteil sein, dass die elektrische Erregervorrichtung eine elektrische Zweiphasenspannung bereitstellt, wobei eine der so bereitgestellten Spannungen  $U_1$  und  $U_2$  an die Erregerelektroden und die allgemeinen Elektroden einer Sektorengruppe angelegt ist, und die zweite der so bereitgestellten Spannungen an die Erregerelektroden und die allgemeinen Elektroden der anderen Sektorengruppe angelegt ist, und die elektrische Erregervorrichtung einen Umschalter zur Phasenverschiebung zwischen den bereitgestellten Spannungen  $U_1$  und  $U_2$  zur Umkehr der Drehrichtung des Rotors aufweist.
- [0029] Zudem kann es von Vorteil sein, dass parallel zu den Erregerelektroden und den allgemeinen Elektroden einer Sektorengruppe oder parallel zu den Erregerelektroden und den allgemeinen Elektroden beider Sektorengruppen Kompensationsinduktivitäten  $L_k$  geschaltet sind, die teilweise oder vollständig die kapazitive Komponente des Stroms der Elektroden einer Sektorengruppe oder beider Sektorengruppen kompensieren.
- [0030] Es kann auch von Vorteil sein, dass die elektrische Erregervorrichtung ein Rückkopplungselement aufweist, das in Reihe mit den Elektroden einer

der Sektorengruppen geschaltet ist.

- [0031] Hierbei kann es insbesondere von Vorteil sein, dass die elektrische Erregervorrichtung einen Rückkopplungskreis zur Frequenzregelung der Erregerspannung nach dem Phasensignal des Rückkopplungselements aufweist.
- [0032] Zusätzlich kann es von Vorteil sein, dass der Ultraschallmotor einen Lage- oder Geschwindigkeitsgeber des Rotors und einen Regler für Lage und Geschwindigkeit des Rotors aufweist.
- [0033] Weitere vorteilhafte Weiterbildungen des Ultraschallmotors ergeben sich durch Kombinationen der in den Ansprüchen, in der Beschreibung und in den Zeichnungen offenbarten Merkmale.
- [0034] Kurze Beschreibung der Zeichnungen
- [0035] Fig.1: Explosionsdarstellung eines erfindungsgemäßen Ultraschallmotors
- [0036] Fig.2: Darstellung 17: dreidimensionale Ansicht eines Ultraschallaktors eines erfindungsgemäßen Ultraschallmotors; Darstellung 18: Draufsicht des Ultraschallaktors gemäß Darstellung 17
- [0037] Fig.3: Darstellung 19: Dreidimensionale Ansicht eines Abschnitts eines Ultraschallaktors eines erfindungsgemäßen Ultraschallmotors mit Friktionselementen an einer der Stirnflächen; Darstellung 20: dreidimensionale Ansicht eines Abschnitts eines Ultraschallaktors eines erfindungsgemäßen Ultraschallmotors mit Friktionselementen an beiden Stirnflächen
- [0038] Fig.4: Darstellungen 21 bis 26: Draufsichten auf Ultraschallaktoren eines erfindungsgemäßen Ultraschallmotors mit unterschiedlicher Anzahl an daran angeordneten Friktionselementen
- [0039] Fig.5: Darstellung 27: Innerer Aufbau eines Sektors eines Ultraschallaktors eines erfindungsgemäßen Ultraschallmotors in dreidimensionaler Ansicht; Darstellung 28: innerer Aufbau des Sektors gemäß Darstellung 27 in Seitenansicht und mit Darstellung der elektrischen Verbindungen
- [0040] Fig.6: Darstellung 40: Dreidimensionale Ansicht eines Ultraschallaktors eines erfindungsgemäßen Ultraschallmotors; Darstellung 41: Draufsicht auf eine Schicht von als Kreisringsegmente ausgeführte Erregerelektroden des Ultraschallaktors gemäß Darstellung 40; Darstellung 42:

- Explosionsdarstellung des Ultraschallaktors gemäß Darstellung 40
- [0041] Fig.7: Darstellung 43: Dreidimensionale Ansicht eines Ultraschallaktors eines erfindungsgemäßen Ultraschallmotors; Darstellung 46: Draufsicht auf eine Schicht von Erregerelektroden des Ultraschallaktors gemäß Darstellung 43; Darstellung 47: Explosionsdarstellung des Ultraschallaktors gemäß Darstellung 43
- [0042] Fig.8: Darstellung einer Ausführungsform der elektrischen Kontaktierung der Elektroden eines Ultraschallaktors eines erfindungsgemäßen Ultraschallmotors in Form eines abgewickelten Mantelflächenabschnitts des Ultraschallaktors
- [0043] Fig.9: Darstellung einer weiteren Ausführungsform der elektrischen Kontaktierung der Elektroden eines Ultraschallaktors eines erfindungsgemäßen Ultraschallmotors in Form eines abgewickelten Mantelflächenabschnitts des Ultraschallaktors
- [0044] Fig.10: Darstellungen 49 und 50: Unterschiedliche Ausführungsformen einer Schaltung zum Verbinden der Erregerelektroden und der allgemeinen Elektroden der Sektoren Sa und Sb eines Ultraschallaktors mit einer elektrischen Erregervorrichtung des erfindungsgemäßen Ultraschallmotors; Darstellungen 55 bis 57: Unterschiedliche mögliche Bewegungsbahnen eines Punktes eines Friktionselements eines erfindungsgemäßen Ultraschallmotors
- [0045] Fig.11: Darstellungen 59 bis 62: vier Phasen maximaler Deformation eines unbelasteten Ultraschallaktors eines erfindungsgemäßen Ultraschallmotors mit bestimmten Abmessungen im Fall seiner einphasigen Erregung und einer bestimmten Frequenz der Erregerspannung
- [0046] Fig.12: Darstellungen 63 und 64: Eingriffs- bzw. Kontaktverhältnisse zwischen Friktionselement und Rotor zu unterschiedlichen Zeitpunkten; Darstellung 65: Verdeutlichung der zwischen Friktionselement und Rotor wirkenden Kräfte gemäß Eingriffsverhältnis nach Darstellung 64
- [0047] Fig.13: Explosionsdarstellung eines erfindungsgemäßen Ultraschallmotors
- [0048] Fig.14: Weitere Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Ultraschallmotors

- [0049] Fig. 15: Blockschaltbild einer einphasigen elektrischen Erregervorrichtung des erfindungsgemäßen Ultraschallmotors
- [0050] Fig. 16: Blockschaltbild einer zweiphasigen elektrischen Erregervorrichtung des erfindungsgemäßen Ultraschallmotors
- [0051] Fig. 17: Blockschaltbild betreffend einen erfindungsgemäßen Ultraschallmotor mit einem Lage- oder Geschwindigkeitsgeber des Rotors und einem Regler für Lage und Geschwindigkeit des Rotors
- [0052] Fig. 1 verdeutlicht anhand einer Explosionsdarstellung den Aufbau einer möglichen Ausführungsform des erfindungsgemäßen Ultraschallmotors.
- [0053] Dieser weist einen als piezoelektrischen Hohlzylinder 2 ausgeführten Ultraschallaktor 1 auf. An einer der Stirnflächen 4 des Ultraschallaktors sind drei Friktionselemente 3 in zueinander gleichem umfänglichem Abstand angeordnet. Der Rotor 6 wird mit Hilfe einer Feder 5 gegen die Friktionselemente 3 gedrückt, wobei der Rotor als mehrteilige, mit der Achse 8 verbundene Scheibe 7 ausgeführt ist.
- [0054] Die mehrteilige Scheibe 7 umfasst die Halterung 9, die Friktionsschiene 10 und das zwischen der Halterung 9 und der Friktionsschiene 10 befindliche Dämpfungselement 11. Das Dämpfungselement 11 ist als elastischer Kleber ausgeführt. Daneben ist denkbar, das Dämpfungselement beispielsweise als Gummiring oder als mit festen Teilchen angereicherte viskose Schicht auszuführen. Die Friktionsschiene 10 besteht aus einer Oxidkeramik auf Basis von  $\text{Al}_2\text{O}_3$  mit  $\text{ZrO}_2$  als Zusatz. Andere Oxidkeramiken oder andere harte abriebfeste Werkstoffe wie Nicht-Oxid-Keramiken, z.B. Siliciumcarbid, Borcarbid, Siliciumnitrid, Aluminiumnitrid, Bornitrid usw., sind hierfür ebenso denkbar.
- [0055] Der Ultraschallaktor 1 ist in der Halterung 12 angeordnet. Mit seiner zweiten Stirnfläche 13, an der keine Friktionselemente angeordnet sind, stützt sich der Aktor 1 auf der schallisolierenden Unterlage 15 ab. Die Halterung 12 weist ein Kugellager 16 auf, in dem sich die Achse 5 dreht. Der Rotor 6 wird durch das Halteelement 14 gehalten.
- [0056] Gemäß Fig. 2 lässt sich der piezoelektrische Zylinder 2 durch axial-diametrale Ebenen – hier beispielsweise durch die drei axial-diametralen Ebenen D1, D2 und D3 - in eine gerade Zahl gleicher

Sektoren (Hohlzylindersegmente) Sa und Sb unterteilen, wobei alle Sektoren Sa eine Sektorengruppe A und alle Sektoren Sb eine Sektorengruppe B bilden. Die Sektoren Sa und die Sektoren Sb sind abwechselnd entlang des Umfangs des hohlzylindrischen Ultraschallaktors angeordnet und grenzen jeweils aneinander.

- [0057] Die axial-diametralen Ebenen D1, D2 und D3 werden durch die Längs- oder Rotationsachse O des Zylinders 2 und einen seiner Parameter gebildet. Unter dem Begriff Gleichheit der Sektoren Sa und Sb wird verstanden, dass die axial-diametralen Ebenen D1, D2 und D3 den Zylinder 2 in die Sektoren Sa und Sn mit den gleichen Umfangswinkeln  $\alpha$  teilt.
- [0058] Die Zahl der den Zylinder 2 des Aktors 1 teilenden axial-diametralen Ebenen kann beliebig sein, z. B. n.
- [0059] Darstellung 19 von Fig. 3 zeigt einen Teil des hohlzylindrischen Ultraschallaktors 1, wobei dieser in n axial-diametrale Ebenen unterteilt ist. Der (Umfangs-)Winkel  $\alpha$  der Sektoren Sa und Sb für einen solchen Ultraschallaktor ist gleich  $360/2n=180/n$ .
- [0060] Im Ultraschallaktor 1 des erfindungsgemäßen Ultraschallmotors weist der piezoelektrische Hohlzylinder 2 die Erzeugende Q auf. Weitere geometrische Größen des hohlzylindrischen Ultraschallaktors bzw. seiner Sektoren Sa bzw. Sb sind: die mittlere Länge L des Sektors Sa oder Sb, die Höhe H in Richtung der Längs- oder Rotationsachse O und die Wanddicke T in radialer Richtung. Die mittlere Länge L ist hierbei die Länge des Sektors in Umfangsrichtung bei der Position T/2. Die Länge der Erzeugenden Q ist daher die Summe der Längen L aller Sektoren Sa und Sb, d.h.  $Q=nL$ .
- [0061] Die Friktionselemente 3 sind auf der Stirnfläche 4 des Zylinders 2 jeweils im Bereich der Grenze zweier angrenzender Sektoren Sa und Sb (Sektorenpaar) angeordnet, und zwar symmetrisch bezüglich dem durch die jeweilige axial-diametrale Ebene D geteilten Sektorenpaar.
- [0062] Gemäß Darstellung 20 von Fig. 3 können die Friktionselemente 3 auch auf beiden Stirnflächen 4 des Ultraschallaktors 2 angeordnet sein.
- [0063] In den Darstellungen 21 bis 26 sind Ultraschallaktoren in Draufsicht

gezeigt, welche zwei, drei, vier, fünf, sechs und sieben Friktionselemente 3 aufweisen. Die Friktionselemente sind hierbei aus der Oxidkeramik  $\text{Al}_2\text{O}_3$  gefertigt, können jedoch auch aus anderen harten und abriebfesten Werkstoffen sein, beispielsweise aus der Oxidkeramik  $\text{ZrO}_2$  oder aus einer Nicht-Oxidkeramik wie SIC oder  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Sie können jedoch auch aus festen Monokristallen wie z. B. aus Saphir, Rubin, Korund gefertigt sein. Des Weiteren können sie auch aus Metallkeramik auf der Basis von Wolframkarbid, Titankarbid u. ä. gefertigt sein. Zudem können die Friktionselemente auch aus verschiedenartigen harten Polymerwerkstoffen hergestellt sein, und dabei mit harten abriebfesten Teilchen wie z. B. Aluminiumoxid, Zirkoniumoxid, Wolframkarbid, Titankarbid u. ä. gefüllt sein.

