



(10) **DE 10 2020 114 219 A1** 2021.12.02

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2020 114 219.6**

(22) Anmeldetag: **27.05.2020**

(43) Offenlegungstag: **02.12.2021**

(51) Int Cl.: **H02N 2/08** (2006.01)

H02N 2/16 (2006.01)

H01L 41/09 (2006.01)

H01L 41/187 (2006.01)

(71) Anmelder:
**Physik Instrumente (PI) GmbH & Co KG, 76228
Karlsruhe, DE**

(72) Erfinder:
Wischnewski, Alexej, Dr., 76744 Wörth, DE

(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	10 2013 105 024	B3
DE	10 2019 118 198	B3
DE	10 2004 044 184	A1
DE	10 2005 039 358	A1

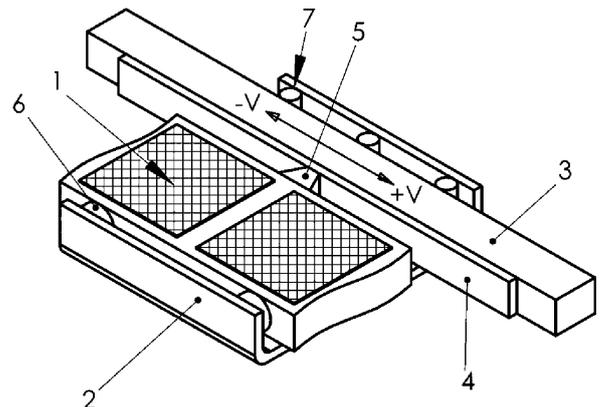
DE	10 2008 012 992	A1
DE	10 2008 026 429	A1
DE	10 2012 105 189	A1
DE	10 2012 211 345	A1
EP	1 747 594	B1
EP	2 537 195	B1
EP	2 867 183	B1
EP	2 930 841	B1
JP	2005- 82 422	A

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Ultraschallaktor**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft einen Aktor aus einem piezoelektrischen Material mit zumindest an dessen Außenflächen oder in dessen Innerem angeordneten Elektroden, die zwei Generatoren akustischer Wellen bilden, und mit mindestens einem an dem Aktor angeordneten Friktionselement oder einer an dem Aktor angeordneten Friktionsfläche, wobei das Material des Aktors entweder hergestellt ist aus miteinander versinterten Körnern aus einem bleifreien, ferroelektrischen, oxidischen, keramischen System, welches beim Sintern eine polykristalline Perowskit-Struktur ausbildet, oder aus einem monokristallinen Material besteht, dessen spezifisches Gewicht 1,5 bis 2 mal kleiner ist als das spezifische Gewicht von piezoelektrischer Keramik auf Basis von Blei-Zirkonat-Titanat.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft einen piezoelektrischen Ultraschallaktor nach Anspruch 1.

[0002] Piezokeramische Ultraschallaktoren werden in der Regel aus bleihaltiger piezoelektrischer Keramik auf Basis von Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) hergestellt. Die Bleihaltigkeit der Piezokeramik stellt ein wesentliches Problem sowohl bei der Nutzung der Aktoren, als auch bei späterem Recycling von Anlagen dar. Blei ist ein Schwermetall und somit für den menschlichen Organismus gesundheitsschädlich. Es kann vom menschlichen Körper nicht abgebaut und besitzt eine kumulative Wirkung. Blei wird meist über die Nahrungskette aufgenommen, gelangt in den menschlichen Körper, reichert sich im Körper an und schädigt das Gehirn und innere Organe, und beeinträchtigt die Funktionsfähigkeit des Nervensystems. Daher werden weltweit Bestrebungen unternommen, den Einsatz Blei zu vermeiden. Forscher suchen derzeit intensiv nach alternativen bleifreien piezoelektrischen Keramiken mit Blei-Zirkonat-Titanat ähnlichen elektromechanischen Eigenschaften.

[0003] Aus den Druckschriften EP1747594B1, DE102008026429A1 sowie DE102013105024B3 beispielsweise sind piezoelektrische Ultraschallmotoren mit einem plattenförmigen oder hohlzylindrischen Aktor bekannt. Als Werkstoff wird bei diesen Motoren bleihaltige piezoelektrische Keramik auf PZT-Basis verwendet. Die akustischen Stehwellen werden hierbei unter Nutzung der d31-Ladungskonstante angeregt.

[0004] Bei den bekannten Ultraschallmotoren wird die mechanische Energie an dezidierten Stellen abgegriffen, an denen die Schwinggeschwindigkeit des Aktors maximal ist. An diesen Stellen sind Friktionselemente angeordnet, die über einen Friktionskontakt die Bewegung an ein anzutreibendes Element übertragen. Die Friktionselemente bestehen in der Regel aus einem anderen Material als der Ultraschallaktor aus folgendem Grund: im hochfrequenten Aktorbetrieb werden die Friktionselemente durch Verschleiß langsam abgetragen. Das dabei entstehende Abriebpulver würde die nähere Umgebung mit Blei kontaminieren, wenn die Friktionselemente aus einer Keramik auf Basis von PZT bestehen würden. Weiterer Abrieb bildet sich an den Stellen, an denen der Ultraschallaktor gehalten wird.

[0005] Die Aufgabe der Erfindung besteht demnach darin, einen Ultraschallaktor bereitzustellen, bei dem der im Betrieb zwangsläufig entstehende Abrieb kein Blei enthält, und der gleichzeitig eine Performance wie herkömmliche Ultraschallaktoren bietet.

[0006] Diese Aufgabe wird gelöst durch einen Ultraschallmotor gemäß Anspruch 1, wobei die sich daran

anschließenden Unteransprüche wenigstens zweckmäßige Weiterbildungen darstellen.

[0007] Der erfindungsgemäße Ultraschallaktor besteht demnach entweder aus einem piezokeramischen, bleifreien, ferroelektrischen, oxidischen Materialsystem, das in einer Perowskit-Struktur kristallisiert und beispielsweise aus Kalium-Natrium-Niobat, Bismuth-Natrium-Titanat, Kalium, Natrium, Bismuth, Titanaten oder Niobaten sowie deren Kombinationen, oder aus einem piezoelektrischen Einkristall bzw. Monokristall orthorhombischer, trigonaler, tetragonaler, kubischer, rhombischer oder hexagonaler Kristallsymmetrie, dessen spezifisches Gewicht 1,5 bis 2 mal kleiner als das spezifische Gewicht von piezoelektrischer Keramik auf Blei-Zirkonat-Titanat-Basis, besteht. Der während des Betriebs des Ultraschallaktors entstehende Abrieb ist dadurch weit weniger gefährlich als bei Ultraschallaktoren aus einem bleihaltigen Werkstoff und daher für viele Anwendungen zulässig.

[0008] Vorteilhafterweise bestehen der Ultraschallaktor und das an diesem angeordnete Friktionselement bzw. die an diesem angeordneten Friktionselemente aus dem gleichen Werkstoff, so dass der üblicherweise verwendete Fertigungsprozess des Klebens zur Verbindung des/der Friktionselemente/Friktionselemente an dem Ultraschallaktors entfallen kann. Dies verringert den Fertigungsaufwand und erhöhte gleichzeitig die Zuverlässigkeit des Ultraschallaktors. Ein besonderer Vorteil ergibt sich in diesem Zusammenhang durch die Verwendung von bleifreien piezoelektrischen Monokristallen aufgrund deren hoher Härte und den sich daraus ergebenden vorteilhaften Verschleißigenschaften.

[0009] Ein weiterer Vorteil insbesondere von bleifreien piezoelektrischen Monokristallen liegt darin, dass diese nicht hydrophob sind. Spannungsdurchbrüche in dem entsprechenden Ultraschallaktor aufgrund von aus der Umgebungsluft absorbiertem Wasser sind damit weitestgehend unterbunden bzw. vollständig ausgeschlossen, so dass sich eine höhere Lebensdauer und Zuverlässigkeit ergibt.

[0010] Zudem ist es nicht notwendig, bleifreie piezoelektrische Monokristalle zu polarisieren, wie dies bei anderen piezoelektrischen Materialien der Fall ist. Dadurch entfallen aufwändige und kostenintensive Fertigungsschritte.

[0011] Ferner neigen bleifreie piezoelektrische Monokristalle erst bei sehr viel höheren Temperaturen zur Depolarisation, wobei die entsprechende Temperatur als Curietemperatur bezeichnet wird. Diese beträgt etwa bei Lithiumniobat 1145°C, während sie bei herkömmlichen ferroelektrisch harten Piezokeramiken bei etwa 300°C liegt.

[0012] Darüber hinaus fehlt bei bleifreien piezoelektrischen Monokristallen die sonst bei Piezokeramiken übliche Hysterese; stattdessen verhalten sie sich weitestgehend linear, weshalb aufwendige elektronische Maßnahmen zur Linearisierung der Wegkennlinien entfallen.

[0013] Bleifreie piezoelektrische Monokristalle werden insbesondere für optische Anwendungen in hohen Mengen hergestellt und sind somit kostengünstig und in unterschiedlich orientierten Schnitten verfügbar.

[0014] Bleifreie piezoelektrische Werkstoffe haben weiterhin eine um den Faktor **2** geringere Dichte als Piezokeramik auf PZT-Basis, woraus höhere Schwing- bzw. Resonanzfrequenzen resultieren und sich ein verbessertes Ansprechverhalten der Aktoren ergibt, so dass Positioniersysteme mit solchen Aktoren schneller sind bzw. eine größere Dynamik aufweisen.

[0015] **Fig. 1** zeigt einen Ultraschallmotor mit einem erfindungsgemäßen Ultraschallaktor. Der Motor umfasst einen in einem Gehäuse **2** angeordneten piezoelektrischen Aktor **1** sowie ein anzutreibendes Element **3** in Form eines Stabs mit einer an diesem befestigten Friktionsleiste **4**. Ein an dem Aktor **1** angeordnetes Friktionselement **5** ist mit Hilfe von Anpresselementen **6** elastisch gegen die Friktionsleiste **4** gepresst. Das anzutreibende Element **3** ist in dem Motorgehäuse **2** durch ein Lager **7** in Form von Rollen beweglich gelagert, so dass es sich in die durch den Doppelpfeil angedeuteten Richtungen bewegen kann.

[0016] **Fig. 2** zeigt in **Abb. 9** eine Draufsicht und in **Abb. 10** eine Ansicht von unten auf den Ultraschallaktor **1** gemäß **Fig. 1**. Der Aktor **1** (im Folgenden teilweise auch als Oszillator bezeichnet) ist als eine bleifreie piezoelektrische Platte **11** mit einer Länge L , einer Höhe H sowie einer Breite B ausgeführt und beinhaltet zwei Hauptflächen **12**, zwei lange Seitenflächen **13** und zwei Stirnflächen **14**. Die Platte **11** ist durch die Trennebene E_q in zwei gleiche Teile **15**, **16** geteilt und wird durch eine Längsebene E_l geschnitten.

[0017] Die Trennebene E_q verläuft durch die Mitte der Oszillatorlänge L und steht senkrecht auf den Hauptflächen **12** des Oszillators. Die Längsebene E_l verläuft durch die Mitte der Stirnflächen **14** und steht senkrecht auf den Hauptflächen **12** sowie der Querebene E_q . Die Spur **17** der Trennebene E_q ist auf dem Aktor **1** mit Hilfe einer Strichlinie gekennzeichnet. Die Schnittlinie der Ebene E_q mit der Ebene E_l bildet eine Symmetrieachse O . Ein Friktionselement **5** ist an den langen Seitenflächen **13** der bleifreien piezoelektrischen Platte **11** in der Mitte der Oszillatorlänge L angeordnet. Es ist jedoch denkbar, auch mehr als ein

Friktionselement **5** an einer der langen Seitenflächen **13** anzuordnen. Weiterhin ist denkbar, an beiden Seitenflächen **13** jeweils ein Friktionselement oder jeweils mehr als ein Friktionselement anzuordnen. Der Teil **15** des Aktors **1** umfasst einen unsymmetrischen Generator **18** unsymmetrischer akustischer Stehwellen oder statischer Deformationen. Der unsymmetrische Generator **18** wird durch die Erregerelektrode **19** sowie die gemeinsame Elektrode **20** gebildet, welche an den Hauptflächen **12** der polarisierten bleifreien piezoelektrischen Platte **11** angeordnet sind. Unter dem Begriff Hauptflächen **12** sind die Flächen des Aktors zu verstehen, an denen die Elektroden **19**, **20** der Generatoren akustischer Wellen oder statischer Deformation **18** angeordnet sind.

[0018] Die Polarisationsrichtung des bleifreien piezoelektrischen Materials der Platte **11** ist durch entsprechende Pfeile gekennzeichnet und verläuft senkrecht zu den Elektroden.

[0019] Die Unsymmetrie des Generators **18** ist durch seine unsymmetrische Lage in Bezug auf die Trennebene E_q bedingt sowie dadurch, dass bei seiner Anregung im Oszillator eine unsymmetrische zweidimensionale stehende Welle erzeugt wird. Die Welle kann erster, zweiter oder höherer Ordnung sein. Die Länge des Oszillators steht in folgender Beziehung mit der Höhe und der Ordnung der angeregten Welle: $L=K \cdot H \cdot n$. K ist dabei ein von der Breite bzw. vom Typ der Piezokeramik abhängiger Koeffizient; im vorliegenden Fall gilt: $K \approx 0,541$. n ist die Ordnung der Welle, wobei $n = 2, 3, 4, \dots$

[0020] Der Teil **16** des Oszillators **1** kann einen zweiten unabhängigen unsymmetrischen Generator **21** unsymmetrischer akustischer stehender Wellen und statischer Deformationen mit der Erregerelektrode **22** und der gemeinsamen Elektrode **20** beinhalten.

[0021] Die piezoelektrische Platte **11** ist aus einem piezoelektrischen Werkstoff auf Basis mindestens eines bleifreien, ferroelektrischen, oxidischen Materialsystems gefertigt, das in einer Perowskit-Struktur kristallisiert, beispielsweise aus Kalium-Natrium-Niobat, Bismuth-Natrium-Titanat-Basis, Kalium, Natrium, Bismuth, aus Titanaten oder Niobaten sowie deren Kombinationen.

[0022] Die piezoelektrische Platte kann auch aus einem piezoelektrischen Monokristall mit einer polaren Achse Z (X_3) sowie zwei elektrischen Achsen X_1 , X_2 hergestellt sein. Die Orientierung der Platte ist dabei so gewählt, dass die polare Kristallachse Z (X_3) parallel zu der Symmetrieachse O der Platte (senkrecht zu den Hauptflächen) und eine der elektrischen Kristallachsen X_1 , X_2 parallel zu der Querebene E_q oder zu der Querebene E_l verläuft (Z -cut). Hierfür mögliche Einkristalle haben eine orthorhombische, trigonale, tetragonale, kubische, rhombische oder hexo-

gonale Kristallsymmetrie, worunter etwa Quarz, Lithiumniobat, Lithiumtantalat oder Langatit fallen. Diese sind nach dem Chochralski-Verfahren gezüchtet.

[0023] Fig. 3 zeigt in Darstellung 24 eine piezoelektrische Aktorplatte 11 eines erfindungsgemäßen Ultraschallaktors in mehrschichtiger bzw. in Multilayer-Bauweise. Die piezoelektrische Platte 11 hat im Inneren eine Mehrschichtstruktur, die aus parallelen Schichten von Erregerelektroden 19 gebildet ist, die sich mit parallelen Schichten gemeinsamer Elektroden 20 und den jeweils zwischen ihnen angeordneten Schichten bleifreier polarisierter Piezokeramik 23 abwechseln, wobei die Polarisationsrichtung der Schichten bleifreier polarisierter Piezokeramik 23 senkrecht zu den Elektroden 19 und 20 verläuft, wie in Fig. 4 in den Abb. 38 und Abb. 39 gezeigt. Die Polarisationsrichtung fällt mit der der Polarisationsachse der piezoelektrischen Platte 11 zusammen, siehe punktierte Linie 27 in Fig. 3.