- [0064] Gemäß Fig. 5 weist jeder Sektor Sa bzw. Sb jeder Sektorengruppe A und B in axialer Richtung abwechselnd angeordnete Schichten von Erregerelektroden 29 und allgemeinen Elektroden 30 auf, wobei jeweils zwischen benachbarten Erregerelektroden 29 und allgemeinen Elektroden 30 eine Piezokeramikschiicht 31 angeordnet ist.
- [0065] Die Schichten der Erregerelektroden 29 sind hierbei als Segmente 32, und die Schichten allgemeiner Elektroden 30 sind als Segmente 33 ausgeführt.
- [0066] Die Schichten der Elektroden 29, 30 sind als dünne Palladiumschichten mit Dicken zwischen 10 und 150 Mikrometer ausgeführt. Es ist jedoch ebenso denkbar, die Schichten der Elektroden 29, 30 als dünne Palladium-Silberschichten oder als dünne Kupferschichten auszuführen. Die Piezokeramikschiichten 31 weisen eine harte PZT-Piezokeramik mit einer Dicke zwischen 30 und 50 Mikrometer auf. Die Herstellung des Ultraschallaktors erfolgt hierbei mittels piezokeramischer Multilayer-Technologien, jedoch ist auch eine Herstellung durch Synthese von Piezokeramik in der Luft oder im Schutzgas möglich.
- [0067] In jedem Sektor Sa und Sb sind die Schichten 29, 30, 31 normal, d.h. unter einem Winkel von  $90^\circ$ , zur Längs- oder Rotationsachse O des Zylinders 2 angeordnet und damit parallel zu den Stirnflächen 4, 13 des Zylinders.
- [0068] Die Piezokeramikschiichten 31 sind zu den Elektroden 29, 30 normal

polarisiert (in Darstellung 28 von Fig. 5 durch Pfeile mit dem Index  $p$  gekennzeichnet). Bei einer solchen Polarisation ist der Polarisationsvektor  $p$  parallel zur Längs- oder Rotationsachse des Zylinders 2 und senkrecht zu seinen Stirnflächen 4, 13 gerichtet.

- [0069] Alle den Sektoren  $S_a$  der Sektorengruppe A zugehörigen Schichten von Erregerelektroden 29 sind elektrisch miteinander verbunden. Ebenso sind alle Schichten der Erregerelektroden 29 der Sektorengruppe B elektrisch miteinander verbunden. Darüber hinaus sind alle Schichten der allgemeinen Elektroden 30 der Sektoren  $S_a$  und der Sektoren  $S_b$  der Sektorengruppen A und B elektrisch miteinander verbunden.
- [0070] Hierbei sind in jedem Sektor  $S_a$  und  $S_b$  alle Schichten der Erregerelektroden 29 untereinander mit Hilfe der leitenden Bahnen 34 und 35 und mit den Anschlüssen 36 und 37 verbunden, und alle Schichten der allgemeinen Elektroden 30 sind untereinander mit Hilfe der leitenden Bahnen 38 mit den Anschlüssen 39 verbunden.
- [0071] Bei dieser Art der Verbindung der Elektroden sind folgende zwei Grenzfälle denkbar:
- [0072] Im ersten Fall bilden die Erregerelektroden 29 zusammen mit den allgemeinen Elektroden 30 und den Piezokeramiksichten 31 zwischen ihnen aller zur Sektorengruppe A gehörenden Sektoren  $S_a$  den ersten kombinierten Generator für eine sich entlang der Erzeugenden  $Q$  des piezoelektrischen Zylinders 2 des Ultraschallaktors 1 ausbreitende akustische Longitudinalstehwelle (d.h. eine sich in Umfangsrichtung ausbreitende akustische Longitudinalstehwelle) und für eine sich entlang der Höhe  $H$  bzw. der Höhererstreckung des piezoelektrischen Zylinders 2 des Ultraschallaktors 1 ausbreitende akustische Longitudinalstehwelle. Die Erregerelektroden 29 zusammen mit den allgemeinen Elektroden 30 und den Piezokeramiksichten 31 zwischen ihnen aller zur Sektorengruppe B gehörenden Sektoren  $S_b$  bilden den zweiten kombinierten Generator für eine sich entlang der Erzeugenden  $Q$  des piezoelektrischen Zylinders 2 des Ultraschallaktors 1 bzw. eine sich in Umfangsrichtung ausbreitende akustische Longitudinalstehwelle und für eine sich entlang der Höhe  $H$  des piezoelektrischen Zylinders 2 des Ultraschallaktors 1 bzw. eine sich in

Höhenrichtung ausbreitende akustische Longitudinalstehwelle.

- [0073] Im zweiten Fall bilden die Erregerelektroden 29 zusammen mit den allgemeinen Elektroden 30 und den Piezokeramiksichten 31 zwischen ihnen aller zur Sektorengruppe A gehörenden Sektoren Sa den ersten Generator für eine sich entlang der Erzeugenden Q des piezoelektrischen Zylinders 2 des Ultraschallaktors 1 ausbreitende asymmetrische akustische Longitudinalstehwelle. Die Erregerelektroden 29 bilden zusammen mit den allgemeinen Elektroden 30 und den Piezokeramiksichten 31 zwischen ihnen aller zur Sektorengruppe B gehörenden Sektoren Sb den zweiten Generator für eine sich entlang der Erzeugenden Q des piezoelektrischen Zylinders 2 des Ultraschallaktors 1 ausbreitende asymmetrische akustische Longitudinalstehwelle.
- [0074] Gemäß Darstellung 41 von Fig. 6 sind die Erregerelektroden 29 des hohlzylindrischen Ultraschallaktors nach Darstellung 40 von Fig. 6 als Segmente 32 und die allgemeinen Elektroden 30 gemäß Darstellung 42 als Ringe ausgeführt, die alle Sektoren Sa und Sb beider Sektorengruppen A und B kreuzen.
- [0075] Gemäß Darstellung 46 von Fig. 7 sind die Erregerelektroden 29 des hohlzylindrischen Ultraschallaktors gemäß Darstellung 43 als Segmente 32 ausgeführt, die mit den elektrisch leitenden Bahnen 44 und 45 verbunden sind. Die Bahnen 44 verbinden die Elektroden 29 der Sektoren Sa miteinander, während die Bahnen 45 die Elektroden 29 der Sektoren Sb miteinander verbinden.
- [0076] Nach Fig. 8, in welcher schematisch ein Teil der abgewickelten Mantelfläche eines Ultraschallaktors eines erfindungsgemäßen Ultraschallmotors mit den Elektroden 29, 30 auf ihm gezeigt ist, sind alle Erregerelektroden 29 der Sektoren Sa der Sektorengruppe A mit den leitenden Bahnen 34 über die Anschlüsse 36 mit dem Ausgang 46 der Elektroden der Sektorengruppe A verbunden, während alle Erregerelektroden 29 der Sektoren Sb der Sektorengruppe B mit den leitenden Bahnen 35 über die Anschlüssen 37 mit dem Ausgang 47 der Elektroden der Sektorengruppe B verbunden sind. Alle allgemeinen Elektroden 30 sind mit den elektrisch leitenden Bahnen 38 über den

Anschluss 39 mit dem Ausgang 48 der Sektorengruppen A und B verbunden.

- [0077] Nach Fig. 9, in welcher schematisch ein Teil der abgewickelten Mantelfläche einer weiteren Ausführungsform eines Ultraschallaktors eines erfindungsgemäßen Ultraschallmotors mit den Elektroden 29, 30 auf ihm gezeigt ist, sind alle Erregerelektroden 29 der Sektoren Sa der Sektorengruppen A mit den leitenden Bahnen 34 über die Anschlüsse 36 mit dem Ausgang 46 der Elektroden der Sektorengruppe A verbunden. Alle Erregerelektroden 29 der Sektoren Sb der Sektorengruppe B sind mit den leitenden Bahnen 45 über die Anschlüssen 37 mit dem Ausgang 47 der Sektorengruppe B verbunden, und alle allgemeinen Elektroden 30 sind mit den elektrisch leitenden Bahnen 38 über den Anschluss 38 mit dem Ausgang 48 der Sektorengruppen A und B verbunden.
- [0078] Die Darstellungen 49 und 50 von Fig. 10 zeigen unterschiedliche Schaltungsvarianten zum Verbinden der Erregerelektroden 29 und der allgemeinen Elektroden 30 der Sektoren Sa und Sb mit der elektrischen Erregervorrichtung 51 bzw. 52.
- [0079] Die elektrische Erregervorrichtung 51 stellt hierbei eine einphasige elektrische Spannung  $U_1$  bereit. Diese Spannung wird mit Hilfe des Umschalters 53 an die Elektroden 29 und 30 aller Sektoren Sa der Sektorengruppe A oder an die Elektroden 29 und 30 der Sektoren Sb der Sektorengruppe B gelegt.
- [0080] Die elektrische Erregervorrichtung 52 stellt dagegen eine zweiphasige elektrische Spannung  $U_1, U_2$  mit einer Phasenverschiebung  $\phi$  zwischen den Spannungen  $U_1, U_2$  bereit. Die Spannung  $U_1$  wird an die Elektroden 29, 30 aller Sektoren Sa der Sektorengruppe A gelegt. Die Spannung  $U_2$  wird an die Elektroden 29, 30 aller Sektoren Sb der Sektorengruppe B gelegt.
- [0081] Die elektrische Erregervorrichtung 52 weist einen Phasenumschalter 54 auf, mit dem die Phasenverschiebung von Plus  $\phi$  auf Minus  $\phi$  geändert werden kann.
- [0082] Die Spannungen  $U_1, U_2$  können eine sinusförmige, eine dreieckige, eine sägezahnförmige, eine rechteckige Form oder eine beliebige andere Form

aufweisen, bei der die Frequenz  $f_0$  der ersten Harmonischen dieser Spannungen der Frequenz der akustischen Longitudinalstehwelle entspricht, die sich entlang der Erzeugenden Q des piezoelektrischen Zylinders 2 des Aktors 1 ausbreitet, und die Frequenz  $f_0$  der akustischen Longitudinalstehwelle entspricht, die sich entlang der Höhe H des piezoelektrischen Zylinders 2 des Aktors 1 ausbreitet.

- [0083] Außerdem kann die Frequenz  $f_0$  der Frequenz der akustischen asymmetrischen Longitudinalstehwelle entsprechen, die sich entlang der Erzeugenden Q des piezoelektrischen Zylinders des Rotors 1 ausbreitet.
- [0084] Beim Anlegen der Erregerspannung  $U_1$  an die Erregerelektroden 29 und an die allgemeinen Elektroden 30 der Sektoren Sa und Sb wird der erste oder der zweite Generator für akustische Wellen erregt. Mit dem Umschalter 53 können die Generatoren umgeschaltet werden.
- [0085] Für die Funktion des Aktors 1 sind zwei Grenzfälle denkbar. Diese Prinzipien werden im Folgenden für freie Schwingungen des Aktors 1 betrachtet:
- [0086] Im ersten Fall erzeugt die Spannung  $U_1$  gleichzeitig im Aktor 1 zwei symmetrische akustische Wellen, nämlich eine akustische Longitudinalstehwelle, die sich längs der Erzeugenden Q des piezoelektrischen Zylinders 2 ausbreitet, und eine akustische Longitudinalstehwelle, die sich längs der Höhe H des piezoelektrischen Zylinders 2 ausbreitet. In diesem Fall arbeiten der erste und der zweite Generator wie kombinierte Generatoren für zwei Typen von akustischen Wellen.
- [0087] Durch die Überlagerung der zwei Typen von akustischen Wellen bewegen sich die auf den Friktionsoberflächen der Friktionselemente 3 angeordneten Punkte 58 auf der gemäß Darstellung 55 von Fig. 10 durch die punktierte Linie gezeigten elliptischen Bewegungsbahn. Beim Betätigen des Umschalters 53 kehrt sich die Bewegungsrichtung der Punkte 58 um. Das ändert die Bewegungsrichtung des Rotors 6.
- [0088] Im zweiten Fall erzeugt die Spannung  $U_1$  im Aktor 1 eine asymmetrische akustische Welle, die sich längs der Erzeugenden Q des piezoelektrischen Zylinders 2 ausbreitet. Durch die Ausbreitung dieser Welle bewegen sich

die auf den Friktionsoberflächen der Friktionselemente 3 angeordneten Punkte 58 auf der gemäß Darstellung 56 von Fig. 10 durch die punktierte Linie gezeigten geneigten linearen Bewegungsbahn oder auf einer gedehnten elliptischen Bewegungsbahn. Beim Betätigen des Umschalters 53 kehrt sich die Neigung der Bewegungsbahn zur Friktionsoberfläche des Friktionselementes 3 um.

- [0089] Die Auswahl des einen oder des anderen Funktionsprinzips kann durch die Wahl des entsprechenden Verhältnisses von L/H oder der entsprechenden Frequenz  $f_0$  erfolgen.
- [0090] Bei einer Zweiphasenerregung des Aktors 1 werden an die Erregerelektroden 29 und die allgemeinen Elektroden 30 der Sektoren Sa und Sb gleichzeitig die zwei Erregerspannungen U1 und U2 angelegt. Dabei werden gleichzeitig der erste und der zweite Generator für die akustischen Wellen erregt. Diese Art der Erregung macht eine beliebige Form und eine beliebige Neigung der elliptischen Bewegungsbahn der Punkte 58 möglich, verdeutlicht durch die punktierte Linie in Darstellung 57 von Fig. 10. Die Änderung der Form und der Neigung der Bewegungsbahn kann durch Änderung der Amplitude der Spannungen U1, U2 und des Phasenverschiebungswinkels  $\phi$  bewirkt werden. Durch das Betätigen des Umschalters 54 ist es möglich, den Phasenverschiebungswinkel von Plus  $\phi$  auf Minus  $\phi$  zu ändern. Dadurch ändert sich die Drehrichtung des Rotors 6.
- [0091] Die Darstellungen 59 bis 62 von Fig. 11 zeigen vier Phasen maximaler Deformation des unbelasteten Aktors 1 in Form eines Hohlzylinders mit den Abmessungen  $\varnothing 14 \times \varnothing 10 \times 6$  mm im Fall seiner einphasigen Erregung und der Frequenz der Erregerspannung von  $f_0 = 289,2$  kHz.
- [0092] Die Darstellungen 63 bis 65 von Fig. 12 dienen der Erläuterung des Funktionsprinzips des Friktionskontaktes für einen erfindungsgemäßen Ultraschallmotor bei maximaler auf das Friktionselement 3 von Seiten des Rotors 6 einwirkender Last Fr. Beim Betrieb mit maximaler Last wird davon ausgegangen, dass der Rotor 6 mit der Kraft Fr gebremst wird und sich mit einer Geschwindigkeit bedeutend kleiner als seine Maximalgeschwindigkeit bewegt, wobei zwischen Friktionselement 3 und

- Friktionsschiene im Friktionskontakt noch kein Schlupf auftritt.
- [0093] Bei diesem Funktionsprinzip bewegen sich die Punkte 58 auf der Friktionsoberfläche des Friktionselementes 3 auf der Bewegungsbahn 66 gemäß Darstellung 63 von Fig. 12.
- [0094] Die Bewegungsbahn 66 weist zwei zwischen den Punkten 69 und 70 liegende charakteristische Abschnitte 67 und 68 auf. Im Abschnitt 67 tangiert das Friktionselement 3 nicht die Friktionsschiene 10, d.h. der Aktor 1 ist ohne Last. Im Abschnitt 68 wird das Friktionselement 3 an die Friktionsschiene 10 angepresst. Der Aktor 1 wird über den Rotor 6 mit der Kraft  $F_r$  beaufschlagt.
- [0095] Darstellung 64 von Fig. 12 verdeutlicht die Bewegung des Friktionselements 3 im Abschnitt 68.
- [0096] Darstellung 65 von Fig. 12 zeigt die im Friktionskontakt des Motors bei Bewegung des Friktionselementes 3 im Abschnitt 68 der Bewegungsbahn 66 einwirkenden Kräfte.
- [0097] Durch die an die Elektroden 29 und 30 angelegten elektrischen Spannungen  $U_1$  oder  $U_2$  bildet sich zwischen ihnen das elektrische Feld  $E$  aus. Die Darstellungen 64 und 65 von Fig. 12 zeigen den Vektor des elektrischen Feldes  $E$ , dessen Richtung mit der des Polarisationsvektors  $p$  und der Richtung der Längs- oder Rotationsachse zusammenfällt.
- [0098] Durch den umgekehrten piezoelektrischen Effekt erzeugt das elektrische Feld  $E$  in Richtung der Längs- oder Rotationsachse die Kraft  $F_{ad}$  und in Richtung der Tangentialachse  $T_g$  die Kraft  $F_{td}$ . Im Abschnitt 68 der Bewegungsbahn 66 sind diese Kräfte maximal.
- [0099] Die Kraft  $F_{ad}$  besteht aus der statischen Kraft  $F_{as}$ , wodurch die Kraft  $F_a$  entsteht, die das Friktionselement 3 an die Friktionsschiene 10 anpresst. Die Kraft  $F_a$  wirkt der Elastizitätskraft des Friktionskontaktes  $F_s$  entgegen. Die Kraft  $F_{td}$  veranlasst den Rotor 6 sich entgegen der Kraft  $F_r$  zu bewegen.
- [0100] Die piezoelektrische Kraft  $F_{ad}$  ist dabei proportional zum Piezomodul  $d_{33}$  und die Kraft  $F_{td}$  proportional zum Piezomodul  $d_{31}$ .
- [0101] Bei harter PZT Keramik liegt das Verhältnis von  $d_{33}/d_{31}$  im Bereich zwischen 2,5 und 3. Das bedeutet, dass der Aktor 1 des

erfindungsgemäßen Ultraschallmotors eine in axialer Richtung (d.h. längs bzw. entlang der Längs- oder Rotationsachse) wirkende dynamische Kraft  $F_{ad}$  entwickelt, die 2,5 bis 3 mal größer als die in tangentialer Richtung (längs zur Achse  $T_g$ ) entwickelte Kraft  $F_{td}$ .

- [0102] Aus der Bedingung für eine optimale Funktion des Friktionskontaktes, nach der die statische Anpresskraft  $F_{as}$  gleich der Amplitude der dynamischen Kraft  $F_{ad}$  sein muss, folgt, dass in diesem Fall die gesamte Anpresskraft  $F_a$  gleich der doppelten Amplitude der dynamischen Anpresskraft  $F_{ad}$  sein muss. Das bedeutet, dass bei Einhaltung dieser Bedingung im vorgeschlagenen Motor die Anpresskraft  $F_a$  gleich 5 - 6  $F_{td}$  ist. D. h. beim Anlegen der elektrischen Spannung an die Elektroden 29 und 30 entsteht im Friktionskontakt des erfindungsgemäßen Ultraschallmotors die Anpresskraft  $F_a$ , die 5 bis 6 Mal größer als die Amplitude der Tangentialkraft  $F_{td}$  ist.
- [0103] Entsprechend den obigen Darlegungen zeichnet sich der Friktionskontakt des erfindungsgemäßen Ultraschallmotors durch eine 2,5 bis 3 mal größere Reibungskraft  $F_{fk}$  im Friktionskontakt aus, als dies bei den Motoren nach dem Stand der Technik gemäß der eingangs erwähnten Druckschriften US 6,765,335 B2 und US 7,218,031 B2 der Fall ist. Das ermöglicht es ihm, bedeutend größere maximale Kräfte als im Vergleich zu den Ultraschallmotoren nach US 6,765,335 B2 oder US 7,218,031 B2 zu entwickeln.
- [0104] Fig. 13 zeigt einen als Arbeitstisch ausgeführten Ultraschallmotor. Der Rotor 6 dieses Motors besteht aus der Plattform 71, die fest auf der Achse 8 montiert ist. Auf der Plattform 71 ist mit dem Dämpfungselement 11 die Friktionsschiene 10 befestigt. Die Feder 5 presst die Friktionselemente 3 des Ultraschallaktors 1 an die Friktionsschiene 10 an; dies erfolgt über die schallisolierende Unterlage 15 und die Stirnfläche 13 des piezoelektrischen Rings 2, abgestützt auf den Anschlagring 72.
- [0105] Fig. 14 zeigt eine Ausführungsform des erfindungsgemäßen Ultraschallmotors, bei dem der Rotor 6 zwei zusammengesetzte Scheiben 7 aufweist.
- [0106] Die Fig. 15 zeigt eine vereinfachte elektrische Schaltung der einphasigen

- elektrischen Erregervorrichtung 51. Die Schaltung besteht aus dem Leistungsverstärker 72, dem Rückkopplungselement 73 oder 74, dem Rückkopplungskreis 75, der Phasenkette 76, der Kompensationsspule mit der Induktivität  $L_k$  und dem Trennkondensator mit der Kapazität  $C_t$ .
- [0107] Der Leistungsverstärker 72 kann ein Linearverstärker oder ein Impulshalbbrückenverstärker sein, ausgeführt mit bipolaren Transistoren oder mit Feldeffekttransistoren. Als Rückkopplungselement 73 kann der niederohmige Widerstand 73 mit ggf. parallel geschaltetem Kondensator 78 verwendet werden. Als weiteres Element des Rückkopplungskreises 74 kann ein Spannungsteiler 79 verwendet werden, der mit den Erregerelektroden 29 der Sektoren  $S_a$  und  $S_b$  verbunden ist.
- [0108] Der Rückkopplungskreis kann ein Filter 80, einen Phasendetektor 81 und einen Steuergenerator 82 enthalten. Diese Glieder können sowohl als diskrete Elemente, als auch als programmierbarer Mikroprozessor ausgeführt sein.
- [0109] Parallel zu den Elektroden 29, 30 des Aktors 1 kann eine Kompensationsspule mit der Induktivität  $L_k$  geschaltet sein. Die Größe der Induktivität der Kompensationsspule wird aus der Bedingung  $2\pi f_0 L_k = 1/2\pi f_0 C_o$  bestimmt. Dabei wird der Wert für  $C_t$  so gewählt, dass er bedeutend größer als der für  $C_o$  ist.
- [0110] Durch den Einsatz der Kompensationsspule mit der Induktivität  $L_k$  ist es möglich, teilweise oder vollständig die kapazitive Komponente des Stroms der Elektroden einer Sektorengruppe oder der zwei Sektorengruppen zu kompensieren.
- [0111] Die in Fig. 15 dargestellte Schaltung funktioniert wie ein Frequenzregler  $f_0$  für die Erregerspannung  $U_1$  des Aktors 1 nach dem Phasensignal des Elements des Rückkopplungskreises 73 oder 74.
- [0112] Die Fig. 16 zeigt eine vereinfachte elektrische Schaltung der zweiphasigen elektrischen Erregervorrichtung 52. Die Schaltung besitzt einen als Analogverstärker ausgeführten zusätzlichen Leistungsverstärker 83. Der Verstärker 83 ist über den Phasenschieber 84 und den Phasenumschalter 54 mit dem Verstärker 72 verbunden.
- [0113] Bei einer Zweiphasenerregung des Aktors 1 können zwei

Kompensationsspulen mit den Induktivitäten  $L_{ka}$  und  $L_{kb}$  verwendet werden, die parallel zu den Elektroden 29 und 30 der Sektoren  $S_a$  und  $S_b$  der Sektorengruppen A und B geschaltet werden.

[0114] Gemäß Fig. 17 kann der erfindungsgemäße Ultraschallmotor mit einem Lage- oder einem Geschwindigkeitsgeber 85 des Rotors 6 und einem Regler für Lage und Geschwindigkeit 86 des Rotors 6 ausgestattet sein.

## Ansprüche

1. Ultraschallmotor, umfassend einen Ultraschallaktor (1) in Form eines piezoelektrischen Hohlzylinders (2) mit einer inneren Umfangsfläche und einer äußeren Umfangsfläche und die innere und äußere Umfangsfläche miteinander verbindende Stirnflächen (4), wobei an wenigstens einer Stirnfläche Friktionselemente (3) angeordnet sind, einen mit den Friktionselementen in Wirkkontakt stehenden Rotor (6) aufweisend wenigstens eine Scheibe oder eine Plattform (7), und eine elektrische Erregervorrichtung (51, 52), wobei der Ultraschallaktor in Umfangsrichtung in eine gerade Zahl von Sektoren  $S_a$  und  $S_b$  mit einer mittleren Länge  $L$  eines Sektors in Umfangsrichtung, mit einer Höhe  $H$  eines Sektors in Axialrichtung und einer Dicke  $T$  eines Sektors in radialer Richtung unterteilt ist, und die Sektoren eine erste Sektorengruppe A und eine zweite Sektorengruppe B bilden, wobei sich in Umfangsrichtung die Sektoren  $S_a$  und  $S_b$  der beiden Sektorengruppen A und B abwechseln und aneinander angrenzen, und im Bereich der Angrenzung benachbarter Sektoren die Friktionselemente angeordnet sind, **dadurch gekennzeichnet**, dass jeder der Sektoren  $S_a$  und  $S_b$  gebildet ist durch in Axialrichtung des Hohlzylinders abwechselnd angeordnete Erregerelektroden (29) und allgemeine Elektroden (30), wobei jeweils zwischen benachbarten Erregerelektroden und allgemeinen Elektroden eine Schicht piezoelektrischen Materials (31) angeordnet ist, und alle Erregerelektroden und alle allgemeinen Elektroden des Ultraschallaktors elektrisch miteinander verbunden sind.
2. Ultraschallmotor nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Erregerelektroden und die allgemeinen Elektroden und die jeweils zwischen benachbarten Erregerelektroden und allgemeinen Elektroden angeordneten Schichten piezoelektrischen Materials der Sektoren einer Sektorengruppe einen Generator für akustische Longitudinalstehwellen bilden, und die so gebildeten Generatoren derart elektrisch ansteuerbar sind, dass sich eine erste Longitudinalstehwelle längs der Erzeugenden des Ultraschallaktors und sich eine zweite akustische Longitudinalstehwelle längs der Höhe des Ultraschallaktors ausbreitet.
3. Ultraschallmotor nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die

Erregerelektroden und die allgemeinen Elektroden und die jeweils zwischen benachbarten Erregerelektroden und allgemeinen Elektroden angeordneten Schichten piezoelektrischen Materials der Sektoren einer Sektorengruppe einen Generator für eine akustische asymmetrische Stehwelle bilden, und die so gebildeten Generatoren derart elektrisch ansteuerbar sind, dass sich die akustischen asymmetrischen Stehwellen längs der Erzeugenden des Ultraschallaktors ausbreitet.