[0024] Alle Erregerelektroden 19 sind in zwei miteinander nicht verbundene Gruppen von Elektroden 28 und 29 aufgeteilt, die zueinander symmetrisch bezüglich der Trennebene E_q angeordnet sind. Die gestrichelte Linie 17 in Fig. 3 verdeutlicht die Schnittlinie der Fläche E_q mit den Hauptflächen 12 und 13. Jede der Linien bildet die Mittellinie der entsprechenden Fläche.

[0025] Die Erregerelektrodengruppen 28 und 29 bilden zusammen mit Teilen der gemeinsamen Elektroden 19 und den zwischen ihnen angeordneten Piezokeramikschichten 23 die Mehrschichtgeneratoren 30 und 31 akustischer Stehwellen für den dynamischen Betrieb (Ultraschallbetrieb) sowie statischer Deformationen für den statischen Betrieb. Jeder Generator 30 oder 31 ist asymmetrisch zur Trennebene E_q angeordnet.

[0026] Die piezokeramische Mehrschichtplatte 11 kann in herkömmlicher Multilayertechnologie gefertigt sein. Dabei wird zunächst ein dünnes Band aus niedrigtemperiertem piezoelektrischem Rohmaterial hergestellt, in dem die Teilchen untereinander mit einem organischen Binder gebunden sind. Danach werden aus dem Band Platten ausgeschnitten. Sodann werden die Elektroden aus palladiumhaltiger Paste aufgetragen. Anschließend werden die Platten als kompakter Block zur Platte 11 zusammengesprengt und im Ofen gebrannt. Beim Brennen verflüchtigt sich das organische Bindemittel aus der Piezokeramik, die Piezokeramik wird gesintert und aus der palladiumhaltigen Paste bilden sich die Metallelektroden. Bei dieser Technologie beträgt die übliche Dicke jeder einzelnen Piezokeramikschicht 30 bis 100 Mikrometer.

[0027] Die gemeinsamen Elektroden 20 können aus zwei gleichen Teilen 32 und 33 bestehen, welche die

Konfiguration der Erregerelektroden 19 wiederholen (siehe Abb. 26 von Fig. 3).

[0028] Jede der Elektroden 19, 20 oder jeder Teil der Elektroden 32, 33 weist einen stromleitenden Ansatz 37 auf, der elektrisch mit stromleitenden Anschlusselektroden 34, 35 und 36 verbunden ist.

[0029] Die Elektroden können beispielsweise mittels Ionenerstäubung, durch Siebdruck oder durch Einbrennen auf die Sinteroberfläche der Platte 11 aufgebracht sein. Hierfür übliche Materialien sind Chrom, Kupfer, Nickel oder Silber.

[0030] Gemäß Fig. 3 sind die Elektroden 19 und 20 parallel zu den Hauptflächen 12 der Platte 11 angeordnet. Jedoch können die Erregerelektroden 19 und die gemeinsamen Elektroden 20 auch parallel zu den Stirnflächen 14 der Platte 11 angeordnet sein (siehe Fig. 5). Zudem können die Elektroden 19 und 20 parallel zu den langen Seitenflächen 13 der Platte 11 angeordnet sein (siehe Fig. 6).

[0031] Gemäß Fig. 3 sind die Anschlusselektroden 34, 35, 36 auf einer der langen Seitenflächen 13 der Platte 11 angeordnet. Sie können jedoch auch auf beiden Seitenflächen angeordnet sein. Die Anschlusselektroden 34, 35, und 36 können zudem auf einer der Hauptflächen 12 oder auf beiden Hauptflächen 12 der Platte 11 (siehe Fig. 5) angeordnet sein. Die Anschlusselektroden 34, 35, 36 können zudem auf den Stirnflächen 14 der Platte 11 (siehe Fig. 6) angebracht sein.

[0032] Fig. 4 verdeutlicht mit den Abb. 38 und Abb. 39 die möglichen Anordnungen der Polarisationsrichtungen innerhalb der Piezokeramikschichten 23 bei einer mehrschichtigen piezoelektrischen Platte 11 gemäß Fig. 3.

[0033] Fig. 5 zeigt in Abb. 40 eine andere Ausführungsform einer mehrschichtigen bleifreien piezoelektrischen Aktorplatte 11. Die piezoelektrische Platte 11 hat im Inneren eine Mehrschichtstruktur, die aus parallelen Schichten von Erregerelektroden 19 gebildet ist, die sich mit den parallelen Schichten der gemeinsamen Elektroden 20 (siehe insbesondere Abb. 41 von Fig. 5) und den zwischen ihnen angeordneten Schichten bleifreier polarisierter Piezokeramik 23 abwechseln, wobei die Piezokeramikschichten 23 parallel zu der Querebene E_q , parallel zu den Stirnflächen 14 und senkrecht zu den langen Seitenflächen 13 angeordnet sind. Der Polarisationsvektor verläuft senkrecht zu den Elektrodenflächen 19 und 20 (siehe Pfeile in den Abb. 38 und Abb. 39 von Fig. 4).

[0034] Fig. 6 zeigt gemäß Abb. 42 eine weitere Ausführungsform einer mehrschichtigen bleifreien piezoelektrischen Aktorplatte 11. Die piezoelektrische

Platte **11** hat im Inneren eine Mehrschichtstruktur, die aus parallelen Schichten von Erregerelektroden **19** gebildet ist, die sich mit den parallelen Schichten der gemeinsamen Elektroden **20** (siehe **Abb. 43** von **Fig. 6**) und den zwischen ihnen angeordneten Schichten bleifreier polarisierter Piezokeramik **23** abwechseln, wobei die Piezokeramikschichten **23** senkrecht zu der Querebene E_q , senkrecht zu den Stirnflächen **14** und parallel zu den langen Seitenflächen **13** angeordnet sind. Der Polarisationsvektor verläuft senkrecht zu den Elektrodenflächen **19** und **20**, siehe Pfeile in den **Abb. 38** und **Abb. 39** von **Fig. 4**).

[0035] **Fig. 7** zeigt in **Abb. 44** einen erfindungsgemäßen Aktor, bei dem ein Friktionselement **5** auf einer der langen Seitenflächen **13** angeordnet ist, während beim erfindungsgemäßen Aktor nach **Abb. 45** auf jeder der langen Seitenflächen **13** jeweils ein Friktionselement **5** angeordnet ist.

[0036] Das Friktionselement besteht bzw. die Friktionselemente bestehen aus einem harten, verschleißfesten Material, wie beispielsweise Aluminiumoxid (Al_2O_3), Zirkonoxid (ZrO_2), Siliziumnitrid (Si_3N_4), Siliziumcarbid (SiC), Bornitrid (BN), Borcarbid (B_4C), Wolframcarbid (WC) oder Titancarbid (TiC).

[0037] **Fig. 8** veranschaulicht in **Abb. 46** das FEM-Modell eines erfindungsgemäßen Aktors **1** in Multilayer-Bauweise mit zwei Generatoren **30** und **31** in einem Zustand, bei dem keine statischen elektrischen Spannungen an dem Aktor anliegen. Alle Bereiche zwischen den Elektroden **19** und **20** der Mehrschichtgeneratoren **30**, **31** sind nicht verformt, untereinander gleich und gleich k , und das Friktionselement **5** ist - bezogen auf die Ebene E_q - symmetrisch in seiner mittleren Position angeordnet.

[0038] In **Abb. 47** von **Fig. 8** sind abweichend zu **Abb. 46** an den Generatoren **30** und **31** statische elektrische Spannungen angelegt, wobei die an den Generator **30** angelegte Spannung E_1 gleich $-E$ ist, während die an den Generator **31** angelegte Spannung E_2 gleich $+E$ ist.

[0039] Alle Bereiche zwischen den Elektroden **19** und **20** der Generatoren **30** sind zusammengedrückt und gleich $k-x$, wobei x der Größenwert für die elementare Kompression ist. Hingegen sind die Bereiche zwischen den Elektroden **19** und **20** der Generatoren **31** gedehnt und gleich $k+x$, wobei x der Größenwert für die elementare Dehnung ist.

[0040] In **Abb. 48** von **Fig. 8** sind abweichend zu **Abb. 47** an den Generatoren **30** und **31** statische elektrische Spannungen angelegt, wobei die an den Generator **30** angelegte Spannung E_1 gleich $+E$ ist, während die an den Generator **31** angelegte Spannung E_2 gleich $-E$ ist.

[0041] Die Bereiche zwischen den Elektroden **19** und **20** der Generatoren **30** sind gedehnt und gleich $k+x$. Alle Abstände zwischen den Elektroden **19** und **20** der Generatoren **31** sind komprimiert und gleich $k-x$.

[0042] **Fig. 9** zeigt in **Abb. 52** einen erfindungsgemäßen Aktor **1** mit zwei Mehrschichtgeneratoren **30** und **31** in einem Zustand, bei der die statischen Spannungen E_1 und E_2 Null sind. In diesem Fall sind alle Bereiche zwischen den Elektroden **19** und **20** der Generatoren **30**, **31** unverformt, untereinander gleich und gleich k , und das Friktionselement **5** ist - bezogen auf die Trennebene E_q - symmetrisch in seiner mittleren Position angeordnet.

[0043] **Abb. 53** von **Fig. 9** zeigt demgegenüber den Aktor **1** mit zwei Generatoren **30** und **31** in einem Zustand, bei der die statische Spannung E_1 - anliegend an Generator **30** - gleich $-E$ und die statische Spannung E_2 - anliegend an Generator **31** - gleich $+E$ ist.

[0044] Die Bereiche zwischen den Elektroden **19** und **20** der Generatoren **30** sind zusammengedrückt und gleich $k-x$, wobei x der Größenwert für die elementare Kompression ist. Alle Bereiche zwischen den Elektroden **19** und **20** der Generatoren **31** sind gedehnt und gleich $k+x$, wobei x der Größenwert für die elementare Dehnung ist.

[0045] Das Friktionselement **5** ist - bezogen auf die Ebene E_q - nach links um den Betrag $x=nx$ verschoben, wobei n die Zahl der Abstände zwischen den Elektroden **19** und **20** des Generators **30** ist.

[0046] **Abb. 54** von **Fig. 9** schließlich zeigt den Aktor **1** mit zwei Generatoren **30** und **31** in einer Position, bei der die statische Spannung E_1 gleich $+E$ und die statische Spannung E_2 gleich $-E$ ist. In diesem Fall sind alle Bereiche zwischen den Elektroden **19** und **20** der Generatoren gedehnt und gleich $k+x$. Die Abstände zwischen den Elektroden **19** und **20** der Generatoren **31** sind komprimiert und gleich $k-x$.

[0047] Das Friktionselement **5** ist - bezogen auf die Ebene E_q - nach rechts um den Betrag $x=nx$ verschoben, wobei n die Zahl der Abstände zwischen den Elektroden **19** und **20** des Generators **31** ist.

[0048] In allen Fällen erfolgt das Dehnen und Komprimieren der Piezokeramik zwischen den Elektroden **19** und **20** auf Grund des umgekehrten Piezoeffekts, wobei die Größe der elementaren Dehnung oder der elementaren Kompression durch die piezoelektrische Ladungskonstante d_{33} bestimmt wird.

[0049] **Fig. 10** verdeutlicht in den **Abb. 54** und **Abb. 55** eine mögliche Ausführungsform von Generatoren **60**, **61** für akustische Stehwellen und statische Dreh-Längsdeformationen bei einem erfin-

dungsgemäßen Ultraschallaktor mit auf den Hauptflächen angeordneten streifenförmigen Elektroden. Hierbei zeigt **Abb. 54** der **Fig. 10** die Vorderansicht und **Abb. 55** der **Fig. 10** die Rückansicht des Aktors.

[0050] Die Generatoren der akustischen Stehwellen und der statischen Drehdeformationen **60** und **61** des Aktors **1** bestehen aus abwechselnd angeordneten streifenförmigen Erregerelektroden **62** und streifenförmigen gemeinsamen Elektroden **63**, angeordnet auf den Hauptflächen **12** der Platte **11** und der zwischen ihnen angeordneten Piezokeramik.

[0051] Die Pfeile mit dem Index p geben die Polarisationsrichtungen der Piezokeramik zwischen den Elektroden **62** und **63** an. Die Generatoren **60**, **61** weisen unterschiedliche Polarisationsrichtungen für die Keramik zwischen den Elektroden **62** und **63** auf, wobei die Polarisationsrichtungen senkrecht zu den streifenförmigen Elektroden verlaufen.

[0052] Bei diesen Konstruktionen der Generatoren verlaufen die streifenförmigen Elektroden **62**, **63** parallel zueinander, senkrecht zur Ebene E_q , senkrecht zu den Stirnflächen **14** und parallel zu den langen Seitenflächen **13**. Die streifenförmigen Erregerelektroden **62** des Generators **60** haben den Anschluss **34**. Die streifenförmigen Erregerelektroden **63** des Generators **61** haben den Anschluss **35**. Die gemeinsamen streifenförmigen Elektroden **63** der Generatoren **60** und **61** haben den Anschluss **36**.

[0053] Die **Abb. 56** und **Abb. 57** von **Fig. 10** verdeutlichen eine weitere mögliche Ausführungsform von Generatoren **60**, **61** für akustische Stehwellen und statische Dreh-Längsdeformationen bei einem erfindungsgemäßen Ultraschallaktor mit auf den Hauptflächen angeordneten streifenförmigen Elektroden, wobei **Abb. 56** die Vorderansicht auf den Aktor **1** und **Abb. 57** die Rückansicht auf den Aktor **1** zeigt.

[0054] Bei derart ausgeführten Generatoren verlaufen die streifenförmigen Elektroden **62**, **63** ebenfalls parallel zueinander, jedoch parallel zur Ebene E_q , parallel zu den Stirnflächen **14** und senkrecht zu den langen Seitenflächen **13**.

[0055] Die **Abb. 58** und **Abb. 59** von **Fig. 10** verdeutlichen eine weitere mögliche Ausführungsform von Generatoren **60**, **61** für akustische Stehwellen und statische Dreh-Längsdeformationen bei einem erfindungsgemäßen Ultraschallaktor mit auf den Hauptflächen angeordneten streifenförmigen Elektroden. Hierbei zeigt die **Abb. 58** die Vorderansicht auf den Aktor **1**, während **Abb. 59** die Rückansicht auf den Aktor **1** zeigt.

[0056] Bei dieser Ausführungsform der Generatoren verlaufen die streifenförmigen Elektroden **62**, **63** parallel zueinander und unter einem Winkel α und $-\alpha$ ge-

neigt zur Querebene S . Vorteilhaft liegt der Neigungswinkel α im Bereich von 0 bis 45° .

[0057] Weiterhin können die streifenförmige Elektroden **62**, **63** eine gemischte Struktur in ihrer Lage aufweisen, bei der Teile oder Teilbereiche der Elektroden parallel, senkrecht oder unter einem Winkel zu der Ebene E_q verlaufen.

[0058] Die Generatoren **60**, **61** des Aktors **1** weisen im Folgenden aufgeführte konstruktive Besonderheiten auf.