4. Ultraschallmotor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Verhältnis L zu H zwischen 1 und 1,3 ist, und dass das Verhältnis H zu T zwischen 2 und 20 ist.
5. Ultraschallmotor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Rotor Dämpfungselemente (11) umfasst, welche die Amplitude parasitärer Schwingungen des Rotors verringern.
6. Ultraschallmotor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die elektrische Erregervorrichtung (51) eine elektrische Einphasenerregerspannung bereitstellt, und die elektrische Erregervorrichtung einen Umschalter (53) zum Anlegen der Einphasenerregerspannung an die Erregerelektroden und die allgemeinen Elektroden entweder der ersten oder der zweiten Sektorengruppe zur Umkehr der Drehrichtung des Rotors umfasst.
7. Ultraschallmotor nach einem der vorhergehenden Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass die elektrische Erregervorrichtung (52) eine elektrische Zweiphasenspannung bereitstellt, wobei eine der so bereitgestellten Spannungen U1 und U2 an die Erregerelektroden und die allgemeinen Elektroden einer Sektorengruppe angelegt ist, und die zweite der so bereitgestellten Spannungen an die Erregerelektroden und die allgemeinen Elektroden der anderen Sektorengruppe angelegt ist, und die elektrische Erregervorrichtung einen Umschalter (54) zur Phasenverschiebung zwischen den bereitgestellten Spannungen U1 und U2 zur Umkehr der Drehrichtung des Rotors aufweist.
8. Ultraschallmotor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass parallel zu den Erregerelektroden und den allgemeinen Elektroden einer Sektorengruppe oder parallel zu den Erregerelektroden und den allgemeinen Elektroden beider Sektorengruppen Kompensationsspulen

mit einer Induktivität  $L_k$  geschaltet sind, die teilweise oder vollständig die kapazitive Komponente des Stroms der Elektroden einer Sektorengruppe oder beider Sektorengruppen kompensieren.

9. Ultraschallmotor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die elektrische Erregervorrichtung ein Rückkopplungselement (73, 74) aufweist, das in Reihe mit den Elektroden einer der Sektorengruppen geschaltet ist.
10. Ultraschallmotor nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass die elektrische Erregervorrichtung einen Rückkopplungskreis (75) zur Frequenzregelung der Erregerspannung nach dem Phasensignal des Rückkopplungselements aufweist.
11. Ultraschallmotor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass dieser einen Lage- oder Geschwindigkeitsgeber (85) des Rotors und einen Regler (86) für Lage und Geschwindigkeit des Rotors aufweist.

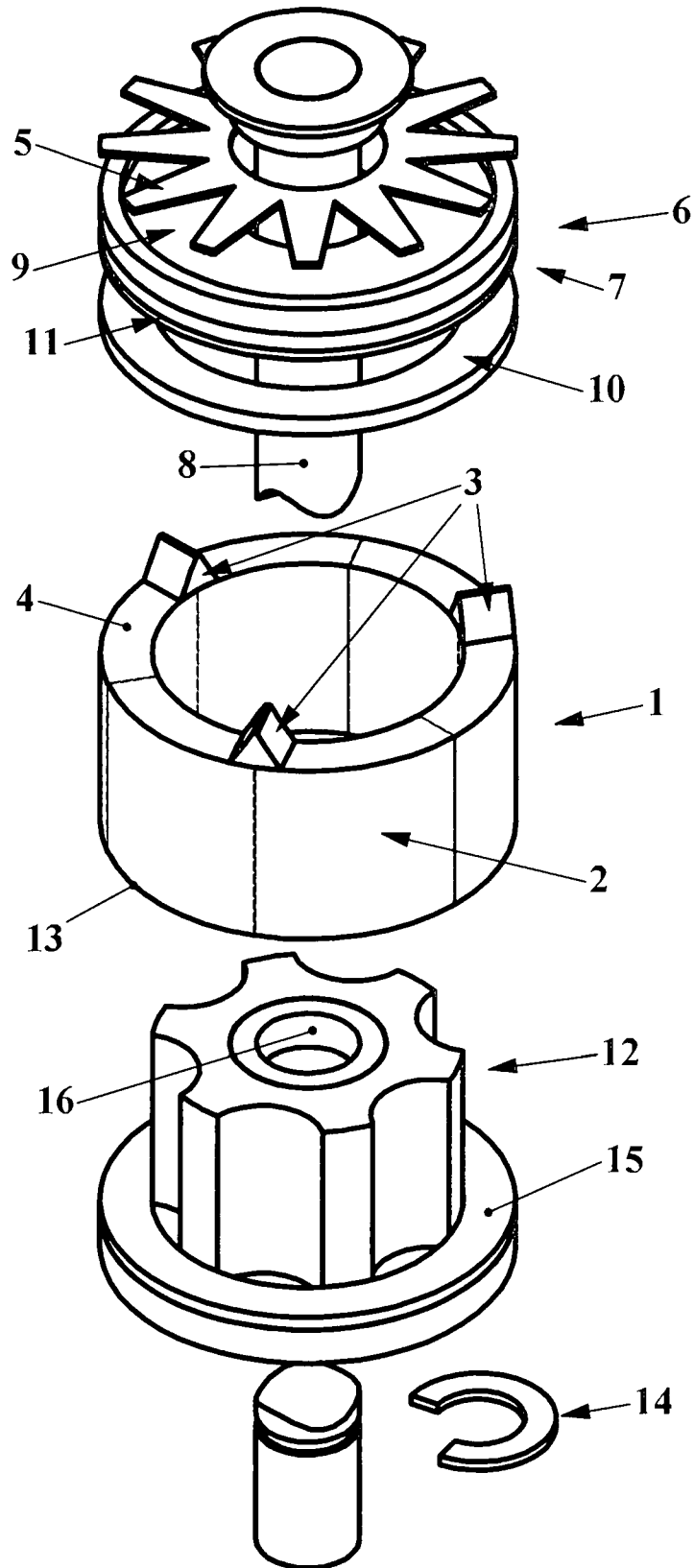
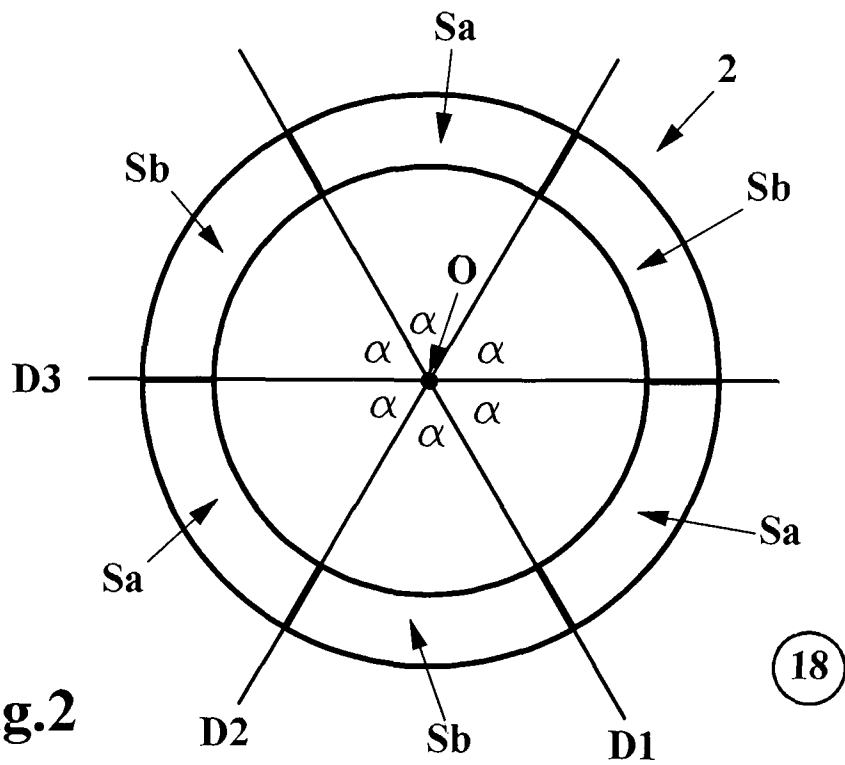
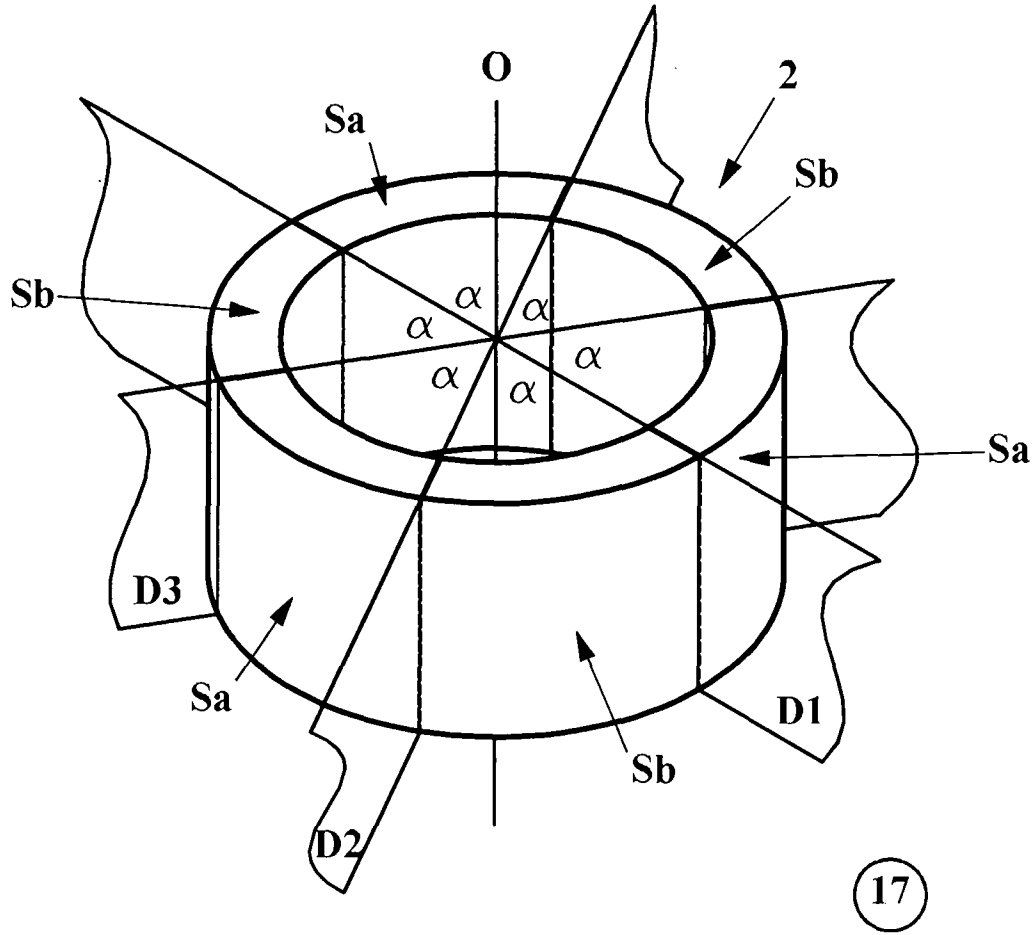


Fig.1

Ersatzblatt



**Fig.2**

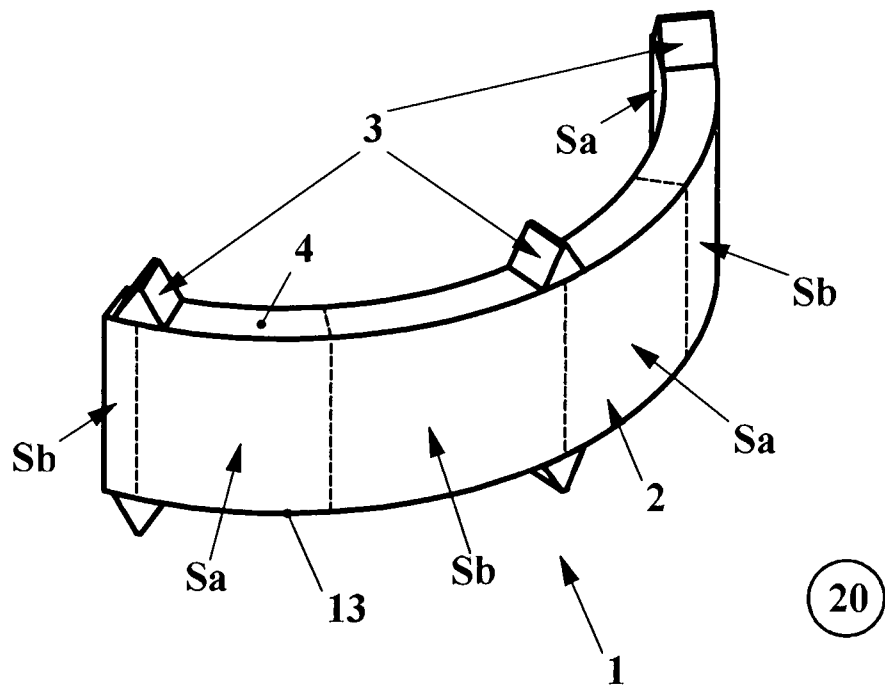
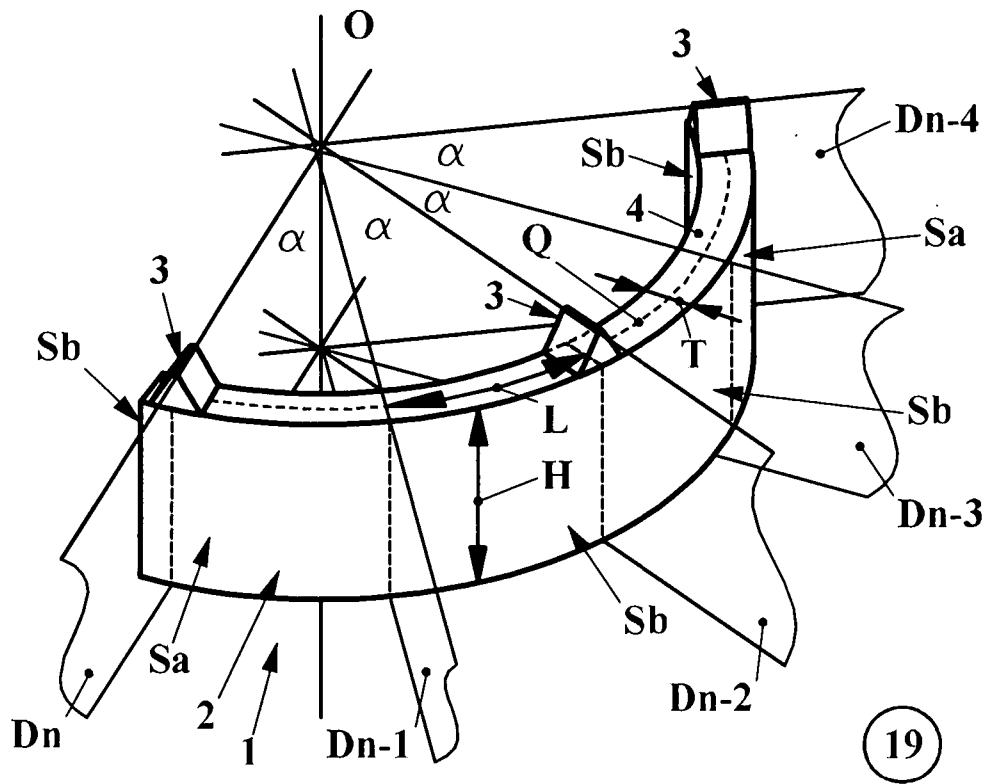


Fig.3

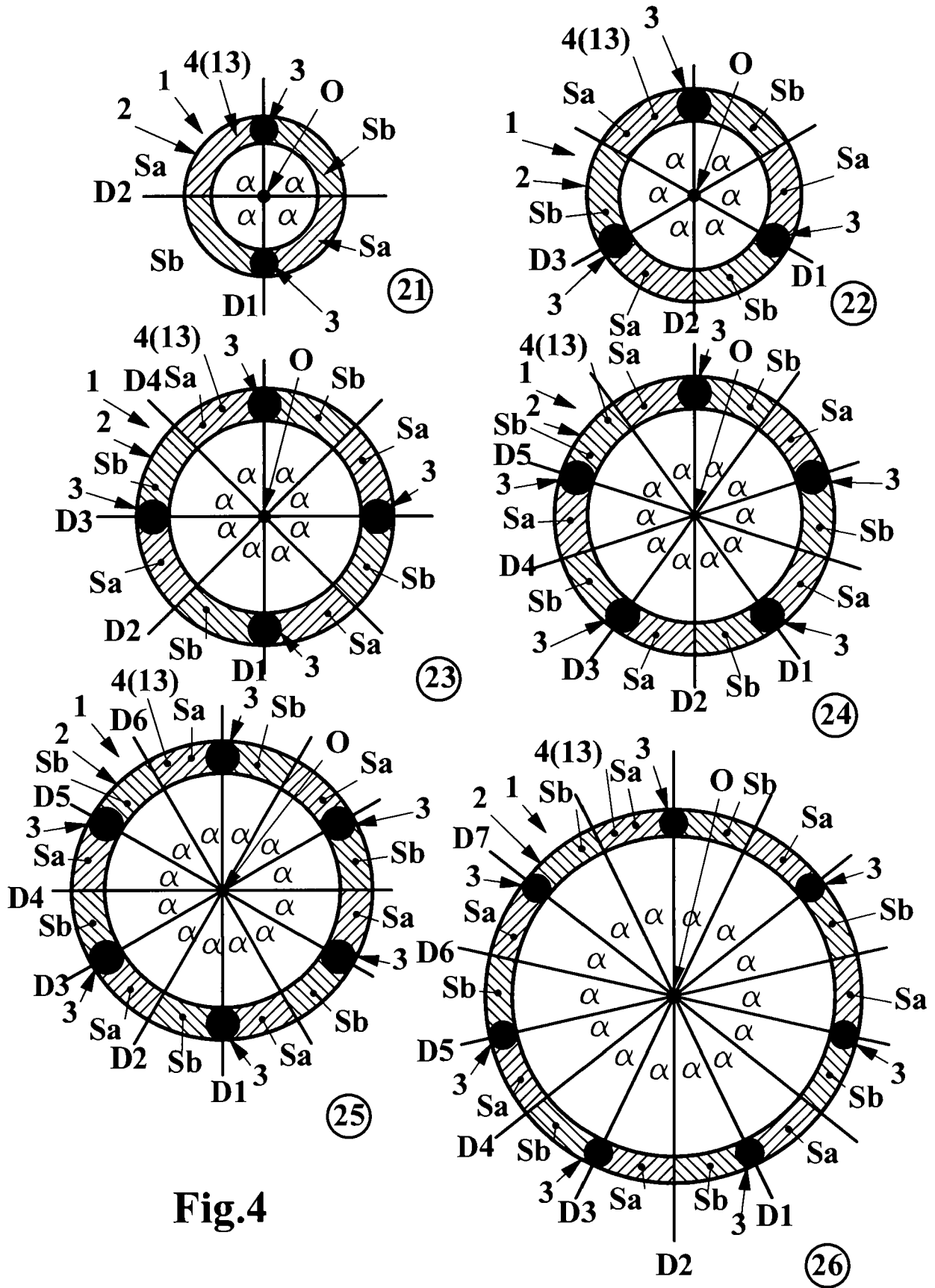


Fig.4

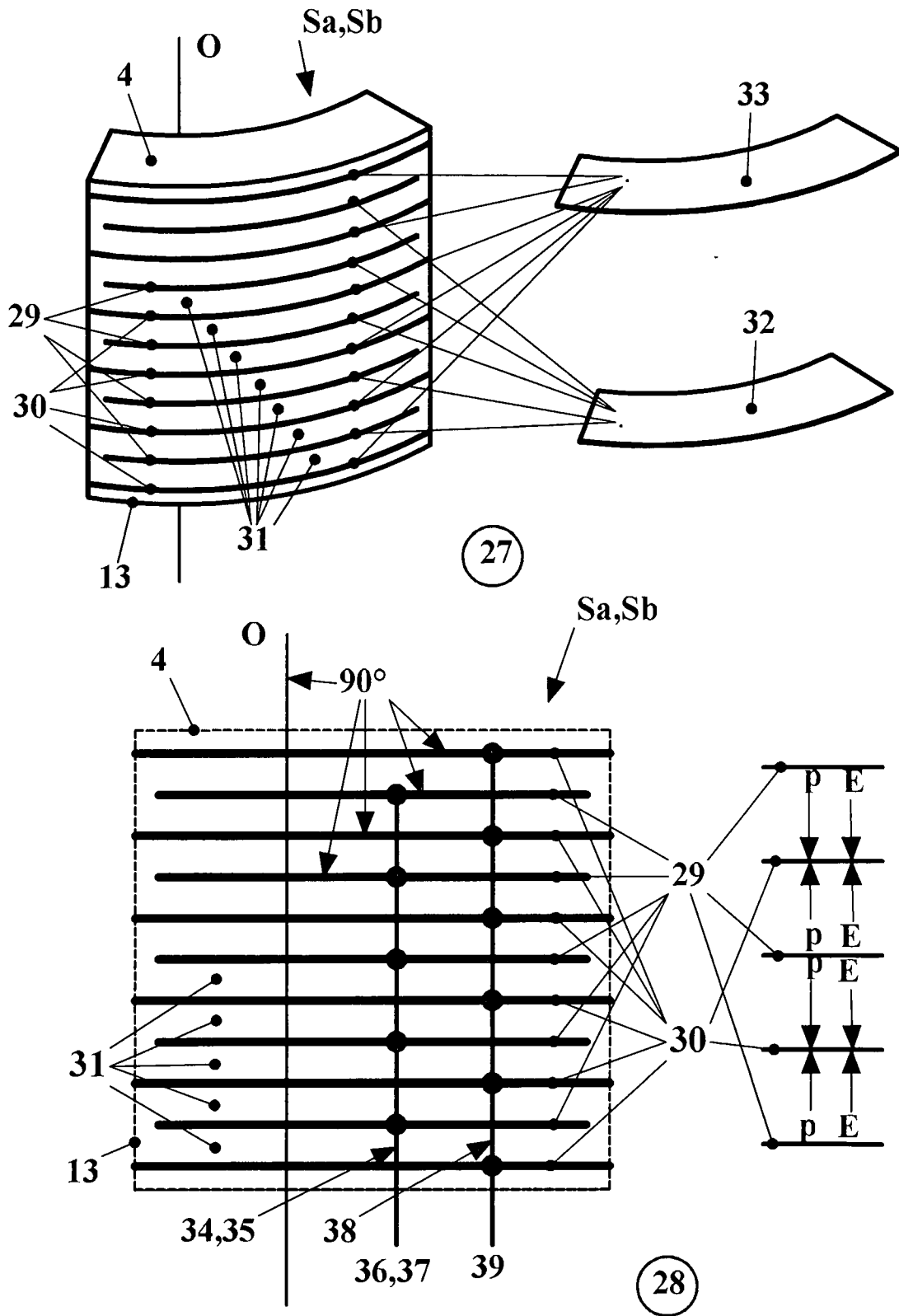


Fig.5

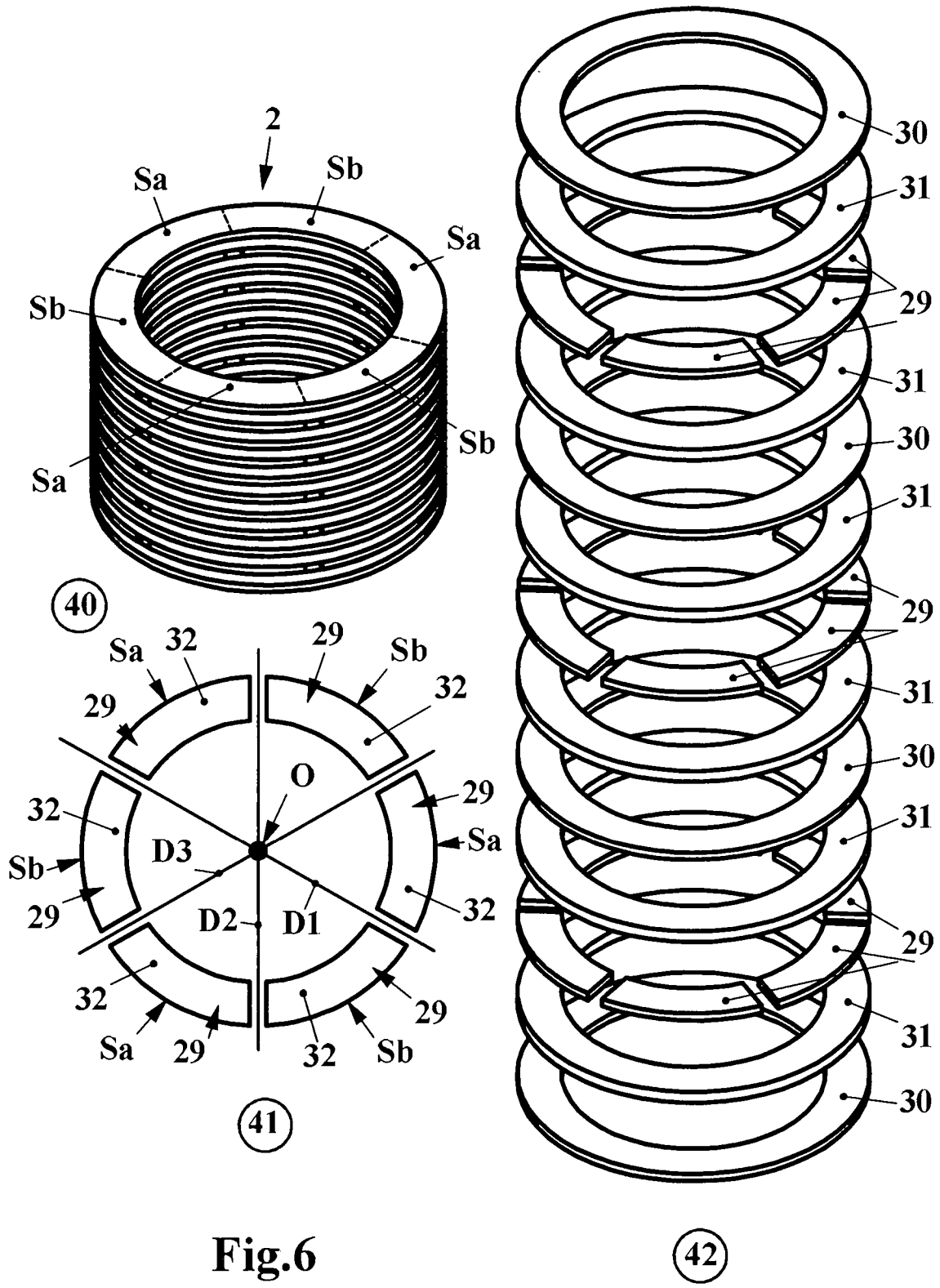


Fig.6

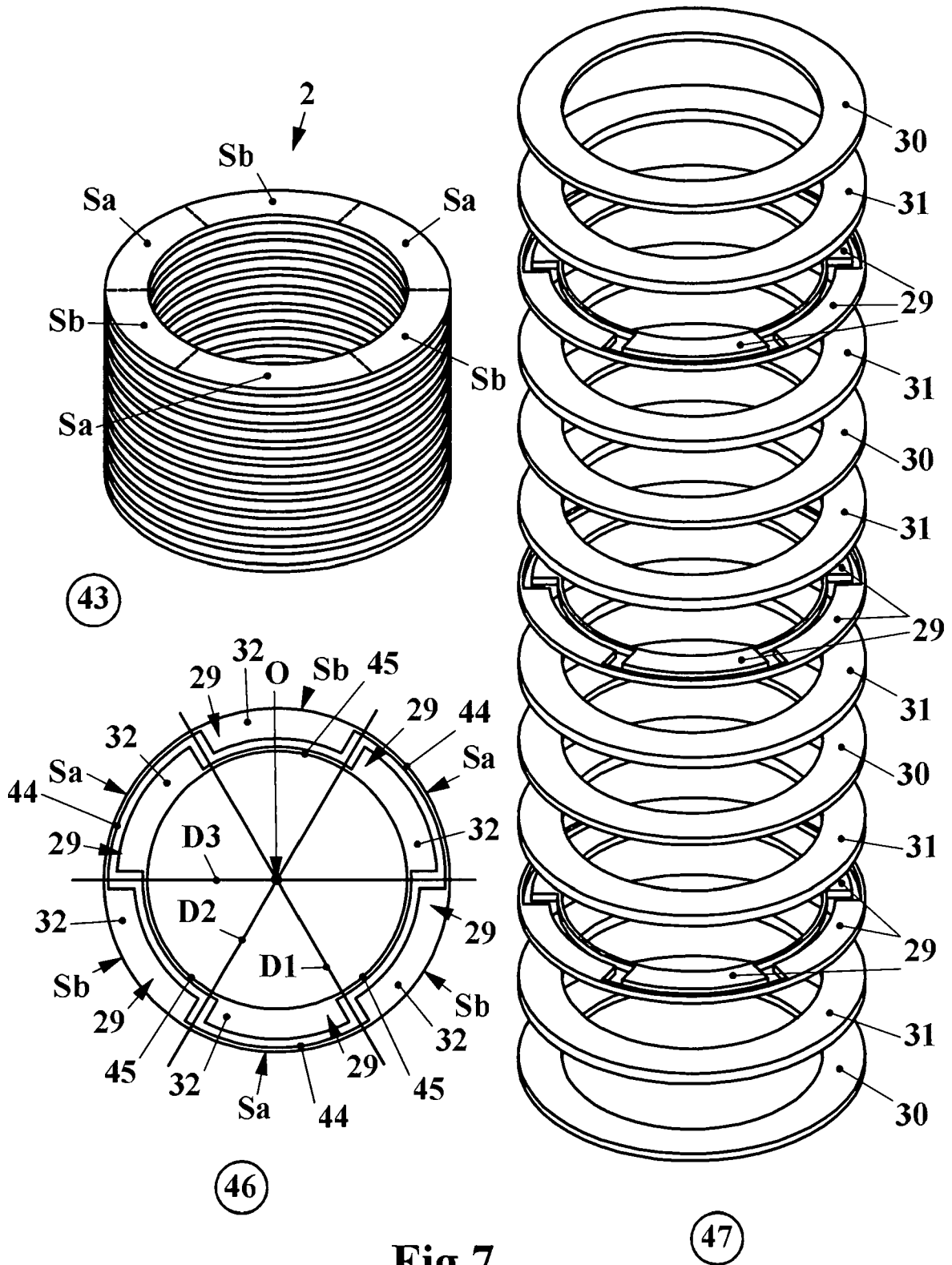


Fig.7

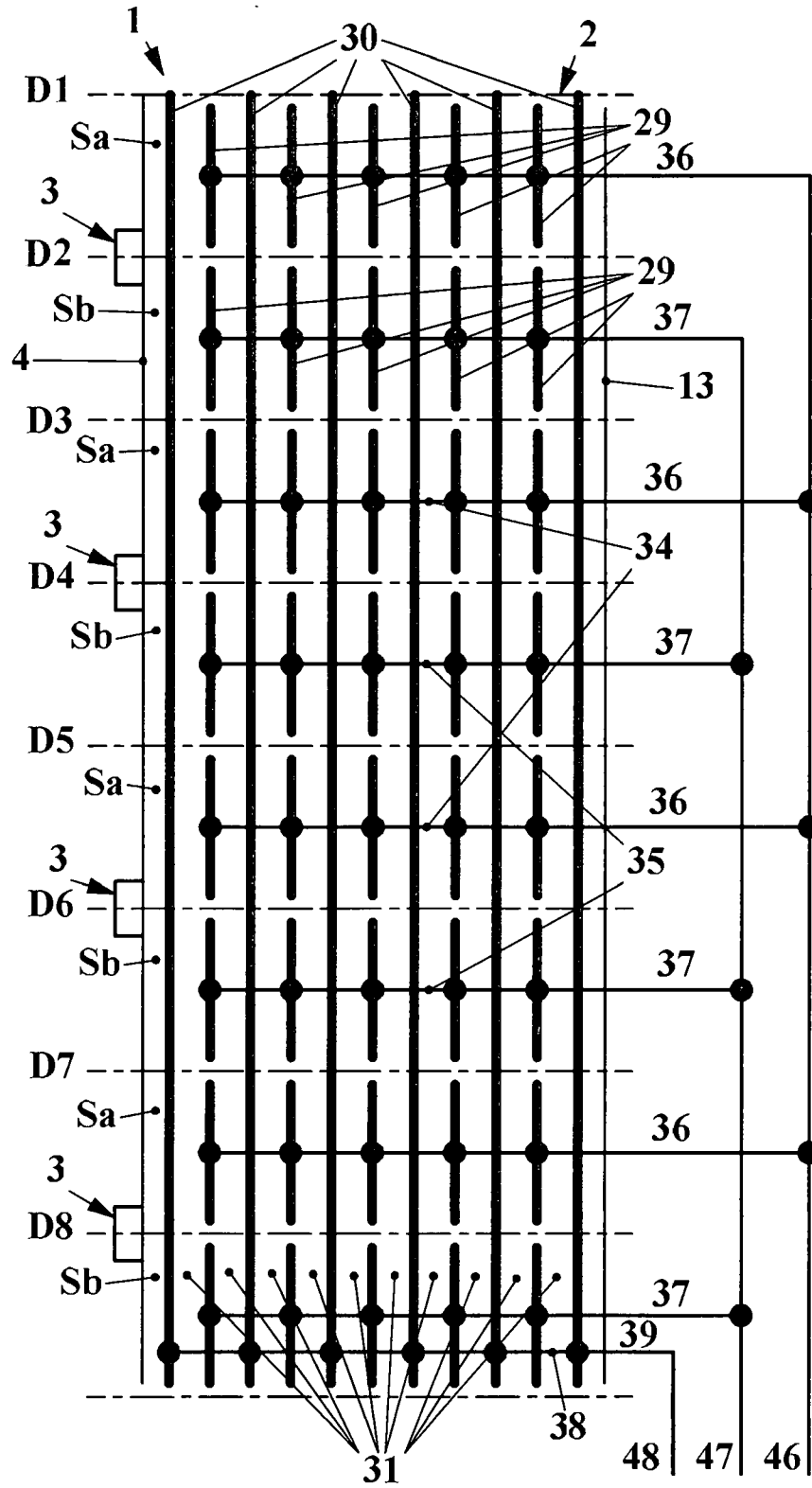