[0059] Der Abstand k (siehe **Fig. 10**) zwischen den benachbarten streifenförmigen Erregerelektroden **62** und den gemeinsamen streifenförmigen Erregerelektroden **63** kann gleich oder kleiner als die halbe Dicke D der piezoelektrischen Platte **11** sein. Die Breite m (siehe **Fig. 10**) der streifenförmigen Erregerelektroden **62** kann sich im Bereich von $0,1$ bis 1 mm bewegen. Die streifenförmigen Elektroden **62**, **63** können auf die Hauptfläche **12** der Platte **11** beispielsweise mittels chemischer Abscheidung von Nickel oder durch thermisches Auftragen von Chrom, Kupfer oder Nickel im Vakuum oder durch Ionen-Plasmasputtern von Chrom, Kupfer, Nickel, Gold aufgebracht werden.

[0060] Die Struktur der streifenförmigen Elektroden **61**, **62** kann durch Laserfräsen, durch chemisch-lithografisches Ätzen, im Sprühverfahren über eine Maske oder durch andere gängige Verfahren erzeugt werden. Die Anzahl streifenförmiger Elektroden **61**, **62** auf den Hauptflächen **12** wird nur durch die technologischen Herstellungsmöglichkeiten begrenzt.

[0061] Bei derart ausgeführten Generatoren **60**, **61** mit flächenförmigen Erreger- und gemeinsamen Elektroden **62**, **63** wird zur Erregung akustischer Stehwellen die piezoelektrische Ladungskonstante d_{33} genutzt.

[0062] **Fig. 11** zeigt eine mögliche Ausführungsform für eine piezoelektrische Platte **65** des erfindungsgemäßen Aktors. Die bleifreie piezoelektrische Platte **65** wird durch eine Längs-Trennebene E_l und einer senkrecht dazu angeordneten Quer-Trennebene E_q geteilt. Die Platte **65** weist zwei sich gegenüberliegende, im Wesentlichen parallel zueinander angeordnete Hauptflächen **12** auf, die senkrecht zu den Trennebenen E_l und E_q angeordnet sind. Die sich gegenüberliegenden Hauptflächen **12** sind über acht Seitenflächen miteinander verbunden, wobei zwei der Seitenflächen Arbeitsflächen **66** darstellen, zwei der Seitenflächen Halteflächen **67** und die übrigen vier Seitenflächen freie Flächen **68** sind. Bezogen auf die Ebene E_t , die sowohl senkrecht zur Trennebene E_l , als auch senkrecht zur Trennebene E_q angeordnet ist und die mit einer der Hauptflächen **12** zusammenfällt oder sich zwischen diesen befinden kann, hat die Querschnittsfläche der piezoelektrischen Platte eine

achteckige Form (siehe insbesondere **Abb. 69** von **Fig. 11**).

[0063] Die Trennebenen E_q und E_l teilen die entsprechenden gegenüberliegenden Arbeitsflächen **66** und Halteflächen **68** in zwei gleiche Teile. Die Schnittgerade der Trennebene E_q mit der Trennebene E_l bildet die Symmetrieachse O.

[0064] Die Arbeitsflächen **66** sind im Wesentlichen parallel zur Trennebene E_l, die Halteflächen **67** im Wesentlichen parallel zur Trennebene E_q und die freien Flächen **68** unter dem gleichen Winkel α zur Trennebene S_l und unter dem gleichen Winkel φ zur Trennebene S_q angeordnet.

[0065] Die piezoelektrische Platte **65** hat die Höhe H, die dem Abstand der beiden Arbeitsflächen **66** entspricht, und die Länge L, die dem Abstand der beiden Halteflächen **67** entspricht. Die Breite der Arbeitsflächen **66** ist gleich n, und die Breite der Halteflächen **67** ist gleich m. Darüber hinaus hat die piezoelektrische Platte **65** die Dicke t. Beim erfindungsgemäßen Ultraschallaktor liegt das Verhältnis der Länge L zur Höhe H im Bereich von 1,5 bis 3. Optimal ist es, wenn das Verhältnis L/H in etwa gleich 1,6 ist.

[0066] Die piezoelektrische Platte **65** umfasst zwei Generatoren **18** und **21** zur Erzeugung von akustischen Stehwellen und/oder statischen Deformationen, die symmetrisch zur Trennebene E_q und symmetrisch bezogen auf die Symmetrieachse O angeordnet sind. Jeder der Generatoren **18** und **21** befindet sich in Asymmetrie bezogen auf die Trennebene E_l. Zum Anschluss einer elektrischen Erregervorrichtung besitzen die Generatoren **18** und **21** Anschluss Elektroden **34**, **35**, **36**. Diese können an der Haltefläche **67** des Aktors angeordnet sein.

[0067] **Fig. 12** zeigt eine weitere Ausführungsform für eine piezoelektrische Platte **71** des erfindungsgemäßen Aktors. Die bleifreie piezoelektrische Platte **71** wird durch eine Längs-Trennebene E_l und eine unter einem Winkel ϑ zu ihr angeordneten Quer-Trennebene E_q geteilt. Die piezoelektrische Platte **11** weist zwei sich gegenüberliegende, im Wesentlichen parallel zueinander liegende Hauptflächen **12** auf, die senkrecht zu den Trennebenen E_l und E_q angeordnet sind. Die sich gegenüberliegenden Hauptflächen **12** sind über acht Seitenflächen miteinander verbunden, wobei zwei Seitenflächen Arbeitsflächen **66** darstellen, zwei Seiten Halteflächen **67** und die übrigen vier Seitenflächen freie Flächen **68** sind. Bezogen auf die Ebene E_t, die sowohl senkrecht zur Trennebene E_l, als auch senkrecht zur Trennebene E_q angeordnet ist und die mit einer der Hauptflächen **12** zusammenfällt oder sich zwischen diesen befinden kann, hat die Querschnittsfläche der piezoelektrischen Platte eine achteckige Form (siehe insbesondere **Abb. 70** von **Fig. 12**).

[0068] Die Trennebenen E_q und E_l teilen die entsprechenden gegenüberliegenden Arbeitsflächen **66** und die Halteflächen **67** in zwei gleiche Teile. Die Schnittgerade der Trennebene E_q mit der Trennebene E_l bildet die Symmetrieachse O. Die Schnittpunkte der Achse O mit den Hauptflächen **12** bilden Massenmittelpunkt der Platte **11**.

[0069] Die Arbeitsflächen **66** sind im Wesentlichen parallel zur Trennebene E_l, die Halteflächen **67** in einem Winkel α und β zur Trennebene E_l und die freien Flächen **68** unter einem Winkel φ und ψ zur Trennebene S_q angeordnet.

[0070] Die piezoelektrische Platte **71** hat die Höhe H, die dem Abstand der beiden Arbeitsflächen **66** entspricht, und die Länge L, die dem Abstand der beiden Halteflächen **67** entspricht. Die Breite der Arbeitsflächen **66** ist gleich n, und die Breite der Halteflächen **67** ist gleich m. Darüber hinaus hat die piezoelektrische Platte **71** die Dicke t. Beim erfindungsgemäßen Ultraschallaktor liegt das Verhältnis der Länge L zur Höhe H im Bereich von 1,5 bis 3. Optimal ist es, wenn das Verhältnis L/H in etwa gleich 1,6 ist.

[0071] Die piezoelektrische Platte **71** umfasst zwei unsymmetrische Generatoren **18** und **21** zur Erzeugung von akustischen Stehwellen und/oder statischen Deformationen. Die Generatoren sind gegeneinander symmetrisch bezogen auf die Symmetrieachse O angeordnet. Jeder der Generatoren **18** und **21** befindet sich gegeneinander in Asymmetrie bezogen auf die Trennebene E_q und E_l. Zum Anschluss einer elektrischen Erregervorrichtung besitzen die Generatoren **18** und **21** Anschlusselektroden **34**, **35**, **36**. Diese können beispielsweise an den Halteflächen **67** des Aktors angeordnet sein.

[0072] Die piezoelektrische Platte **71** der Ausführungsformen gemäß den **Fig. 11** und **Fig. 12** ist erfindungsgemäß ebenfalls aus einem piezoelektrischen Werkstoff auf Basis von mindestens einem bleifreien, ferroelektrischen, oxidischen Materialsystem gefertigt, das in einer Perowskit-Struktur kristallisiert beispielsweise Kalium-Natrium-Niobat, Bismuth-Natrium-Titanat-Basis, Kalium, Natrium, Bismuth, Titanaten, Niobaten sowie ihrer Kombinationen oder ähnlichen bleifreien Werkstoffzusammensetzungen, wobei der piezoelektrische Werkstoff senkrecht zu den Elektroden polarisiert ist.

[0073] Die piezoelektrische Platte gemäß den **Fig. 11** und **Fig. 12** kann auch aus einem piezoelektrischen Monokristall mit einer polaren Achse Z (X₃) sowie zwei elektrischen Achsen X₁, X₂ hergestellt sein. Die Orientierung der Platte ist dabei so gewählt, dass die polare Kristallachse Z (X₃) parallel zu der Symmetrieachse O der Platte (senkrecht zu den Hauptflächen) und eine der elektrischen Kristallachsen X₁, X₂ parallel zu der Querebene E_q oder zu der Querebene

El verläuft (Z-cut). Zu den möglichen Einkristallen der piezoelektrische Platte gehören beispielsweise Kristalle orthorhombischer, trigonaler, tetragonaler, kubischer, rhombischer oder hexogonaler Kristallsymmetrie. Darunter fallen beispielsweise Quarz, Lithiumniobat, Lithiumtantalat, Langat sowie andere monokristalline Materialien, welche nach dem Chochralski-Verfahren gezüchtet werden.

[0074] Fig. 13 zeigt einen Ultraschallmotor mit einem erfindungsgemäßen piezoelektrischen Aktor gemäß Fig. 11. Bei diesem Motor sind zwei Läufer 72 mit Hilfe der Feder 73 an die gegenüberliegenden Friktionselemente 5 des Aktors 1 gepresst. Der Aktor selbst wird hierbei an eine Leiterplatte 74 mittels eines Federbügels 75 angepresst. Der Federbügel 75 dient als Halter des Aktors 1 und kann gleichzeitig die Aufgabe des Leiters übernehmen, welcher die gemeinsamen Elektroden 20 mit stromleitenden Bahnen 76 der Leiterplatte 74 verbindet. Die Erregerelektroden 19 sind direkt oder mittels einer aus stromleitendem Gummi hergestellten Zwischenlage 78 mit den stromleitenden Bahnen 76 durch das Anpressen verbunden. Die Leiterplatte 76 kann gleichzeitig als Platte ausgeführt sein, auf der die Elektronikbauteile der elektrischen Erregervorrichtung des Ultraschallaktors 1 angeordnet sind. Das bewegliche Element 77 dieses Motors besteht aus der Feder 76, die bei der Herstellung fest mit den aus Kunststoff gefertigten Läufern 72 verpresst wird. Die Läufer 72 können jedoch ebenso aus Metall, Keramik, Glass oder aus gefülltem Kunststoff, beispielsweise aus mit Glasfasern gefülltem Polyacrylamid oder aus mit Kohlenstofffasern gefülltem Epoxydharz, gefertigt sein.

[0075] Fig. 14 zeigt die schematische Darstellung eines Ultraschallmotors mit einem erfindungsgemäßen Aktor gemäß Fig. 12. Der Aktor wird durch eine Halterung 79 an den Halteflächen 67 gehalten. Bei dieser Ausführungsform des Aktors sind die Arbeitsflächen 66 versetzt bezüglich der Symmetrieachse O bzw. der Massenmittelpunkte der Platte angeordnet. Die auf die Friktionselemente 5 bzw. auf die Arbeitsflächen 66 wirkende Federkraft F führt zum Entstehen eines Drehmoments (in Fig. 14 durch einen Pfeil angedeutet).

[0076] Durch das Drehmoment verklemmt sich der Aktor in der Halterung 79, wodurch Fertigungstoleranzen dieser beiden Teile ausgeglichen werden. Die flexible Leiterplatte 74 zur Kontaktierung der Aktorelektroden 19, 20 kann mit der Haltefläche 67 durch das Klemmen oder andersartig verbunden sein.

[0077] Fig. 15 zeigt in den Abb. 84 und Abb. 85 weitere Anwendungsbeispiele des erfindungsgemäßen Ultraschallaktors in einem Ultraschallmotor, wobei der Ultraschallmotor im Objektiv einer Kamera angeordnet ist. In diesem Objektiv kann eine bzw. können zwei oder drei Gruppen von optischen Lin-

sen 80 zum Einsatz kommen. Die Linsenbaugruppen 80 können auf dem beweglichen Element 77 jedes Motors befestigt mittels der im Objektivgehäuse angeordneten Führungen 83 geführt werden (siehe Abb. 84), oder die Ultraschallaktoren 1 bewegen sich mit den an ihnen befestigten Linsenbaugruppen 80 auf den Führungen 83 gemäß Abb. 85 von Fig. 15. Die flexible Leiterplatte 74 jedes Motors zur Kontaktierung von Aktorelektroden 19, 20 kann durch ein Teil des Objektivgehäuses an den Aktor angepresst werden. Dabei wird die mit dem Fotoobjektiv der optischen Linsengruppe 80 aufgenommene Abbildung auf einen Fotosensor 81 fokussiert.

[0078] Fig. 16 zeigt in den Abb. 87 und Abb. 88 einen erfindungsgemäßen Aktor in Form eines Hohlzylinders 86 aus unterschiedlichen Blickrichtungen. Dieser lässt sich 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 86 angeordnet und grenzen jeweils aneinander.

[0079] Die axial-diametralen Ebenen D1, D2 und D3 werden durch die Längs- oder Rotationsachse O des Zylinders 86 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 86 in die Sektoren Sa und Sb mit den gleichen Umfangswinkeln α teilt. Die Zahl der den Zylinder 86 des Aktors 1 teilenden axial-diametralen Ebenen kann beliebig sein, z. B. n.

[0080] Fig. 17 zeigt einen Teil eines hohlzylindrischen erfindungsgemäßen Ultraschallaktors 90, wobei dieser in n axial-diametrale Ebenen unterteilt ist. Der (Umfangs-)Winkel α der Sektoren Sa und Sb für einen solchen Ultraschallaktor ist gleich $360/2n = 180/n$.

[0081] Der hohlzylindrische Ultraschallaktor 86 weist die Erzeugende Q auf (siehe Abb. 114 von Fig. 17). 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. $Q = nL$.

[0082] Friktionselemente 5 sind auf der Stirnfläche 91 des Zylinders 86 jeweils im Bereich der Grenze zweier angrenzender Sektoren Sa und Sb (Sektoren-

paar K) angeordnet, und zwar symmetrisch bezüglich des durch die jeweilige axial-diametrale Ebene D geteilten Sektorenpaars.

[0083] Gemäß **Abb. 89** von **Fig. 17** können die Friktionselemente **5** auch auf beiden Stirnflächen **91** des Ultraschallaktors **90** angeordnet sein.

[0084] Bei einer Anzahl der Sektorenpaare von $K=6$ kann die Anzahl der Friktionselemente an jeder Stirnseite **3** betragen. Ein rotatorisch angetriebenes Element (Rotor) wird dabei nur von 3 Sektorpaaren K angetrieben. Dadurch wird die Auflage des Rotors mechanisch bestimmt und der Resonator akustisch entlastet.

[0085] **Fig. 18** zeigt in den **Abb. 92** bis **Abb. 97** hohlzylindrische Ultraschallaktoren in Draufsicht, welche zwei, drei, vier, fünf, sechs und sieben Friktionselemente **5** aufweisen. Die Friktionselemente sind hierbei aus der Oxidkeramik Al_2O_3 gefertigt, können jedoch auch aus anderen harten und abriebfesten Werkstoffen sein, beispielsweise aus der Oxidkeramik ZrO_2 oder aus einer Nicht-Oxidkeramik wie SiC oder Si_3N_4 . Sie können jedoch auch aus festen Monokristallen wie z. B. aus Saphir, Rubin oder 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. Im Fall eines monokristallinen hohlzylindrischen Aktors können die Friktionselemente einstückig mit dem Hohlzylinder ausgeführt sein. Dadurch entfällt der Fertigungsschritt des Klebens.