Fig.8

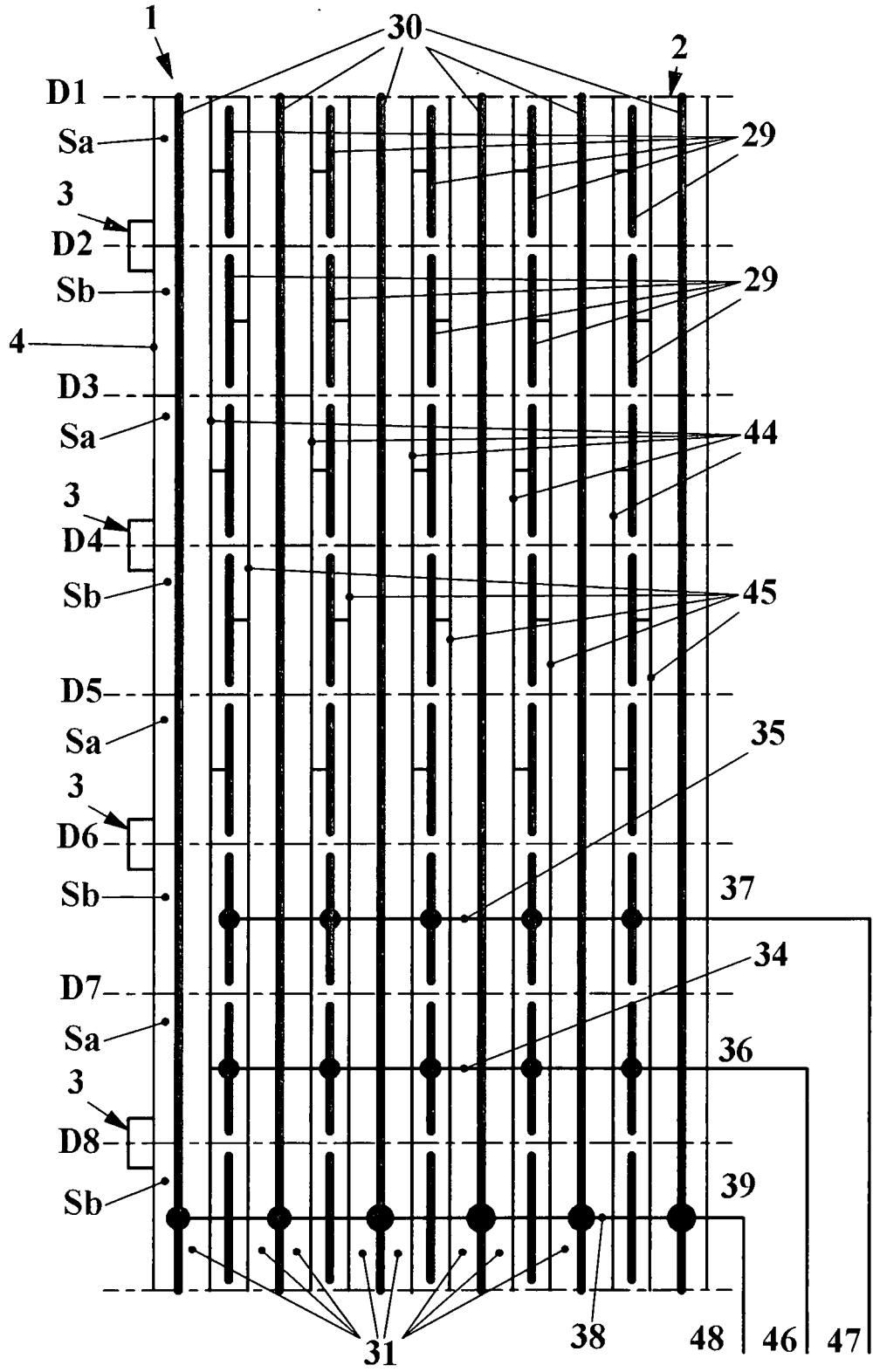


Fig.9

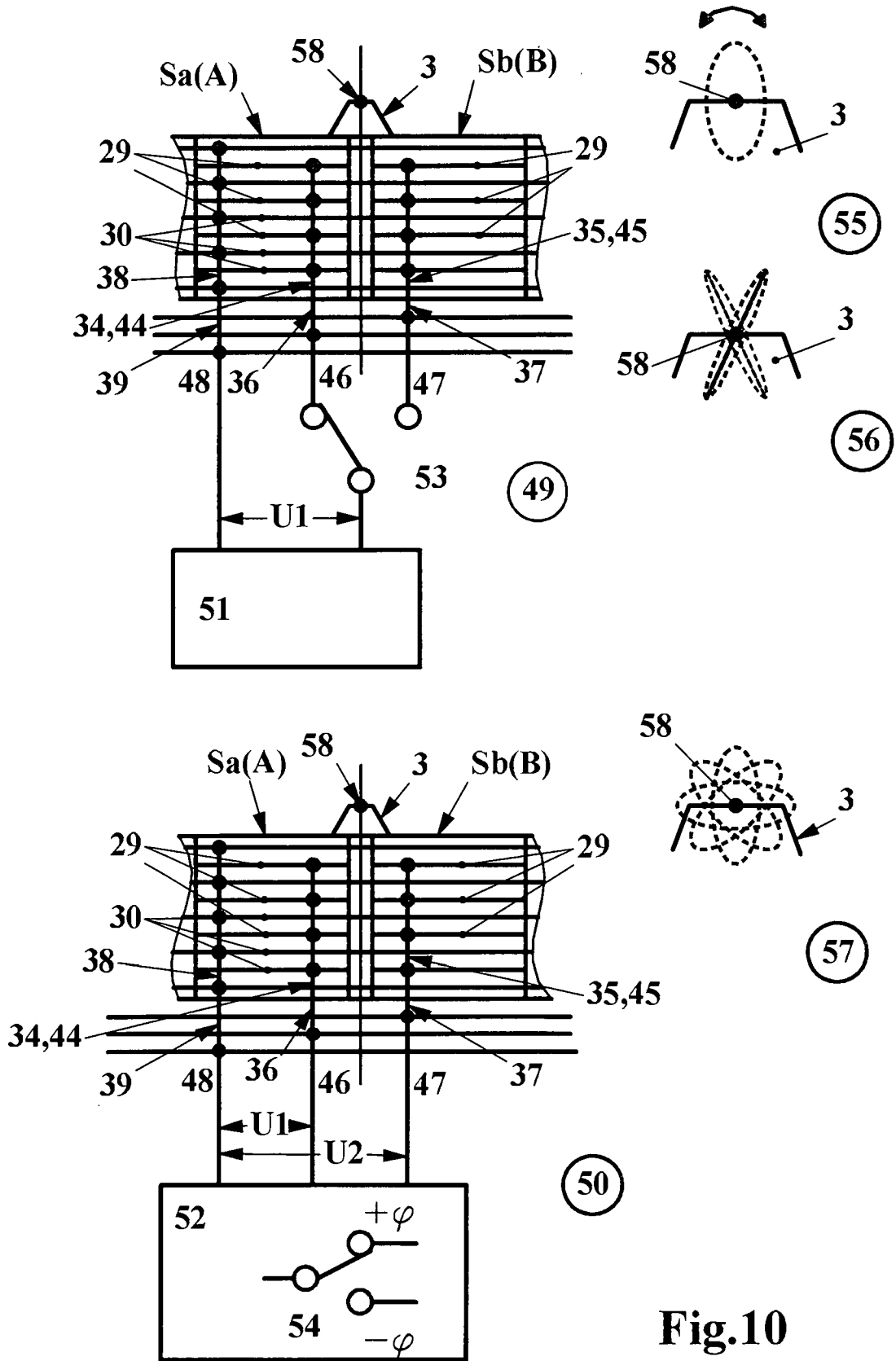
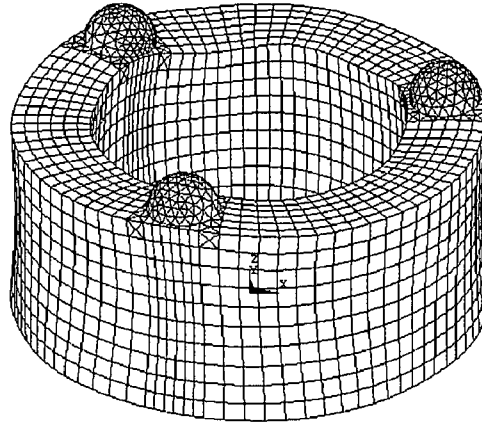
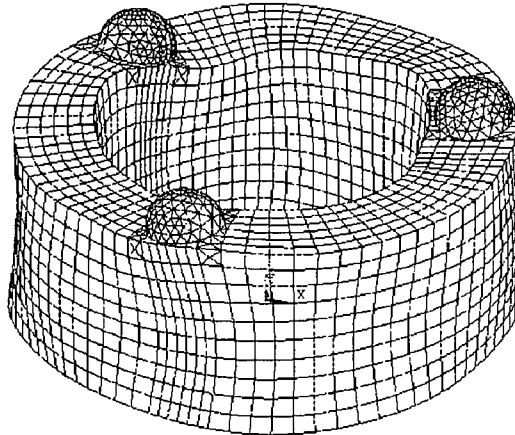


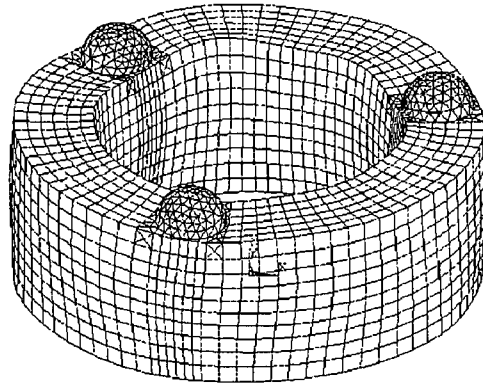
Fig.10



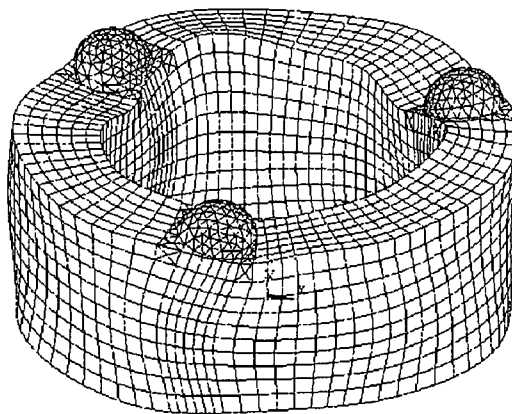
59



60



61



62

**Fig.11**

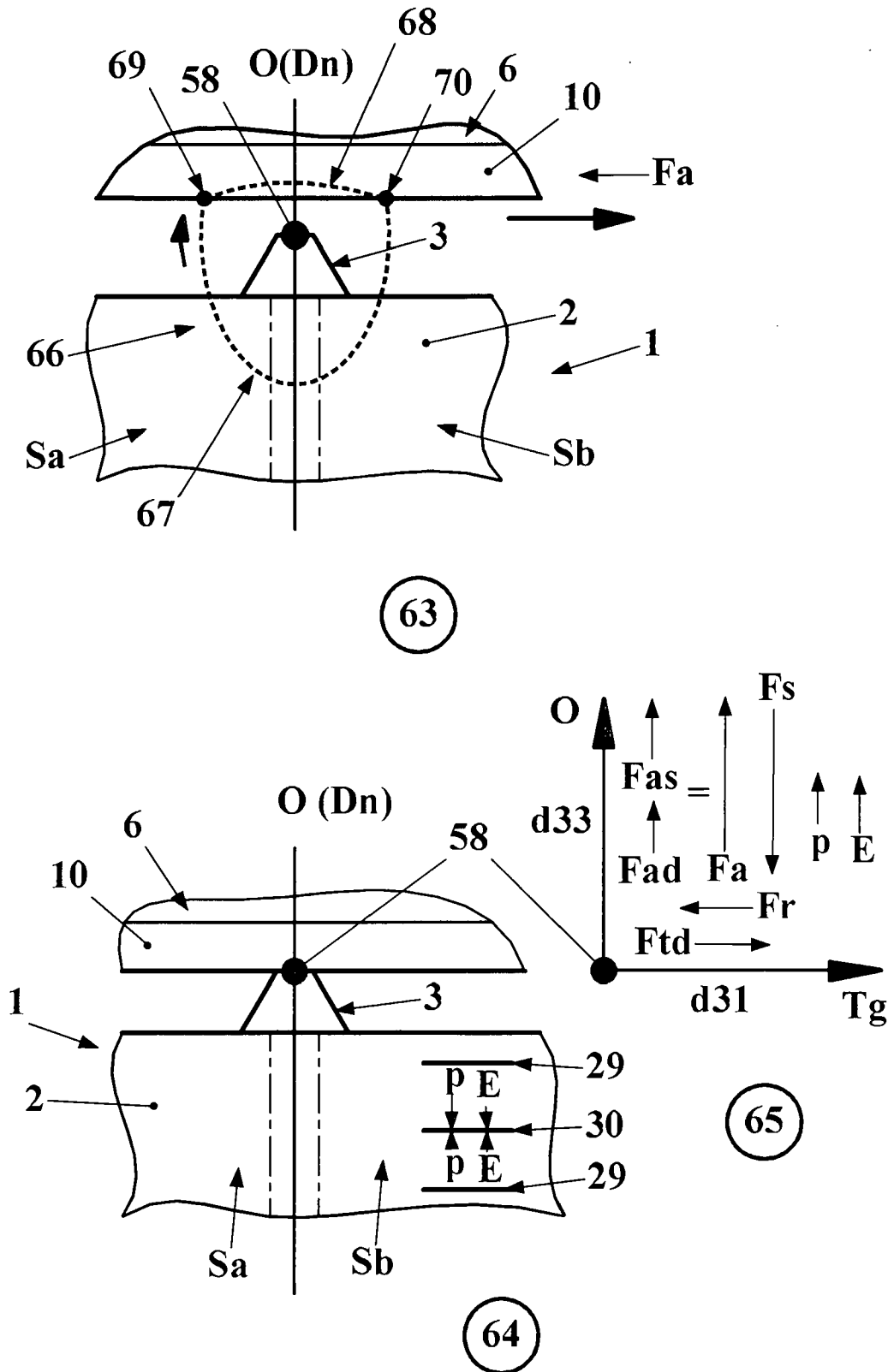


Fig.12

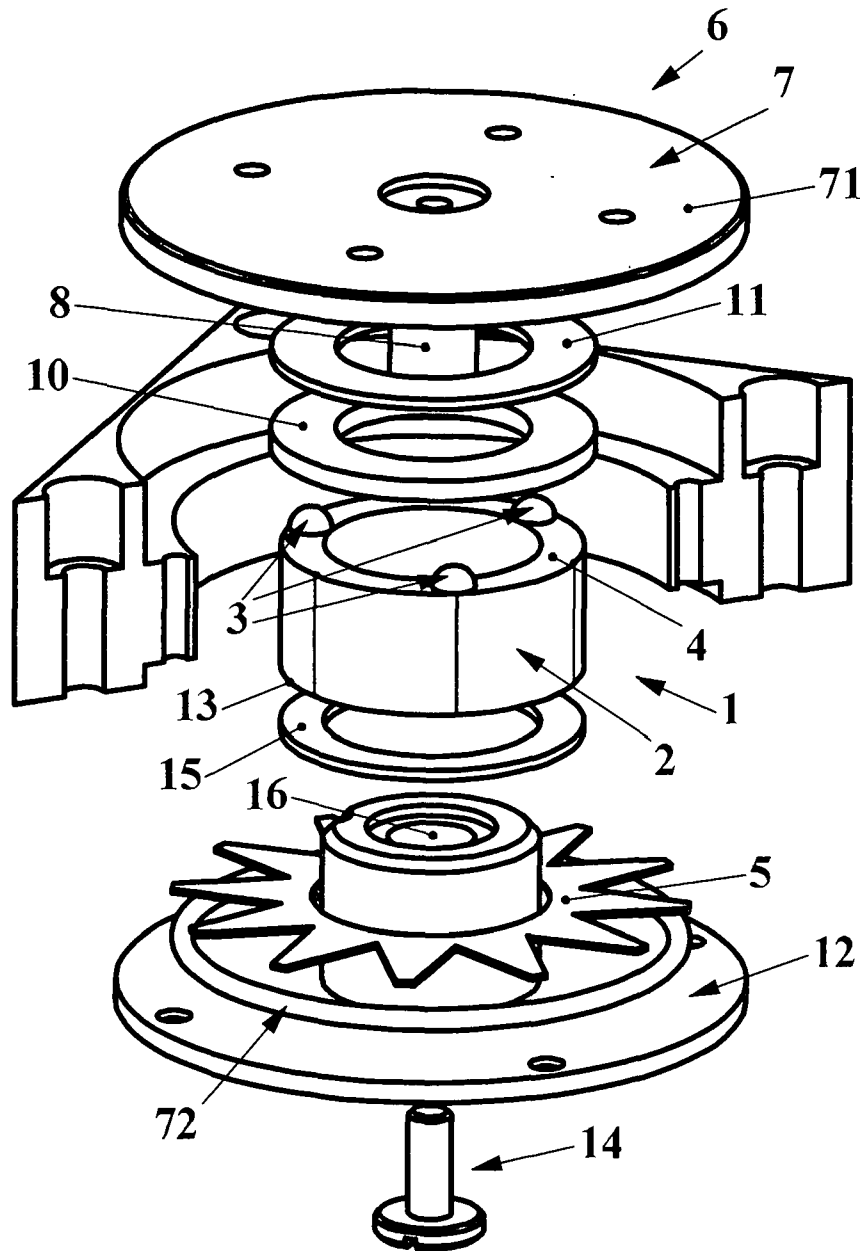
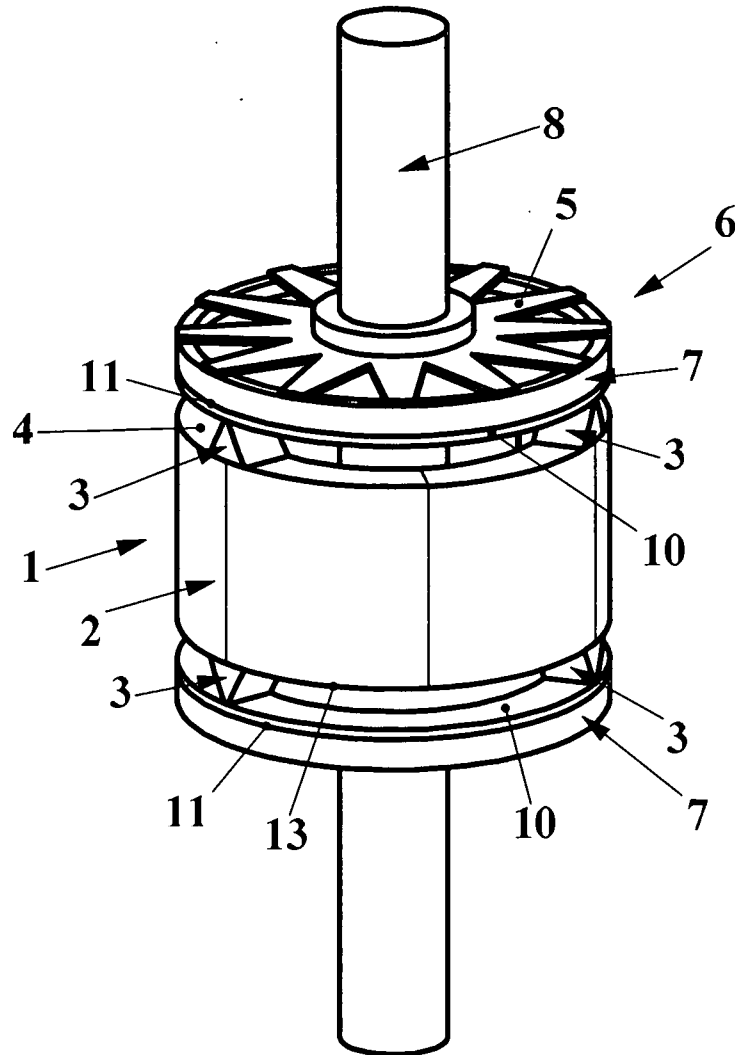