[0086] **Fig. 19** zeigt in **Abb. 100** den inneren Aufbau eines Sektors eines erfindungsgemäßen Ultraschallmotors mit einem hohlzylindrischen Aktor in dreidimensionaler Ansicht. Gemäß der Darstellung weist jeder Sektor S_a bzw. S_b jeder Sektorengruppe A und B in axialer Richtung abwechselnd angeordnete Schichten von Erregerelektroden **19** und gemeinsamen Elektroden **20** auf, wobei jeweils zwischen benachbarten Erregerelektroden **19** und gemeinsamen Elektroden **20** eine Schicht bleifreier Piezokeramik **23** angeordnet ist. Die Schichten der Erregerelektroden **19** sind hierbei als Segmente **92**, und die Schichten gemeinsamer Elektroden **20** als Segmente **93** ausgeführt.

[0087] Die Schichten der Elektroden **19**, **20** sind als dünne Silber-Palladiumschichten mit Dicken zwischen 10 und 100 Mikrometer ausgeführt. Es ist jedoch ebenso denkbar, die Schichten der Elektroden **19**, **20** als dünne Silber-Palladium-Silberschichten oder als dünne Kupferschichten auszuführen. Die Piezokeramikschichten **23** weisen eine Dicke zwi-

schen **30** und 100 Mikrometer auf. Die Herstellung des Ultraschallaktors erfolgt hierbei mittels herkömmlicher Multilayer-Technologien, jedoch ist auch eine Herstellung durch Synthese von Piezokeramik in der Luft oder unter Schutzgas möglich.

[0088] In jedem Sektor S_a und S_b sind die Schichten **19**, **20**, **23** normal, d. h. unter einem Winkel von 90° , zur Längs- oder Rotationsachse O des Zylinders **286** angeordnet und damit parallel zu den Stirnflächen **91** des Zylinders.

[0089] Die Piezokeramikschichten **23** sind zu den Elektroden **19**, **20** normal polarisiert (in **Abb. 101** von **Fig. 19** durch Pfeile mit dem Index p gekennzeichnet). Bei einer solchen Polarisation ist der Polarisationsvektor p parallel zur Längs- oder Rotationsachse des Zylinders **86** und senkrecht zu seinen Stirnflächen **91** gerichtet.

[0090] Alle den Sektoren S_a der Sektorengruppe A zugehörige Schichten von Erregerelektroden **19** sind elektrisch miteinander verbunden. Ebenso sind alle Schichten der Erregerelektroden **19** der Sektorengruppe B elektrisch miteinander verbunden. Darüber hinaus sind alle Schichten der gemeinsamen Elektroden **20** der Sektoren S_a und der Sektoren S_b der Sektorengruppen A und B elektrisch miteinander verbunden. Hierbei sind in jedem Sektor S_a und S_b alle Schichten der Erregerelektroden **19** untereinander mit Hilfe der leitenden Bahnen **94** und **95** und mit den Anschlüssen **96** und **97** verbunden, und alle Schichten der gemeinsamen Elektroden **20** sind untereinander mit Hilfe der leitenden Bahnen **98** mit den Anschlüssen **99** verbunden.

[0091] Bei dieser Art der Verbindung der Elektroden sind insbesondere folgende Fälle denkbar: im ersten Fall bilden die Erregerelektroden **19** zusammen mit den gemeinsamen Elektroden **20** und den Piezokeramikschichten **23** zwischen ihnen aller zur Sektorengruppe A gehörenden Sektoren S_a den ersten kombinierten Generator für eine sich entlang der Erzeugenden Q des piezoelektrischen Zylinders **86** des Ultraschallaktors **87** ausbreitende akustische Longitudinalstehwelle (d. h. eine sich in Umfangsrichtung ausbreitende akustische Longitudinalstehwelle) und für eine sich entlang der Höhe H bzw. der Höhenerstreckung des piezoelektrischen Zylinders **2** des Ultraschallaktors **87** ausbreitende akustische Longitudinalstehwelle. Die Erregerelektroden **19** zusammen mit den gemeinsamen Elektroden **20** und den Piezokeramikschichten **23** 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 **86** des Ultraschallaktors **87** bzw. eine sich in Umfangsrichtung ausbreitende akustische Longitudinalstehwelle und für eine sich entlang der Höhe H des piezoelektrischen Zylinders **86** des Ultraschallak-

tors 87 bzw. eine sich in Höhenrichtung ausbreitende akustische Longitudinalstehwelle.

[0092] Im zweiten Fall bilden die Erregerelektroden **19** zusammen mit den gemeinsamen Elektroden **20** und den Piezokeramiksichten **23** zwischen ihnen aller zur Sektorengruppe A gehörenden Sektoren Sa den ersten Generator für eine sich entlang der Erzeugenden Q des piezoelektrischen Zylinders **86** des Ultraschallaktors 87 ausbreitende asymmetrische akustische Longitudinalstehwelle. Die Erregerelektroden **19** bilden zusammen mit den gemeinsamen Elektroden **20** und den Piezokeramiksichten **23** zwischen ihnen aller zur Sektorengruppe B gehörenden Sektoren Sb den zweiten Generator für eine sich entlang der Erzeugenden Q des piezoelektrischen Zylinders **86** des Ultraschallaktors 87 ausbreitende asymmetrische akustische Longitudinalstehwelle.

[0093] Fig. 20 zeigt in Abb. 102 einen erfindungsgemäßen Aktor in Form eines Hohlzylinders, bei dem die Erregerelektroden **19** gemäß Abb. 103 als Segmente 92 und die gemeinsamen Elektroden **20** gemäß Abb. 104 als Ringe ausgeführt sind, die alle Sektoren Sa und Sb beider Sektorengruppen A und B kreuzen.

[0094] Fig. 21 zeigt in Abb. 105 einen erfindungsgemäßen Aktor in Form eines Hohlzylinders **86**, bei dem die Erregerelektroden **19** gemäß Abb. 106 als Segmente 92 und die gemeinsamen Elektroden **20** gemäß Abb. 107 als Ringe ausgeführt sind, die mit den elektrisch leitenden Bahnen 94 und 95 verbunden sind. Die Bahnen 94 verbinden die Elektroden **19** der Sektoren Sa miteinander, während die Bahnen 95 die Elektroden **19** der Sektoren Sb miteinander verbinden.

[0095] Fig. 22 zeigt schematisch einen Teil der abgewickelten Mantelfläche eines erfindungsgemäßen Ultraschallaktors in Form eines Hohlzylinders 87 mit den Elektroden **19**, **20**. Alle Erregerelektroden **19** der Sektoren Sa der Sektorengruppe A sind mit den leitenden Bahnen 94 über die Anschlüsse 96 mit dem Ausgang **108** der Elektroden der Sektorengruppe A verbunden, während alle Erregerelektroden **19** der Sektoren Sb der Sektorengruppe B mit den leitenden Bahnen 95 über die Anschlüsse 97 mit dem Ausgang **109** der Elektroden der Sektorengruppe B verbunden sind. Alle gemeinsamen Elektroden **20** sind mit den elektrisch leitenden Bahnen **98** über den Anschluss **99** mit dem Ausgang **110** der Sektorengruppen A und B verbunden.

[0096] Fig. 23 zeigt schematisch einen Teil der abgewickelten Mantelfläche einer weiteren Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Ultraschallaktors in Form eines Hohlzylinders mit den Elektroden **19**, **20**. Alle Erregerelektroden **19** der Sektoren Sa

der Sektorengruppen A sind mit den leitenden Bahnen 94 über die Anschlüsse 96 mit dem Ausgang **108** der Elektroden der Sektorengruppe A verbunden. Alle Erregerelektroden **19** der Sektoren Sb der Sektorengruppe B sind mit den leitenden Bahnen 95 über die Anschlüsse 97 mit dem Ausgang **109** der Sektorengruppe B verbunden, und alle gemeinsamen Elektroden **20** sind mit den elektrisch leitenden Bahnen **98** über den Anschluss **99** mit dem Ausgang **110** der Sektorengruppen A und B verbunden.

[0097] Fig. 24 zeigt anhand einer Explosionsdarstellung den Aufbau einer möglichen Ausführungsform eines Ultraschallmotors mit einem erfindungsgemäßen Aktor **90** in Form eines Hohlzylinders **86**. An einer der Stirnflächen **91** des Ultraschallaktors sind drei Friktionselemente **5** in zueinander gleichem umfanglichem Abstand angeordnet. Der Rotor **133** ist mit Hilfe einer Feder **134** gegen die Friktionselemente **5** gedrückt, wobei der Rotor als mehrteilige, mit der Achse **135** verbundene Scheibe **136** ausgeführt ist.

[0098] Die mehrteilige Scheibe **136** umfasst die Halterung **137**, die Friktionsschiene 10 und das zwischen der Halterung **137** und der Friktionsscheibe **138** befindliche Dämpfungselement **139**. Das Dämpfungselement **139** ist als elastischer Kleber ausgeführt. Daneben ist denkbar, das Dämpfungselement beispielsweise als Gummiring oder als mit festen Teilchen angereicherte viskose Schicht auszuführen. Die Friktionsscheibe **138** besteht aus einer Oxidkeramik auf Basis von Al₂O₃ mit ZrO₂ 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.

[0099] Der Ultraschallaktor **90** ist in der Halterung **137** angeordnet. Mit seiner zweiten Stirnfläche **91**, an der keine Friktionselemente angeordnet sind, stützt sich der Aktor **90** auf der schallisolierenden Unterlage **140** ab. Die Halterung **137** weist ein Kugellager **141** auf, in dem sich die Achse **135** dreht. Der Rotor **133** wird durch das Halteelement **142** gehalten.

[0100] Fig. 25 zeigt mit Abb. 111 eine elektrische Schaltung für die Ansteuerung eines erfindungsgemäßen Aktors **1** mit zwei Generatoren **18**, **21** sowie mit vollflächigen Elektroden. Abb. 112 von Fig. 25 zeigt eine elektrische Schaltung für einen erfindungsgemäßen Aktor **1** mit zwei Generatoren **18**, **21** sowie streifenförmigen Elektroden (siehe Fig. 7). Die Schaltung besteht aus den Koppelkondensatoren C1, C2 und den Trennwiderständen R1, R2. Die Kapazität der Koppelkondensatoren ist vorzugsweise gleich oder größer als die Kapazität C0 des Aktors **1** zwischen den Anschlüssen **34**, **36** der Generatoren **18**, **21**. Die Trennwiderstände R1, R2 sind bevorzugt um das 5 bis 10-fache größer als die des Scheinwiderstandes X0 der Kapazität C0, wobei $X0=1/6,28FrC0$

ist und f_r die Resonanzfrequenz des Ultraschallmotors darstellt.

[0101] Fig. 26 zeigt eine Blockschaltung einer elektrischen Steuerungsvorrichtung eines Motors mit zwei Generatoren 18(30), 21(31) mittels elektrischer Einphasenspannung. Die Schaltung besteht aus dem Einphasengenerator 115 für die elektrische Wechselspannung U_1 am Ausgang 116, dem Umschalter 117 mit den Anschlüssen 118, 119, 120, dem Generator 121 zur statischen Steuerung der elektrischen Spannung E_s am Ausgang 122, den Linearverstärkern 123 und 124 der statischen elektrischen Spannung mit den Ausgängen 125, 126, an denen die statischen elektrischen Spannungen E_1 und E_2 anliegen und den Controller 127 mit dem Eingang 128. Alle Komponenten der elektrischen Steuereinrichtung 113 haben den gemeinsamen Anschluss 129.

[0102] Fig. 27 zeigt in den Abb. 130 bis Abb. 132 mittels FEM-Simulation berechnete maximale Deformationen unterschiedlich ausgeführter erfindungsgemäßer Aktoren bei deren dynamischer Anregung. Abb. 130 zeigt hierbei einen piezoelektrischen Aktor in Form einer rechteckigen Platte, der vollflächige oder streifenförmige und ggf. innere Elektroden aufweist, wie beispielsweise in Fig. 2, Fig. 8 oder Fig. 10 dargestellt. Abb. 131 von Fig. 27 zeigt einen erfindungsgemäßen Aktor mit 8 Seitenflächen, wie etwa in Fig. 11 und Fig. 12 dargestellt. Abb. 132 schließlich zeigt einen hohlzylindrischen Aktor, wie etwa in Fig. 16 dargestellt.

[0103] Fig. 28 zeigt ein Blockschaltbild einer elektrischen Schaltung zur Regelung der Arbeitsfrequenz eines Ultraschallmotors mit einem erfindungsgemäßen Ultraschallaktor. Die elektrische Schaltung umfasst als wesentliche Bestandteile das Stromrückkopplungselement 144, den Regler 145, den Frequenzgenerator 146 und die Endstufe 147.

[0104] Ein mit dem erfindungsgemäßen Ultraschallaktor gebildeter piezoelektrischer Motor 1 kann sowohl im Ultraschallmodus, als auch im Gleichstrommodus betrieben werden. Entsprechend kann die Steuerung für den Motor mit der elektrischen Steuereinrichtung 113 auf dynamische Weise, d.h. im Ultraschallmodus, oder auf statische Weise, d.h. im Gleichstrommodus, erfolgen.

[0105] Im Folgenden wird zunächst die dynamische Steuerung eines Motors mit zwei Generatoren 18 (30), 21 (31) betrachtet. Hierbei sind eine Einphasen- und eine Zweiphasensteuerung denkbar.

[0106] Bei der dynamischen Einphasensteuerung des Motors stellt der Generator 115 die elektrische Einphasenwechselspannung U_1 bereit, deren Frequenz f_g gleich der Resonanzfrequenz des Motors f_r ist oder nahe bei dieser liegt. Zum Einen wird die

Spannung U_1 über den Anschluss 118 des Umschalters 117 und den Kondensator C1 an den Anschluss 34 der Erregerelektroden 19 des Generators 18 gelegt. Zum Anderen wird die Spannung U_1 über den gemeinsamen Anschluss 129 an den Anschluss 36 der gemeinsame Elektrode 20 des Generators 18 gelegt (siehe Fig. 25 und Fig. 26). Die Spannung U_1 erregt den Generator 18 dynamisch, wodurch der Generator 18 im Aktor 1 die zweite Mode einer sich längs zur Länge L und längs zur Breite B ausbreitenden akustischen Stehwelle erzeugt.

[0107] Fig. 27 zeigt anhand einer FEM Simulation die momentane maximale Verformung des Aktors 1 bei Anregung der zweite Mode einer akustischen Stehwelle mit der Frequenz f_r durch den Generator 18 (30). Diese Welle entspricht einer asymmetrischen Volumen-Stehwelle. Befindet sich der Umschalter 117 in einer Position, in der er Kontakt mit dem Anschluss 120 hat (in Fig. 28 punktiert dargestellt), wird die elektrische Spannung U_1 über den Kondensator C2 an den Anschluss 35 der Elektrode 19 des Generators 21 (31) gelegt, wodurch dieser Generator dynamisch angesteuert wird. Der Generator 21 (31) erregt im Aktor 1 eine stehende Welle. Die Welle stellt ein Spiegelbild der durch den Generator 18 (30) erzeugten Welle dar, deren Bilder maximaler Deformationen in Fig. 27 in den Abb. 130 und Abb. 131 dargestellt sind.