Fig.13



**Fig.14**

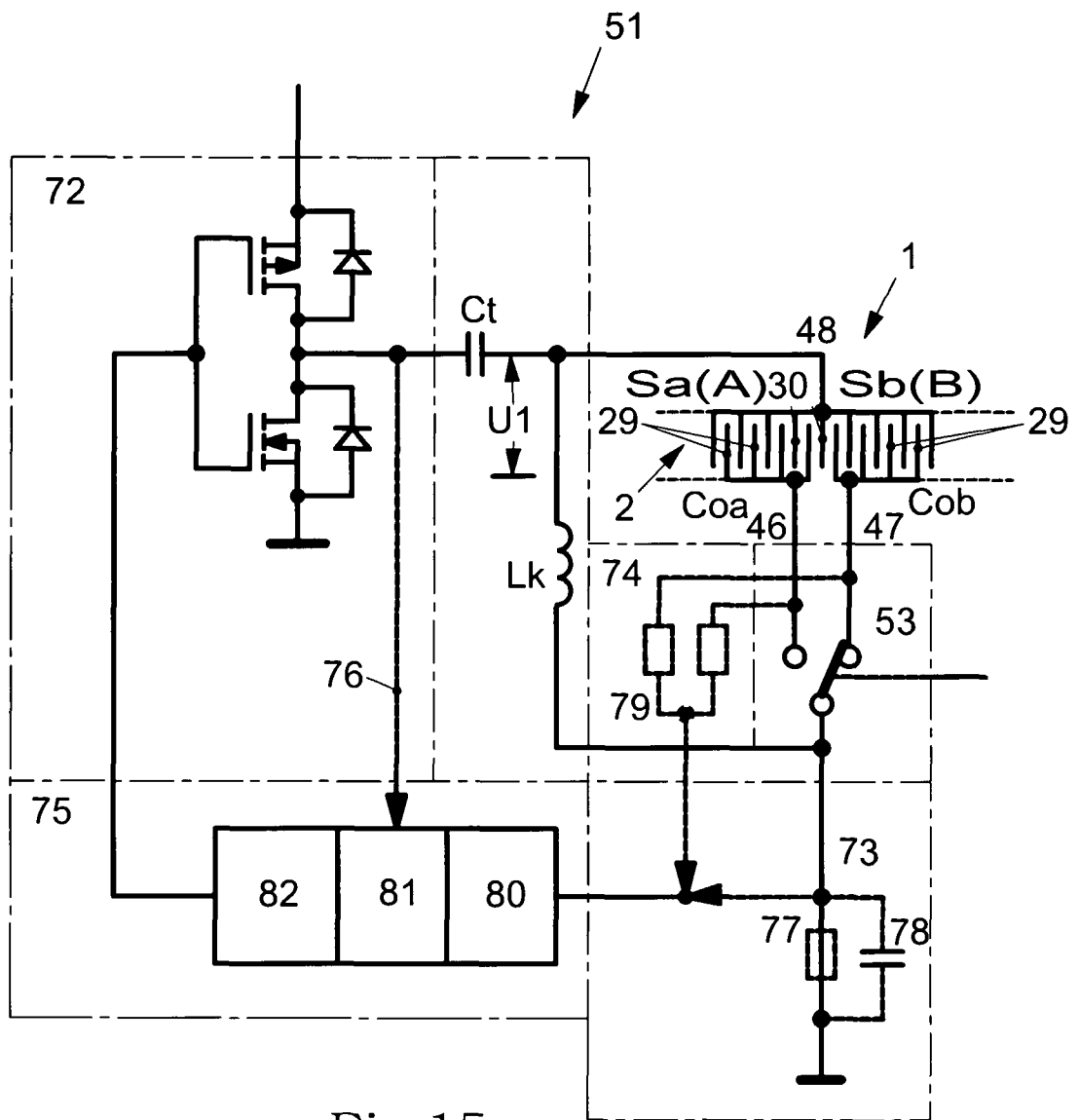
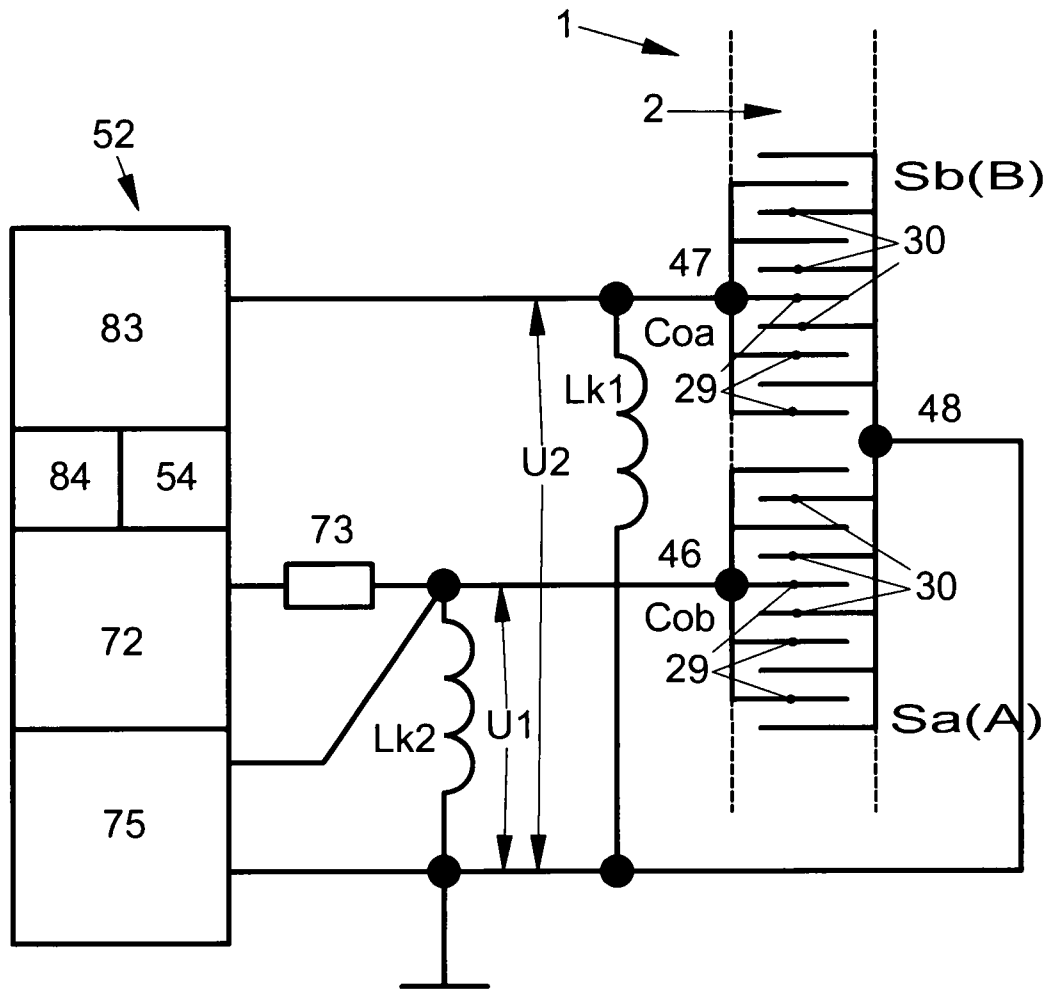
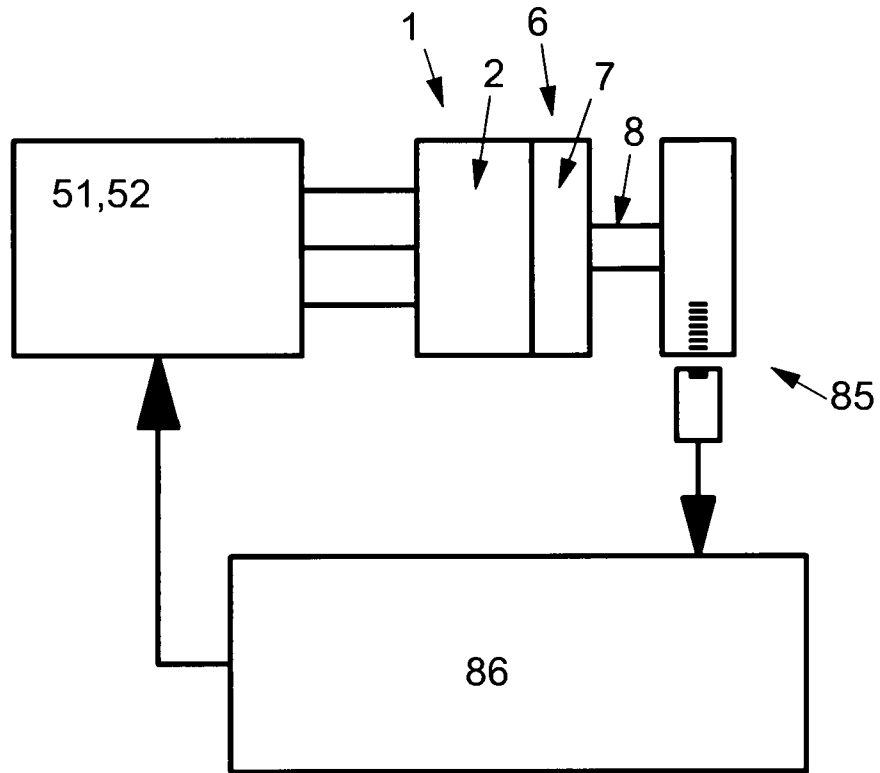


Fig.15



**Fig.16**



**Fig.17**

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No  
PCT/DE2014/200215

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER INV. H02N2/10 H02N2/00 H01L41/083 H02N2/14 ADD.		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) H01L H02N		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) EPO-Internal, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 7 218 031 B2 (VYSHNEVSKYY OLEKSIY [DE] ET AL) 15 May 2007 (2007-05-15) cited in the application claims 3-11; figures 1,16 -----	1-11
A	JP 2010 028955 A (NIPPON KOGAKU KK) 4 February 2010 (2010-02-04) paragraphs [0003], [0028], [0031] - [0034]; figures 1,3,5A-5D -----	1
A	EP 0 536 832 A1 (PHILIPS PATENTVERWALTUNG [DE]; PHILIPS NV [NL]) 14 April 1993 (1993-04-14) page 5, lines 11-36; figure 6 -----	1
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents :		
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention	
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone	
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art	
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	"&" document member of the same patent family	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed		
Date of the actual completion of the international search  12 September 2014	Date of mailing of the international search report  24/09/2014	
Name and mailing address of the ISA/ European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Authorized officer  Meul, Hans	

# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/DE2014/200215

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 7218031	B2	15-05-2007	AT 363148 T
			AU 2003294832 A1
			CN 1736019 A
			DE 10314810 A1
			EP 1581992 A2
			JP 4435695 B2
			JP 2006513683 A
			US 2006145572 A1
			WO 2004064170 A2
-----			
JP 2010028955	A	04-02-2010	NONE
-----			
EP 0536832	A1	14-04-1993	DE 4133108 A1
			EP 0536832 A1
			JP H05219764 A
-----			

# INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/DE2014/200215

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES  
 INV. H02N2/10 H02N2/00 H01L41/083 H02N2/14  
 ADD.

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

**B. RECHERCHIERTE GEBIETE**

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)  
 H01L H02N

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, WPI Data

**C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN**

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	US 7 218 031 B2 (VYSHNEVSKYY OLEKSIY [DE] ET AL) 15. Mai 2007 (2007-05-15) in der Anmeldung erwähnt Ansprüche 3-11; Abbildungen 1,16 -----	1-11
A	JP 2010 028955 A (NIPPON KOGAKU KK) 4. Februar 2010 (2010-02-04) Absätze [0003], [0028], [0031] - [0034]; Abbildungen 1,3,5A-5D -----	1
A	EP 0 536 832 A1 (PHILIPS PATENTVERWALTUNG [DE]; PHILIPS NV [NL]) 14. April 1993 (1993-04-14) Seite 5, Zeilen 11-36; Abbildung 6 -----	1

Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen  Siehe Anhang Patentfamilie

\* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche	Absenddatum des internationalen Recherchenberichts
12. September 2014	24/09/2014

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Bevollmächtigter Bediensteter  Meul, Hans
--	---

**INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT**

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/DE2014/200215

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung	
US 7218031	B2	15-05-2007	AT 363148 T	15-06-2007
			AU 2003294832 A1	10-08-2004
			CN 1736019 A	15-02-2006
			DE 10314810 A1	05-08-2004
			EP 1581992 A2	05-10-2005
			JP 4435695 B2	24-03-2010
			JP 2006513683 A	20-04-2006
			US 2006145572 A1	06-07-2006
			WO 2004064170 A2	29-07-2004
-----				
JP 2010028955	A	04-02-2010	KEINE	
-----				
EP 0536832	A1	14-04-1993	DE 4133108 A1	08-04-1993
			EP 0536832 A1	14-04-1993
			JP H05219764 A	27-08-1993
-----				