[0108] Die Erregerspannung des Aktors kann entweder ein harmonisches (sinusförmiges) oder ein nicht-harmonisches Signal sein. Bei einer nichtharmonischen Signalförmung kann die Erregerspannung außer der Grundfrequenz ω_0 , die der Resonanzfrequenz f_r des Aktors entspricht, auch noch höhere Harmonische oder andere Frequenzen beinhalten. Der Generator 115 kann ein Rechtecksignal, ein Dreiecksignal oder ein Signal beliebiger Form erzeugen.

[0109] Die dynamische Anregung des in Fig. 16 bzw. Fig. 17 dargestellten hohlzylindrischen Aktors erfolgt auf die gleiche Weise. Die momentanen Aufnahmen maximaler Deformationen des hohlzylindrischen Aktors bei dynamischer Anregung sind in Abb. 132 von Fig. 27 dargestellt.

[0110] Bei einer dynamischen Zweiphasensteuerung erzeugt der Generator 115 an den Anschlüssen 118, 120 die elektrischen Wechselspannungen U_1 und U_2 mit einer Frequenz f_g , die gleich der Resonanzfrequenz des Aktors f_r ist oder nahe bei dieser Frequenz liegt. Die Spannungen U_1 und U_2 sind zueinander um den Winkel φ verschoben, der im Bereich von Null bis Plus oder Minus 180° liegen kann. Die Spannungen U_1 und U_2 gelangen gleichzeitig über die Kondensatoren C1 und C2 an die Anschlüsse 34 und 35 der Elektroden 19 und über den gemeinsamen Anschluss 36 an die Anschlüsse 129 der Elektroden 20 der Generatoren 18 (30) und 21 (31).

[0111] Durch die anliegenden Spannungen U_1 und U_2 erzeugen die Generatoren **18 (30)** und **21 (31)** im Aktor **1** zwei akustische Stehwellen, deren jeweilige maximale Deformationen in den **Fig. 27** dargestellt sind. Die erzeugten Wellen sind zueinander um die Zeit t verschoben, wobei t gleich $f/360^\circ F_g$ ist. Durch die Anregung einer stehenden Welle im Aktor erfährt das Friktionselement **5** eine Bewegung entlang einer elliptischen oder einer geradlinigen Bahn. Auf Grund der sich zwischen dem Friktionselement **5** und der Friktionselemente **4** bildenden Reibungskraft wird das anzutreibende Element **3** bewegt. Das Friktionselement **5** veranlasst das anzutreibende Element **3**, sich in der in **Fig. 1** mit Pfeilen mit dem Index +V dargestellten Richtung zu bewegen.

[0112] Wird durch den Generator **21 (31)** im Aktor **1** eine zu den in **Fig. 27** dargestellten spiegelbildliche akustische Stehwelle erzeugt, bewegt sich das Friktionselement **5** in einer entgegengesetzten Richtung. Dadurch veranlasst das Friktionselement **5** das anzutreibende Element **3**, sich in der in **Fig. 1** mit Pfeil mit dem Index -V dargestellten entgegengesetzten Richtung zu bewegen.

[0113] Bei einer Zweiphasenerregung der zwei Generatoren **18 (30)** und **21 (31)** werden im Aktor **1** gleichzeitig zwei akustische Stehwellen erzeugt. Die Form der Bewegungsbahn des Friktionselementes **5** kann durch die Phasen- sowie Amplitudenänderung beider Spannungen variiert werden. Damit kann die Geschwindigkeit des anzutreibenden Elementes verändert werden.

[0114] Ebenfalls kann der Generator **115** zwei Signale unterschiedlicher Frequenz erzeugen. Dadurch werden außer der Arbeitsresonanz des Aktors auch andere Resonanzen angeregt. Das Ziel ist dabei, die Bewegungstrajektorien der Friktionselemente unterschiedlicher Resonanzen zu überlagern. Eine solche Anregung kann gezielt zur Beeinflussung der Bewegung des anzutreibenden Elementes genutzt werden, z.B. für die Kompensation von Stick-Slip-Effekten bei Langsamfahrt oder bei einer Feinpositionierung.

[0115] Die dynamische Zweiphasenanregung des in **Fig. 16** bzw. **Fig. 17** dargestellten hohlzylindrischen Aktors erfolgt auf die gleiche Weise. Die Momentaufnahmen maximaler Deformationen des hohlzylindrischen Aktors bei dynamischer Anregung sind in **Abb. 132** von **Fig. 27** dargestellt. Die Form der Bewegungsbahn wird durch die Abmessungen der Platte **11** des Aktors **1** und der Phasen oder Amplituden zwischen den sich im Aktor **1** ausbreitenden akustischen Stehwellen bestimmt.

[0116] Unterschiedliche Formen von Bewegungsbahnen des Friktionselementes **5** ermöglichen es, unterschiedliche Betriebsarten für einen Ultraschall-

motor mit einem erfindungsgemäßen Ultraschallaktor zu realisieren. Die unterschiedliche Form der Bewegungsbahnen ermöglicht es außerdem, die Reibung zwischen dem Friktionselement **5** und der Friktionselemente **4** zu verringern.

[0117] Die statische Steuerung eines Ultraschallmotors mit einem erfindungsgemäßen Ultraschallaktor erfolgt folgendermaßen: zuerst wird die dynamische Steuerung ausgeschaltet. Kommt eine Einphasensteuervorrichtung **113** zum Einsatz, wird der Umschalter **117** in die Kontaktposition mit dem Anschluss **119** (siehe **Fig. 26**) gebracht. Bei dieser Position des Umschalters **117** werden die Generatoren **18 (30)**, **21 (31)** dynamisch nicht angeregt, d. h. es gelangt keine elektrische Spannung U_1 an die Elektroden **19**, **20** (siehe **Fig. 25**, **Fig. 26**).

[0118] Wird eine Zweiphasensteuervorrichtung **113** verwendet, wird der Generator **115** ausgeschaltet (siehe **Fig. 26**). Dabei sind die Spannungsamplituden U_1 und U_2 Null und die Generatoren **18 (30)**, **21 (31)** werden dynamisch nicht angeregt. Der Generator für die statische Spannung **121** stellt an seinem Ausgang **122** eine statische Steuerspannung E_s bereit, die sich im Bereich von $+E_s \dots 0 \dots -E_s$ ändern kann. Diese Spannung wird durch die Linearverstärker **123**, **124** verstärkt. Dadurch liegt am Ausgang **125** des Verstärkers **123** die statische Spannung E_1 an, die sich im Bereich von $+E \dots 0 \dots -E$ ändern kann. Am Ausgang **126** des Verstärkers **124** wirkt die invertierte statische Spannung E_2 , die sich im Bereich von $-E \dots 0 \dots +E$ ändern kann.

[0119] Bei dem erfindungsgemäßen Ultraschallaktor bilden die streifenförmigen oder Mehrschichtgeneratoren der akustischen Stehwellen **30**, **31** zugleich die Generatoren für die statischen Drehdeformationen der piezoelektrischen Platte **11** des Aktors **1**; deshalb erfolgt die statische Steuerung des erfindungsgemäßen Ultraschallaktors mit Hilfe der Generatoren **30**, **31**. Dies geschieht wie folgt: einerseits wird die Spannung E_1 über die Widerstände R_1 an die Anschlüsse **34** der Erregerelektroden **19** der Generatoren **18 (30)** gelegt. Andererseits wird die Spannung E_1 über die gemeinsamen Anschlüsse **129** an die Anschlüsse **36** der gemeinsamen Elektroden **20** der Generatoren **21 (31)** gelegt. Einerseits wird die Spannung E_2 über die Widerstände R_2 an die Anschlüsse **34** der Erregerelektroden **19** der Generatoren **18 (30)** gelegt. Andererseits wird die Spannung E_1 über die allgemeinen Anschlüsse **129** an die Anschlüsse **36** der gemeinsamen Elektroden **20** der Generatoren **21 (31)** angelegt.

[0120] **Fig. 8** zeigt in **Abb. 46** anschaulich den Aktor **1** mit den parallel zu der Längsebene E_1 verlaufenden streifenförmigen Elektroden (siehe auch **Fig. 10**, **Abb. 54**, **Abb. 55**) oder Mehrschichtelektroden (siehe **Fig. 6**) mit zwei Generatoren **30** und **31** in einer Position, bei der die statischen Spannungen E_1 und E_2 Null

sind. In diesem Fall werden alle Bereiche zwischen den Elektroden **19** und **20** der Generatoren **30**, **31** nicht verformt, sind untereinander gleich und gleich k , das Friktionselement **5** ist - bezogen auf die Ebene E_q - symmetrisch in seiner mittleren Position angeordnet.

[0121] **Abb. 47** von **Fig. 8** zeigt anschaulich den Aktor **1** mit zwei Generatoren **30** und **31** in einer Position, bei der die statische Spannung E_1 gleich $-E$ und die statische Spannung E_2 gleich $+E$ ist. In diesem Fall werden die Bereiche zwischen den Elektroden **19** und **20** des Generators **30** zusammengedrückt und sind gleich $k-x$, wobei x der Größenwert für die elementare Kompression ist. Die Bereiche zwischen den Elektroden **19** und **20** des Generators **31** sind gedehnt und sind gleich $k+x$, wobei x der Größenwert für die elementare Dehnung ist.

[0122] Im Bereich der Piezokeramik unter dem Friktionselement entsteht dabei eine Drehdeformation (Torsion) des Plattenmaterials in einer im Wesentlichen parallelen zu den Hauptseiten der Aktorplatte ausgerichteten Ebene, wie es in **Abb. 47** von **Fig. 8** mit den Pfeilen **49** gezeigt ist. In diesem Fall erfährt das Friktionselement **5** eine Dreh- oder Kippbewegung im Gegenuhrzeigersinn. Die Punkte **50** der Friktionsfläche **51** des Friktionselementes **5** werden dabei - bezogen auf die bzw. auf die Ebene E_q - nach links um den Betrag $d=nx$ verschoben, wobei d umso größer ist, je größer die Anzahl der Abstände n zwischen den Elektroden **19** und **20** des Generators **30** oder des Generators **31** ist. Der Vorschub der Punkte **50** der Friktionsfläche **51** des Friktionselementes **5** ist dabei größer als der Vorschub der an der Grundfläche des Friktionselementes liegenden Punkte. Die erzeugte Verkippung des Friktionselementes ermöglicht einen im Vergleich zu einem aufgrund von Längsdehnungen hervorgerufenen Vorschub weit größeren Vorschub des anzutreibenden Elementes. Je höher dabei das Friktionselement ist, desto größer ist aufgrund seiner Verkippung der erzeugte Vorschub.

[0123] **Abb. 48** von **Fig. 8** zeigt anschaulich den Aktor **1** mit zwei Generatoren **30** und **31** in einer Position, bei der die statische Spannung E_1 gleich $-E$ und die statische Spannung E_2 gleich $+E$ ist. In diesem Fall sind alle Bereiche zwischen den Elektroden **19** und **20** des Generators **30** gedehnt und gleich $k+x$. Die Abstände zwischen den Elektroden **19** und **20** des Generators **31** sind komprimiert und gleich $k-x$. Im Bereich der Piezokeramik unter dem Friktionselement entsteht dabei eine Drehdeformation (Torsion) des Plattenmaterials in einer im Wesentlichen parallelen zu den Hauptseiten der Aktorplatte angeordneten Ebene, wie es in **Abb. 47** von **Fig. 8** mit dem Pfeil **49** gezeigt ist. In diesem Fall erfährt das Friktionselement **5** eine Dreh- oder Kippbewegung im Uhrzeigersinn.

[0124] Die Punkte **50** der Friktionsfläche **51** des Friktionselementes **5** werden dabei - bezogen auf die Ebene E_q - nach rechts um den Betrag $d=nx$ verschoben, wobei n die Zahl der Abstände zwischen den Elektroden **19** und **20** des Generators **30** oder des Generators **31** ist. Der Vorschub der Punkte **50** der Friktionsfläche **51** des Friktionselementes **5** ist dabei größer als der Vorschub der an der Grundfläche des Friktionselementes liegenden Punkte. Die erzeugte Verkippung des Friktionselementes ermöglicht einen weit größeren Vorschub des anzutreibenden Elementes im Vergleich zu einem aufgrund von Längsdehnungen hervorgerufenen Vorschub. Je höher dabei das Friktionselement ist, desto größer ist bei seiner Verkippung der erzeugte Vorschub.

[0125] Durch die kontinuierliche gleichzeitige Änderung der elektrischen Spannung E_1 im Bereich von $+E$ über Null bis zu $-E$ und der Spannung E_2 von $-E$ über Null bis $+E$ ist es möglich, das Friktionselement **5** statisch um den Wert X nach links oder rechts von seiner mittleren Position zu kippen bzw. die Friktionsfläche **51** zu verschieben.

[0126] **Abb. 52** von **Fig. 9** zeigt anschaulich den Aktor **1** mit den parallel zu der Querebene E_q verlaufenden streifenförmigen Elektroden (gemäß den **Abb. 56** und **Abb. 57** von **Fig. 10**) oder mit Mehrschichtelektroden (gemäß **Fig. 5**) mit zwei Generatoren **30** und **31** in einer Position, bei der die statischen Spannungen E_1 und E_2 gleich Null sind. In diesem Fall werden alle Bereiche zwischen den Elektroden **19** und **20** der Generatoren **30**, **31** nicht verformt, sind untereinander gleich und gleich k , und das Friktionselement **5** ist - bezogen auf die Ebene E_q - symmetrisch in seiner mittleren Position angeordnet.

[0127] Darstellung 53 von **Fig. 9** zeigt anschaulich den Aktor **1** mit zwei Generatoren **30** und **31** in einer Position, bei der die statische Spannung E_1 gleich $-E$ und die statische Spannung E_2 gleich $+E$ ist. In diesem Fall werden die Bereiche zwischen den Elektroden **19** und **20** der Generatoren **30** zusammengedrückt und sind gleich $k-x$, wobei x der Größenwert für die elementare Kompression ist. Die Bereiche zwischen den Elektroden **19** und **20** der Generatoren **31** sind gedehnt und gleich $k+x$, wobei x der Größenwert für die elementare Dehnung ist.

[0128] Im Bereich der Piezokeramik unter dem Friktionselement **5** entsteht dabei eine Längsdeformation des Plattenmaterials in einer im Wesentlichen parallelen zu den Hauptflächen der Aktorplatte angeordneten Ebene. Die Punkte **50** der Friktionsfläche **51** des Friktionselementes **5** werden dabei - bezogen auf die Ebene E_q - nach links um den Betrag $d=nx$ verschoben, wobei d umso größer ist, je größer die Anzahl der Abstände n zwischen den Elektroden **19** und **20** des Generators **30** oder des Generators **31** ist. Der Vorschub der Punkte **50** der Friktions-

fläche **51** des Friktionselementes **5** ist dabei größer als der Vorschub der an der Grundfläche des Friktionselementes liegenden Punkte. Der erzeugte Vorschub des Friktionselementes ermöglicht einen Vorschub des anzutreibenden Elementes.

[0129] **Abb. 54** von **Fig. 9** zeigt anschaulich den Aktor **1** mit zwei Generatoren **30** und **31** in einer Position, bei der die statische Spannung E_1 gleich $-E$ und die statische Spannung E_2 gleich $+E$ ist. In diesem Fall sind alle Bereiche zwischen den Elektroden **19** und **21** des Generators **30** gedehnt und gleich $k+x$. Die Abstände zwischen den Elektroden **19** und **20** des Generators **31** sind komprimiert und gleich $k-x$. Im Bereich der Piezokeramik unter dem Friktionselement **5** entsteht dabei eine Längsdeformation des Plattenmaterials in einer im Wesentlichen parallel zu den Hauptseiten der Aktorplatte angeordneten Ebene. Die Punkte **50** der Friktionsfläche **51** des Friktionselementes **5** werden dabei - bezogen auf die Ebene E_5 - nach rechts um den Betrag $d=nx$ verschoben, wobei n die Zahl der Abstände zwischen den Elektroden **19** und **20** des Generators **30** oder des Generators **31** ist.

[0130] Der Maximalverschiebung X wird durch die Maximalwerte der Spannungen E_1 , E_2 bestimmt und durch die Höhe der Durchschlagsspannung zwischen den Elektroden **19** und **20** begrenzt. Der tatsächliche Maximalwert liegt im Bereich von ca. 10nm. Nach unten, d.h. zu kleineren Verschiebungen hin, ist der Wert nicht begrenzt. Durch die kontinuierliche gleichzeitige Änderung der elektrischen Spannung E_1 im Bereich von $+E$ über Null bis zu $-E$ und der Spannung E_2 von $-E$ über Null bis $+E$ ist es möglich, das Friktionselement **5** statisch um den Wert X nach links oder rechts von seiner mittleren Position zu kippen bzw. die Friktionsfläche zu verschieben.

[0131] Die Funktion des Aktors **1** mit streifenförmigen Elektroden, die unter einem Winkel zu der Querebene E_q verlaufen (siehe **Abb. 58** und **Abb. 59** von **Fig. 7**) erfolgt auf ähnliche Weise. Sowohl bei statischer als auch bei dynamischer Steuerung eines Ultraschallmotors mit einem erfindungsgemäßen Ultraschallaktor werden alle Materialpunkte **50** der Friktionsfläche **51** des Friktionselementes **5** an die Friktionsleiste **4** des anzutreibenden Elements **3** angepresst. Bei einer Verschiebung des Friktionselementes **5** nach links oder rechts - bezogen auf seine mittlere Position - bewegen sich die Materialpunkte der Friktionsfläche **51** auf einer annähernd linearen oder gebogenen Bewegungsbahn und bewegen das anzutreibende Element **3** aufgrund der Reibung nach links oder rechts. Die Maximalverschiebung des anzutreibenden Elements **3** beträgt $+X$ oder $-X$ (± 10 nm). Die Minimalverschiebung des Friktionselementes **5** oder die Auflösungsfähigkeit sind hierbei nicht begrenzt.

[0132] Die in **Fig. 28** dargestellte elektrische Schaltung **143** zur Regelung der Arbeitsfrequenz eines Ultraschallmotors mit einem erfindungsgemäßen Ultraschallaktor hat folgende Funktionsweise: das Stromrückkopplungselement **144** ermittelt den Phasenwinkel φ_{ui} zwischen dem durch den Motor fließenden Strom I_m und der elektrischen Spannung U_m an dem Motor und führt den Wert dem Regler **145** zu. Der Regler **145** vergleicht den Winkel mit dem Referenzwert (beispielweise 0°) und steuert den Frequenzgenerator **146** derartig an, dass der Winkel φ_{ui} dem Referenzwert gleicht. Von dem Frequenzgenerator **146** gelangt das Signal an die Endstufe **147**. Diese erzeugt eine elektrische Spannung U_m mit der notwendigen Amplitude sowie Stromstärke für den Betrieb des Motors.

[0133] In einer möglichen Abwandlung der Schaltung **143** zur Regelung der Arbeitsfrequenz des Motors ermittelt das Stromrückkopplungselement **144** einen bestimmten Wert des Motorstromes, etwa den Momentanwert, den Mittelwert, den Effektivwert oder die Amplitude, und regelt danach die Arbeitsfrequenz des Motors.

[0134] Als frequenzerzeugender Generator der Schaltung **144** kann ein spannungsgesteuerter oder digitalgesteuerter Generator verwendet werden, oder eine Look-up-Tabelle (d.h. in einem Speicher abgelegte Werte) zur Anwendung kommen.

[0135] **Fig. 29** zeigt eine Ausführungsvariante der piezoelektrischen Platte **11**, **71** gemäß den **Fig. 2**, **Fig. 11** und **Fig. 12**, hergestellt aus einem um den Winkel β um die X_1 -Achse rotierten Y -Schnitt von Lithiumniobat bzw. LiNbO_3 (Y cut). Zur eindeutigen Beschreibung von Kristallschnitten wird international ein kristallographisches Koordinatensystem verwendet. Das Koordinatensystem ist rechtwinklig mit den Achsen XYZ ($X_1X_2X_3$). Bei dieser Ausführungsvariante des Aktors verlaufen die großen Seiten der Aktorplatte parallel zu der Y -Kristallschnittebene. Als ein Y -Schnitt des Kristalls wird der Schnitt bezeichnet, der parallel zu den X_1 , X_3 -Achsen verläuft und auf der die X_2 -Achse senkrecht steht.

[0136] Ein um den Winkel β um die Achse X_1 rotierter Y -Schnitt des Monokristalls besitzt ein abgeleitetes rechtwinkliges Koordinatensystem $X_1'X_2'X_3'$, welches durch Drehen des ursprünglichen Koordinatensystem $X_1X_2X_3$ des Kristalls entsteht. Die X_2' , X_3' -Achsen des Schnitts werden dabei in Bezug auf die X_2 -, X_3 -Achsen um den Winkel β um die Achse X_1 in Gegenuhrzeigersinn gedreht. Die X_1' -Achse des Schnitts fällt mit der X_1 Achse des Kristalls zusammen. Die Y -Schnittebene wird durch die neuen Achsen X_1 - X_3' gebildet. Den um den Winkel β um die Achse X_1 rotierten Y -Schnitt von Lithiumniobat kann man vorteilhaft für den Resonator des erfindungsgemäßen Aktors einsetzen. Eigenschaften von

piezoelektrischen Monokristallen sind anisotrop. Bei bestimmten orientierten Schnitten des Kristalls erfahren Kristalleigenschaften vorteilhafte Werte aus der Sicht der möglichen Anregung akustischer Wellen. Im Resonator des erfindungsgemäßen Motors wird eine zweidimensionale akustische Stehwelle angeregt. Damit die Welle existieren kann und die Trajektorie des Friktionskontaktes optimal ist, müssen die piezoelektrischen d-Koeffizienten des piezoelektrischen Materials des Resonators in die 2 in der Plattenebene liegenden orthogonale Richtungen im Wesentlichen gleich sein oder sich nicht mehr als um den Faktor zwei unterscheiden.

[0137] Die Verläufe der piezoelektrischen d-Koeffizienten von Lithiumniobat zeigt das Diagramm in **Fig. 30**. So unterscheiden sich bei einem Y-Schnitt von LiNbO_3 die d_{21} , d_{23} -Koeffizienten im Bereich der Drehung um die Achse X_1 um den Winkel β von 10° bis 55° sowie 120° bis 170° nicht mehr als den Faktor 2. Die Bereiche sind in **Fig. 30** mit β gekennzeichnet. In diesen Bereichen kann durch die d_{21} , d_{23} -piezoelektrischen Koeffizienten eine zweidimensionale akustische Stehwelle angeregt werden. Das elektrische Feld wird dabei in X_2 -Richtung angelegt. Besonders vorteilhaft erweisen sich die Bereiche von 25° bis 45° sowie 160° bis 161° . Dort sind die d_{21} , d_{23} -Koeffizienten im Wesentlichen gleich (in **Fig. 30** umkreist).

[0138] Als ein weiteres Material kann bei dieser Ausführungsvariante des Aktors Lithiumtantalat oder Langat oder ein anderer Monokristall des gleichen Kristallsystems eingesetzt werden.

[0139] Das Friktionselement kann aus demselben Material wie das des Aktors ausgeführt sein. Dadurch entfällt das Prozessschritt des Klebens.

[0140] Der erfindungsgemäße Ultraschallaktor ist RoHS-konform und entspricht damit den EU-Richtlinien bzw. erfüllt die Anforderungen gemäß dem weltweiten Trend in der Elektronikherstellung. Durch Verwendung der erfindungsgemäßen bleifreien Ultraschallaktoren in Ultraschallmotoren mit statischer und dynamischer Ansteuerung ist es möglich, die Kosten für hochpräzise Geräte der Nanopositionierung zu senken.

Bezugszeichenliste

1 :	Aktor	7:	Lager
2:	Gehäuse	8:	Resonator
3:	anzutreibendes Element	11:	Bleifreie piezoelektrische Aktorplatte
4:	Friktionsleiste	12:	Hauptfläche (der Aktorplatte 11)
5:	Friktionselement	13:	Lange Seitenfläche (der Aktorplatte 11)
6:	Anpresselement	14:	Stirnfläche (der Aktorplatte 11)
		15, 16:	Teile (des Aktors 1 bzw. der Aktorplatte 11)
		17:	Spur der Trennebene
		18:	Generator akustischer Stehwellen und statischer Deformationen
		19:	Erregerelektrode (des Generators 18)
		20:	gemeinsame Elektrode (des Generators 18 bzw. des Generators 21)
		21:	zweiter Generator akustischer Stehwellen und statischer Deformationen
		22:	Erregerelektrode (des zweiten Generators 21)
		23:	Schicht bleifreier piezoelektrischer Keramik
		27:	Polarisationsachse
		28, 29:	Gruppen von Erregerelektroden
		30, 31:	Mehrschichtgeneratoren akustischer Welle oder statischer Deformationen
		32, 33:	Teile der gemeinsamen Elektroden 20
		34-36:	Anschlusselektroden
		37:	Stromleitender Ansatz
		49:	Richtungspfeil der Drehdeformationen
		50:	Punkte der Friktionsfläche 51
		51:	Friktionsfläche
		60, 61:	Generator akustische Stehwellen und statische Deformationen mit streifenförmigen Elektroden
		62:	Streifenförmige Erregerelektrode
		63:	Streifenförmige gemeinsame Elektrode
		65:	Piezoelektrische Platte
		66:	Arbeitsfläche

67:	Haltefläche	134:	Feder
68:	Freie Fläche	135:	Achse
71:	Piezoelektrische Platte	136:	Scheibe
72:	Läufer	137:	Halterung
73:	Feder	138:	Friktionsscheibe
74:	Leiterplatte	139:	Dämpfungselement
75:	Federbügel	140:	schallisolierende Unterlage
76:	Stromleitende Bahnen (der Leiterplatte 74)	141:	Kugellager
77:	Bewegliches Element	142:	Halteelement
78:	Leitende Zwischenlage	143:	Elektrische Schaltung zur Regelung der Motorarbeitsfrequenz
79:	Halterung	144:	Stromrückkopplungselement
80:	optische Linse	145:	Regler
81:	Fotosensor	146:	Frequenzgenerator
83:	Führungen	147:	Endstufe
86:	piezoelektrischer Hohlzylinder	148:	Schalter
90:	Hohlzylindrischer Ultraschallaktor		
91:	Stirnfläche des piezoelektrischen Zylinders 86		
98:	leitende Bahnen der/von gemeinsamen Elektroden		
99:	Elektrodenanschlüsse leitender Bahnen 98		
108-110:	Ausgänge der Elektrodenanschlüsse 96, 97, 99		
113:	Elektrische Steuervorrichtung		
115:	Generator elektrischer Wechselspannung		
116:	Ausgänge des Generators 115		
117:	Umschalter		
118-120:	Anschlüsse des Umschalters 117		
121:	Generator zur statischen Spannung		
122:	Ausgang des Generators zur statischen Steuerung 121		
123, 124:	Linearverstärker		
125, 126:	Ausgänge der Linearverstärker 123, 124		
127:	Controller		
128:	Eingang des Controllers 127		
129:	Gemeinsamer Anschluss der Steuervorrichtung 113		
133:	Rotatorisch angetriebenes Element (Rotor)		

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- EP 1747594 B1 [0003]
- DE 102008026429 A1 [0003]
- DE 102013105024 B3 [0003]

Patentansprüche

1. Aktor aus einem piezoelektrischen Material mit zumindest an dessen Außenflächen oder in dessen Innerem angeordneten Elektroden, die zwei Generatoren akustischer Wellen bilden, und mit mindestens einem an dem Aktor angeordneten Friktionselement oder einer an dem Aktor angeordneten Friktionsfläche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das piezoelektrische Material des Aktors entweder hergestellt ist aus miteinander versinterten Körnern aus einem bleifreien, ferroelektrischen, oxidischen, keramischen System, welches beim Sintern eine polykristalline Perowskit-Struktur ausbildet, oder aus einem monokristallinen Material besteht, dessen spezifisches Gewicht 1,5 bis 2 mal kleiner ist als das spezifische Gewicht von piezoelektrischer Keramik auf Basis von Blei-Zirkonat-Titanat.

2. Aktor nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass das keramische Materialsystem aus Kalium-Natrium-Niobat oder Bismuth-Natrium-Titanat oder Kalium oder Natrium oder Bismuth oder aus Titanaten oder Niobaten oder aus Kombinationen davon besteht.

3. Aktor nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass das keramische Materialsystem polarisiert ist und die Polarisationsrichtung senkrecht zu den Elektroden angeordnet ist.

4. Aktor nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass das piezoelektrische monokristalline Material eine orthorhombische oder trigonale oder tetragonale oder kubische oder rhombische oder hexogonale Kristallsymmetrie aufweist.

5. Aktor nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass das piezoelektrische Material aus Lithiumniobat oder aus Lithiumtantanat oder aus Langatit oder aus Quarz oder aus einem anderen ähnlichen Material besteht.

6. Aktor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass dieser im Wesentlichen die Form einer rechteckigen Platte mit einer Länge L , einer Höhe H und einer Dicke t aufweist, wobei die Platte eine Längstrennebene E_l , eine Quertrennebene E_q und wenigstens zwei Hauptflächen aufweist, die über wenigstens zwei Seitenflächen und wenigstens zwei Stirnflächen miteinander verbunden sind, und die Platte zumindest zwei symmetrisch zu der Querebene E_q angeordnete Generatoren zur Erzeugung akustischer Stehwellen umfasst.

7. Aktor nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass dieser innere schichtförmige Elektroden aufweist, wobei jeweils zwischen benachbarten inneren Elektroden eine Schicht des piezokeramischen Materials angeordnet ist, und die schichtförmigen in-

neren Elektroden parallel zu den Hauptflächen und parallel zu den Seitenflächen und parallel zu den Stirnflächen angeordnet sind.

8. Aktor nach Anspruch 6 oder 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Generatoren akustischer Stehwellen zugleich Generatoren statischer Drehdeformationen oder statischer Längs-Drehdeformationen oder statischer Längsdeformationen des Bereichs der Platte darstellen, der unterhalb des wenigstens einen Friktionselements zwischen den zwei benachbarten Generatoren angeordnet ist, wobei die durch die Generatoren erzeugbare statische Deformation hauptsächlich in einer zu den Hauptflächen der Platte parallelen Ebene stattfinden.

9. Aktor nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Generatoren akustischer Stehwellen und statischer Deformationen aus abwechselnd auf den beiden Hauptflächen angeordneten streifenförmigen Erregerelektroden und streifenförmigen gemeinsamen Elektroden gebildet sind, wobei die streifenförmigen Elektroden parallel oder unter einem Winkel oder senkrecht zu den Seitenflächen der Platte verlaufen und die Polarisationsrichtungen der piezoelektrischen Platte zwischen den streifenförmigen Elektroden senkrecht zu den streifenförmigen Elektroden verlaufen.

10. Aktor nach einem der Ansprüche 6 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Platte wenigstens acht Seitenflächen umfasst, wobei wenigstens zwei der Seitenflächen zur Kontaktierung wenigstens eines durch den piezoelektrischen Aktor anzutreibenden Elements vorgesehene Arbeitsflächen sind, und wenigstens zwei der Seitenflächen zur Halterung der piezoelektrischen Platte vorgesehene Halteflächen sind, und die übrigen Seitenflächen unter einem gleichen Winkel α zu der Längstrennebene E_l und/oder unter einem gleichen Winkel β zu der Quertrennebene E_q angeordnet sind.

11. Aktor nach einem der Ansprüche 6 bis 10, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Generatoren akustischer Stehwellen oder die Generatoren akustischer Stehwellen und statischer Deformationen unsymmetrisch bezüglich der Trennebenen E_l , E_q und symmetrisch zu der durch die Trennebenen gebildete Schnittachse O angeordnet sind.

12. Aktor nach einem der Ansprüche 6 bis 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Platte aus einem Monokristall mit einer polaren Achse Z und zwei weiteren Kristallsymmetrieachsen X_1 , X_2 besteht, wobei die polare Achse Z des Monokristalls senkrecht auf den Hauptflächen der Platte steht und die X_1 , X_2 -Achsen senkrecht zu der Z -Achse und parallel zu der Querebene E_l oder parallel zu der Längsebene E_q verlaufen.

13. Aktor nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass dieser die Form eines Hohlzylinders mit einer inneren Umfangsfläche und einer äußeren Umfangsfläche und die innere und äußere Umfangsfläche miteinander verbindende Stirnflächen aufweist, wobei an wenigstens einer der Stirnflächen Friktionselemente angeordnet sind, und der Aktor 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, und jeder der Sektoren S_a und S_b ist durch in radiale oder tangential oder axiale Richtung des Hohlzylinders abwechselnd angeordnete Erregerelektroden und gemeinsame Elektroden gebildet ist.

14. Aktor nach Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Hohlzylinder aus einem piezoelektrischen Monokristall mit einer polaren Achse Z sowie zwei oder drei weiteren Kristallsymmetrieachsen X_1 , X_2 , X_3 hergestellt ist, wobei die polare Achse Z des Monokristalls parallel zu der Längsachse O des Zylinders verläuft und die X_1 , X_2 , X_3 -Achsen senkrecht zu der Z -Achse und parallel zur einer der Querebenen E_q verlaufen.

15. Aktor nach einem der vorhergehenden Ansprüche mit einer elektrischen Erregervorrichtung, die einen Rückkopplungskreis für die Regelung der Aktorarbeitsfrequenz anhand der Phasenwinkel zwischen dem Aktorstrom und der elektrischen Spannung am Aktor aufweist.

16. Aktor nach einem der Ansprüche 1 bis 14 mit einer elektrischen Erregervorrichtung, die einen Rückkopplungskreis für die Regelung der Aktorarbeitsfrequenz anhand des Aktorstroms aufweist.

17. Aktor nach einem der Ansprüche 6, 10 oder 11 **dadurch gekennzeichnet**, dass die Platte aus einem piezoelektrischen Monokristall trigonalen Kristallsystems aus einem um die Achse X_1 um den Winkel β im Bereich von 10° bis 55° oder 120° bis 170° rotierten Y Schnitt hergestellt wird, so dass die neue Achse X_3' des Monokristallschnitts senkrecht auf den Hauptflächen der Platte steht und die X_1' , X_2' -Achsen senkrecht zu der Z -Achse und parallel zu der Querebene E_q oder parallel zu der Längsebene E_l verlaufen.

Es folgen 29 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

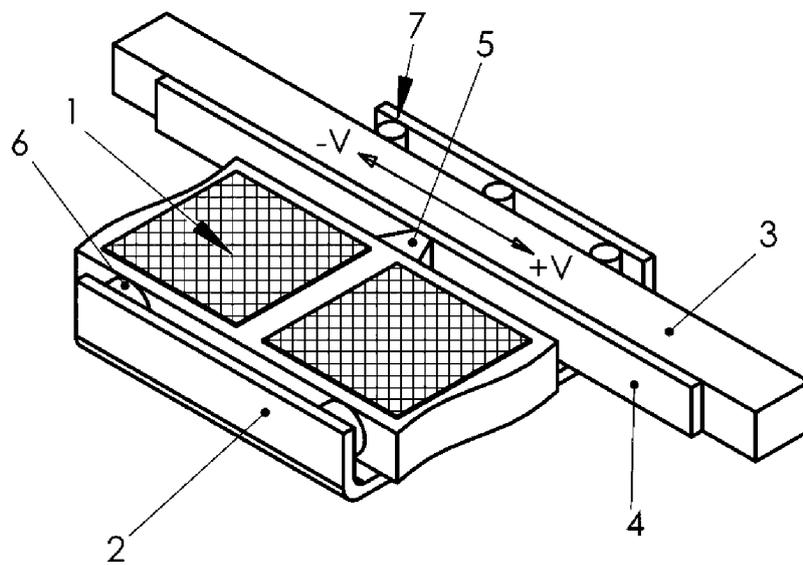


Fig.1

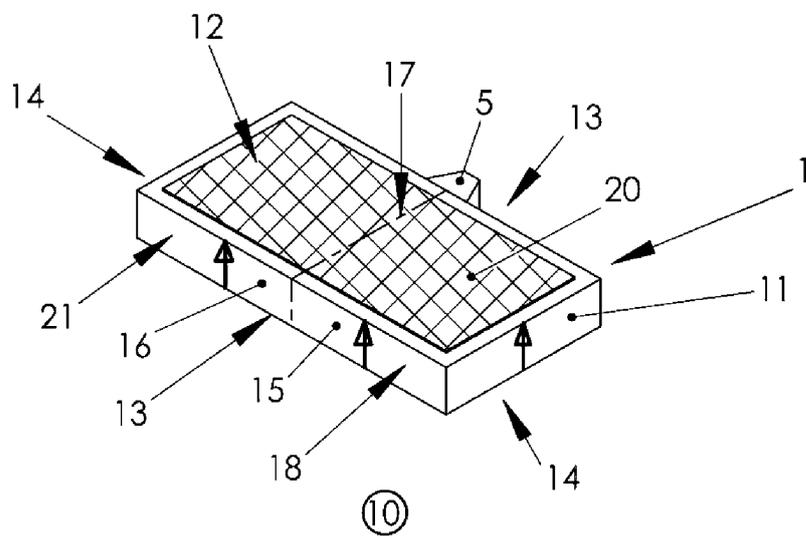
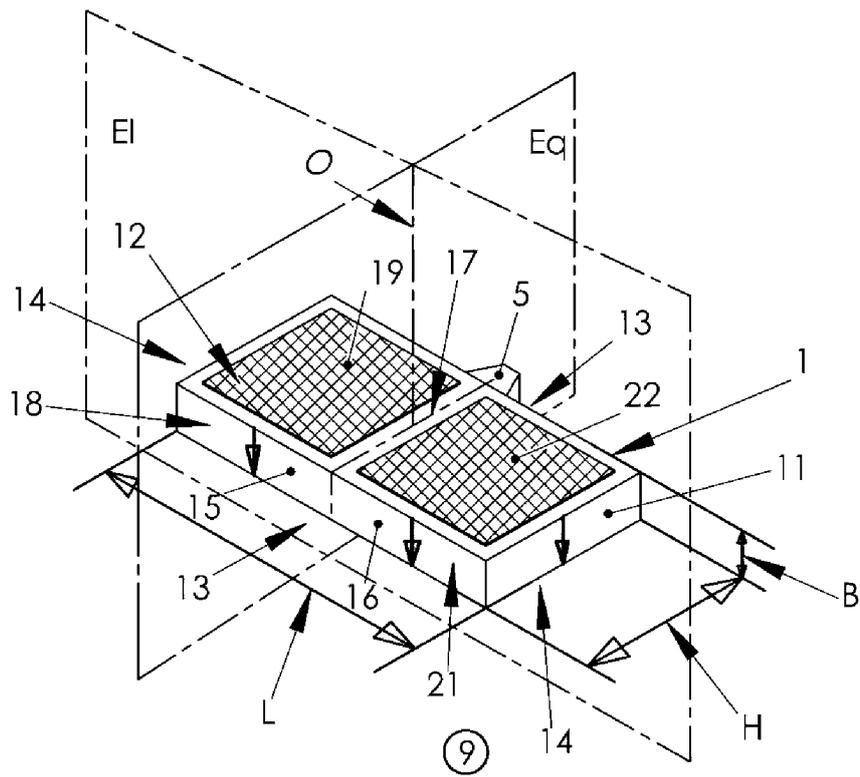


Fig.2

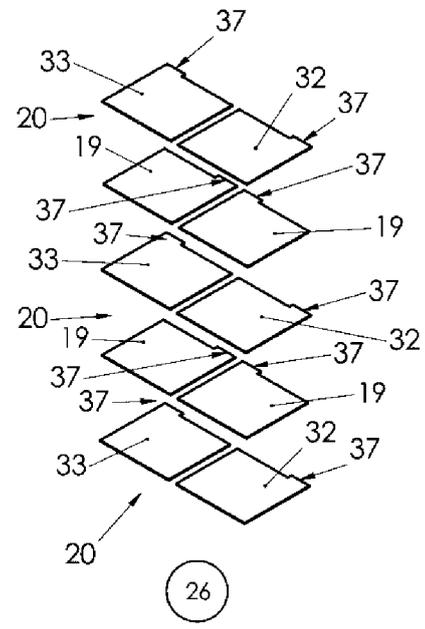
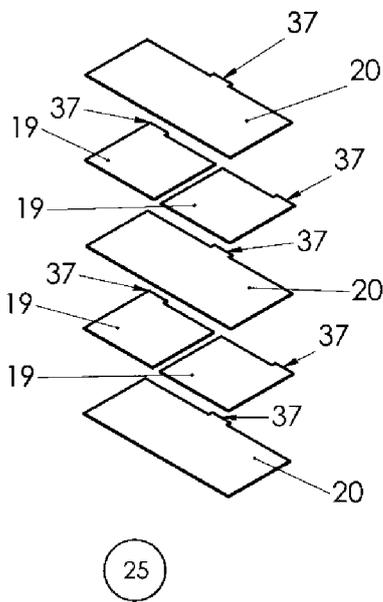
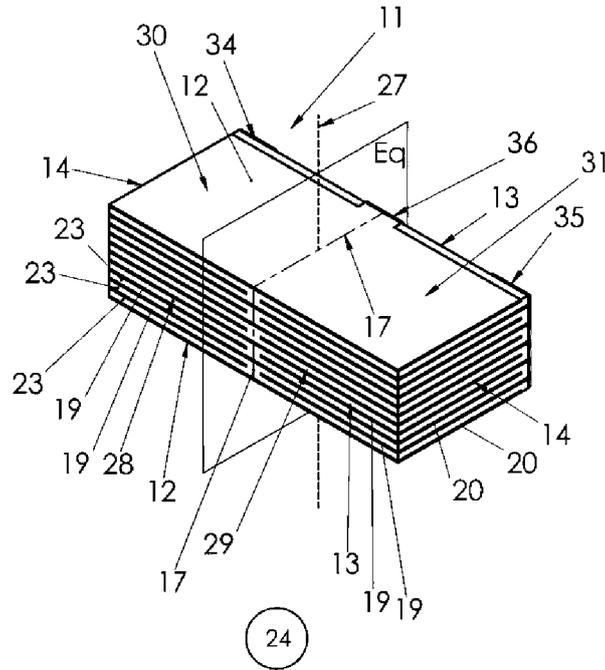


Fig.3

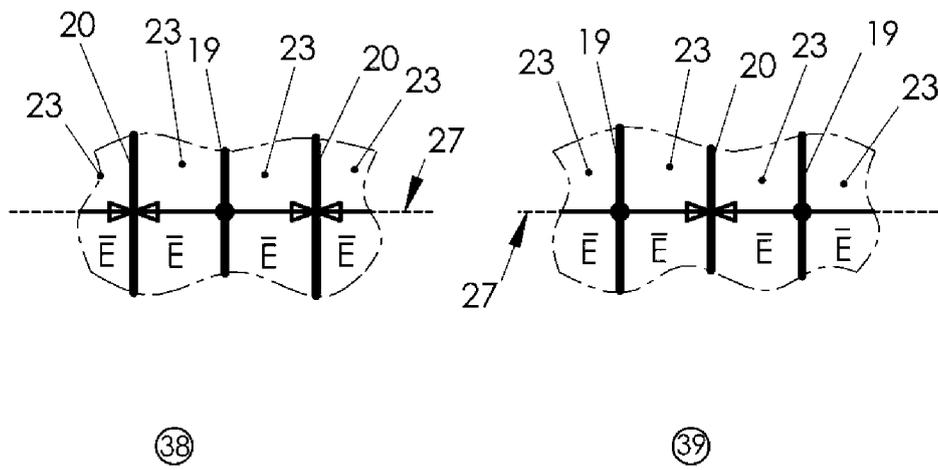


Fig.4

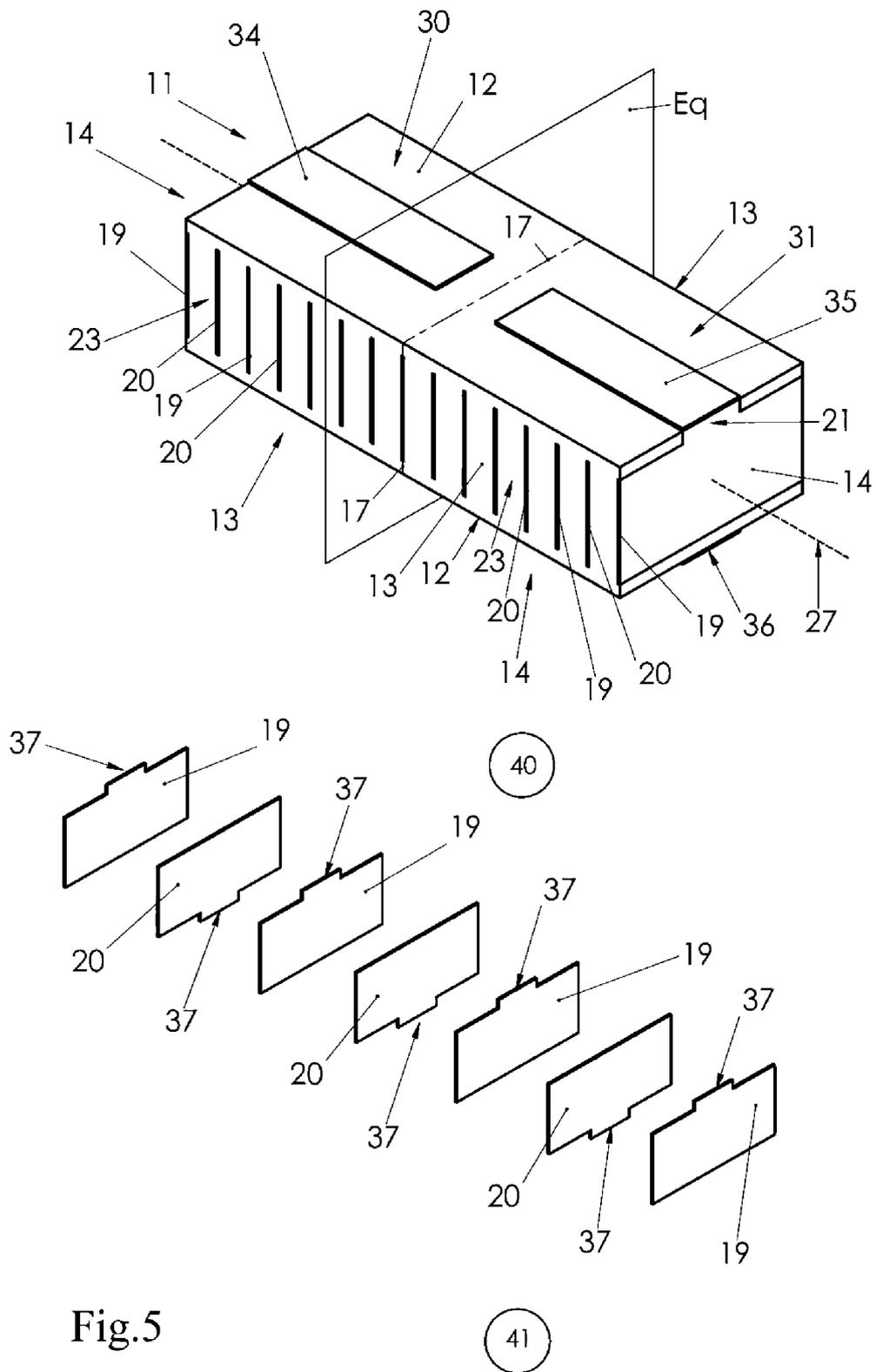


Fig.5

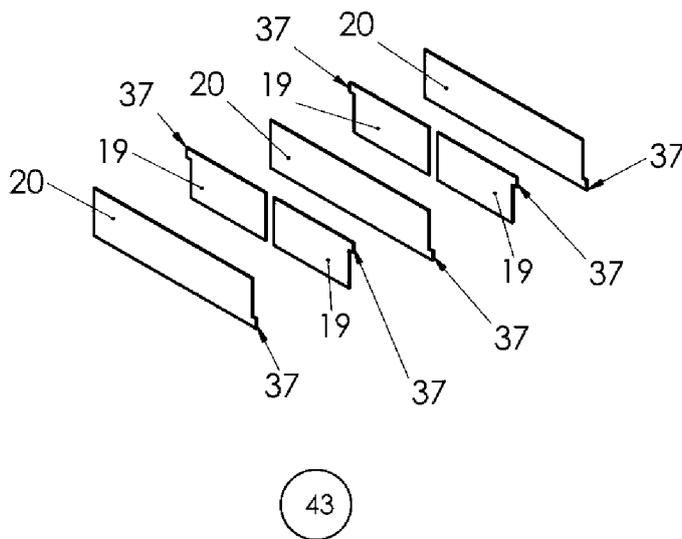
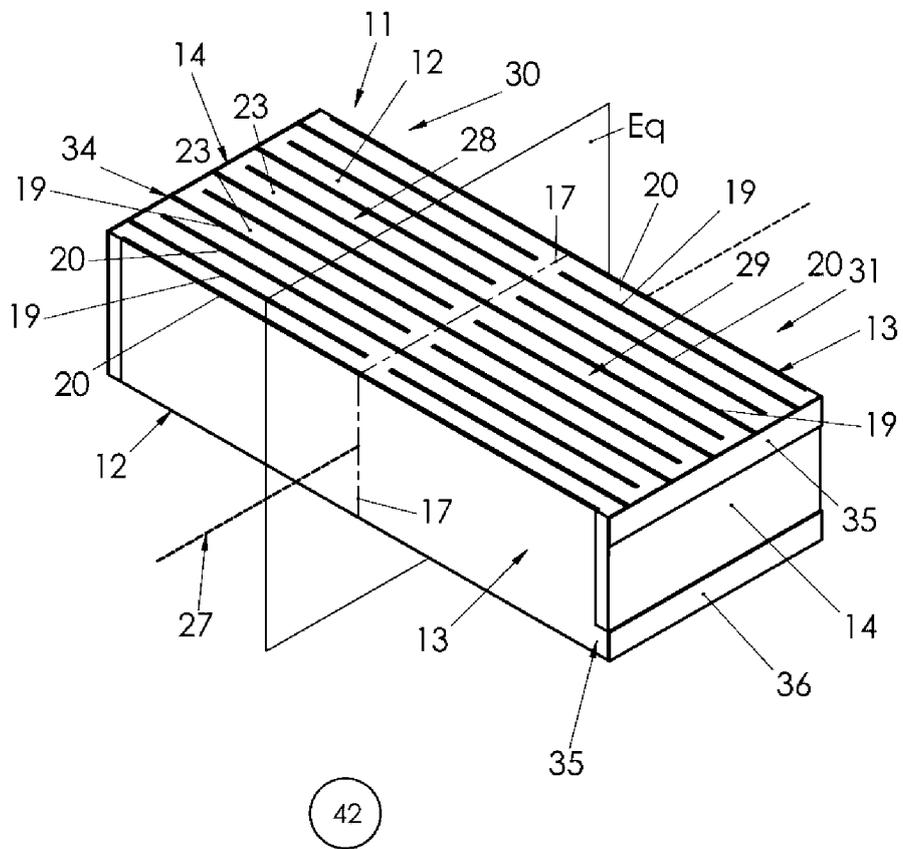
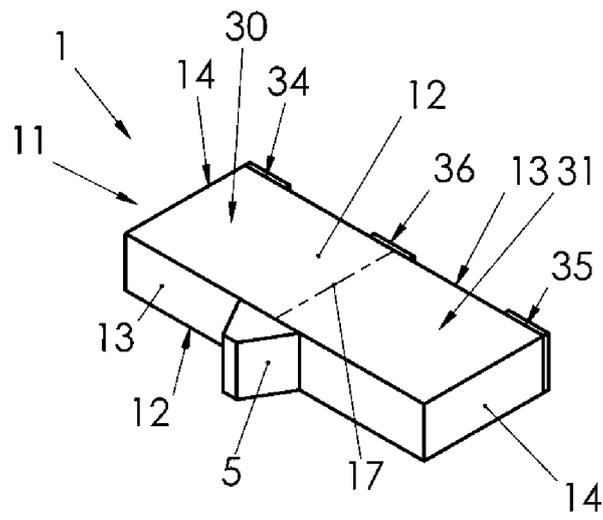
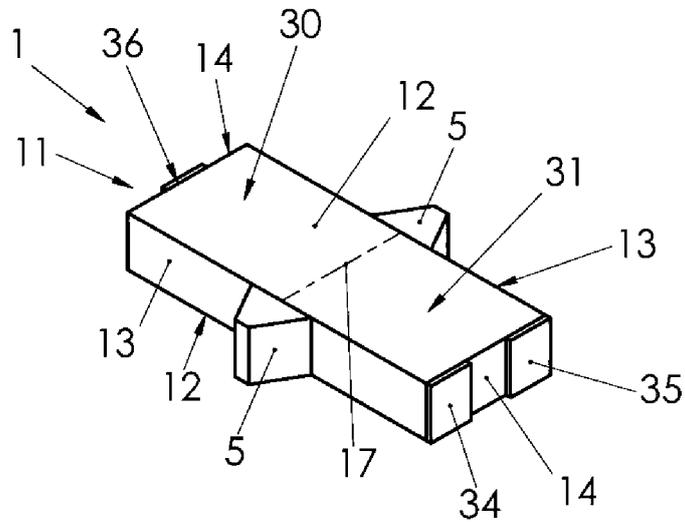


Fig. 6



44



45

Fig. 7

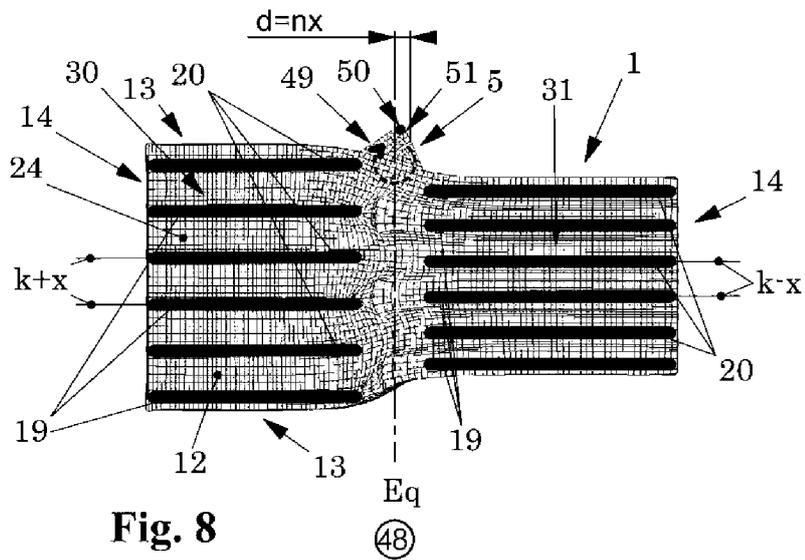
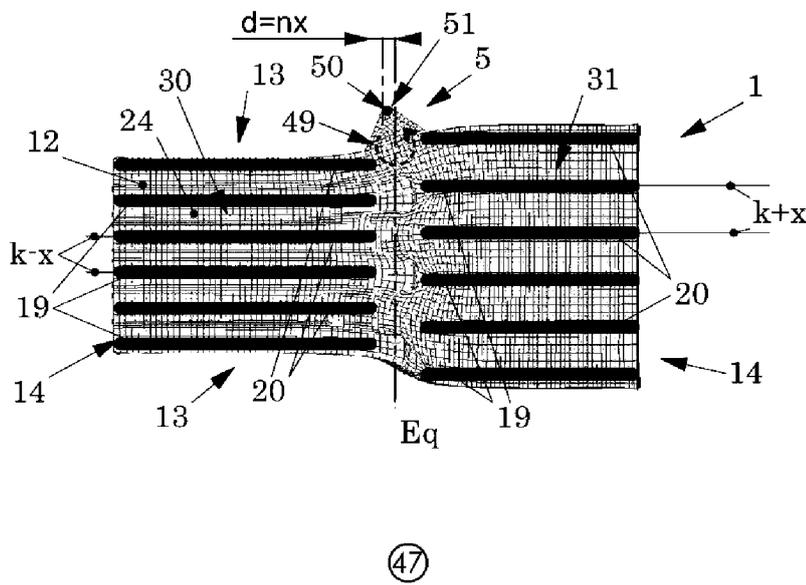
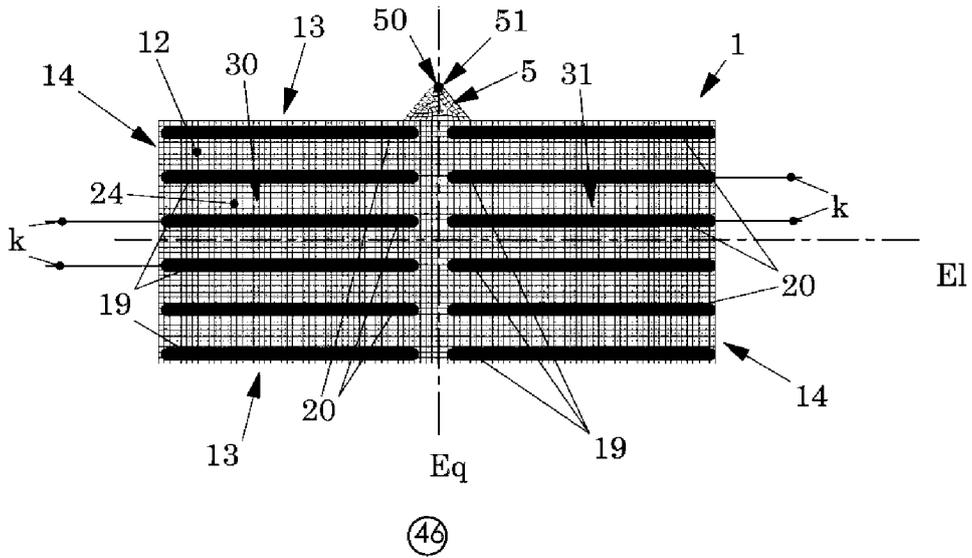


Fig. 8

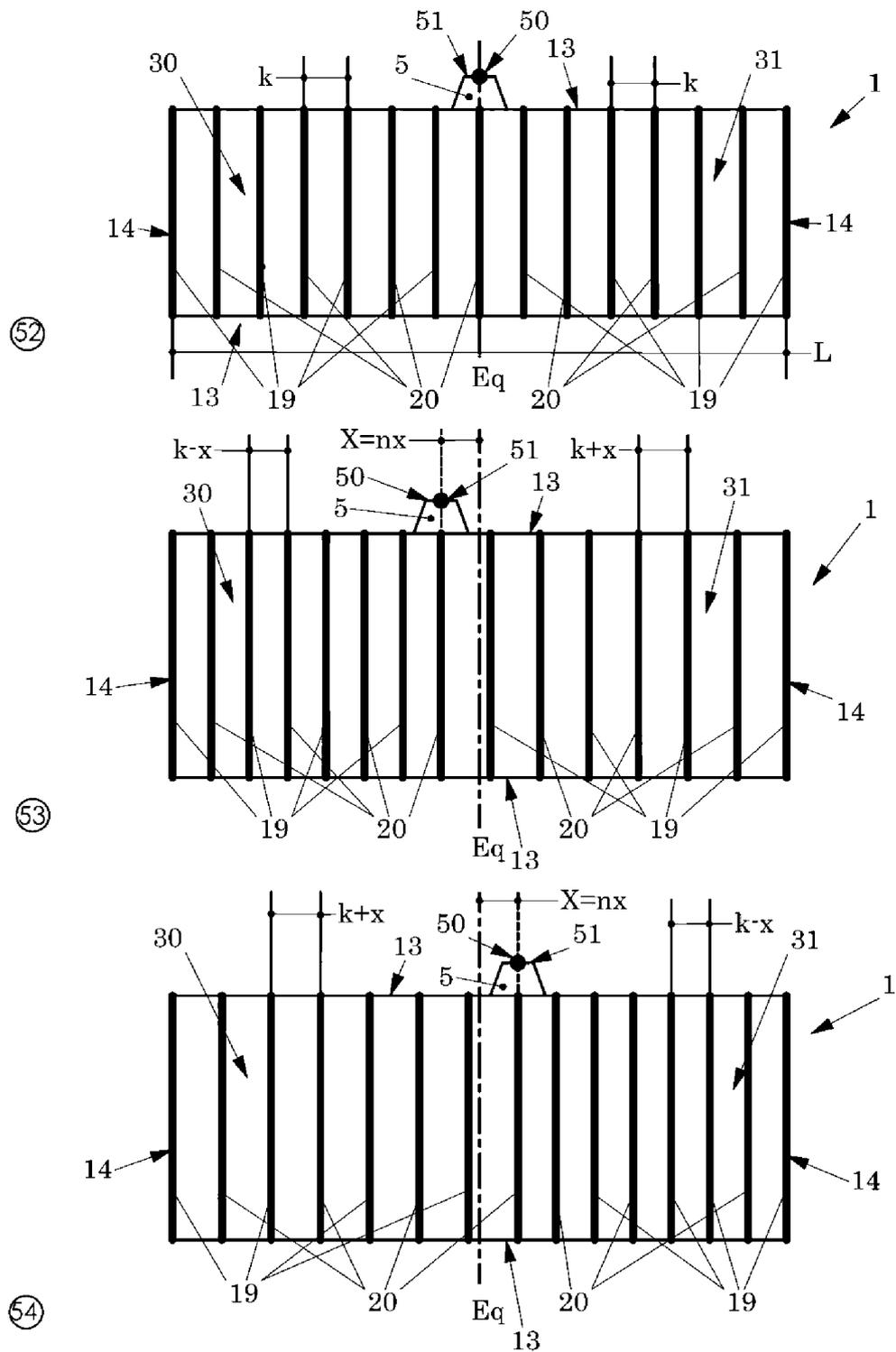


Fig. 9

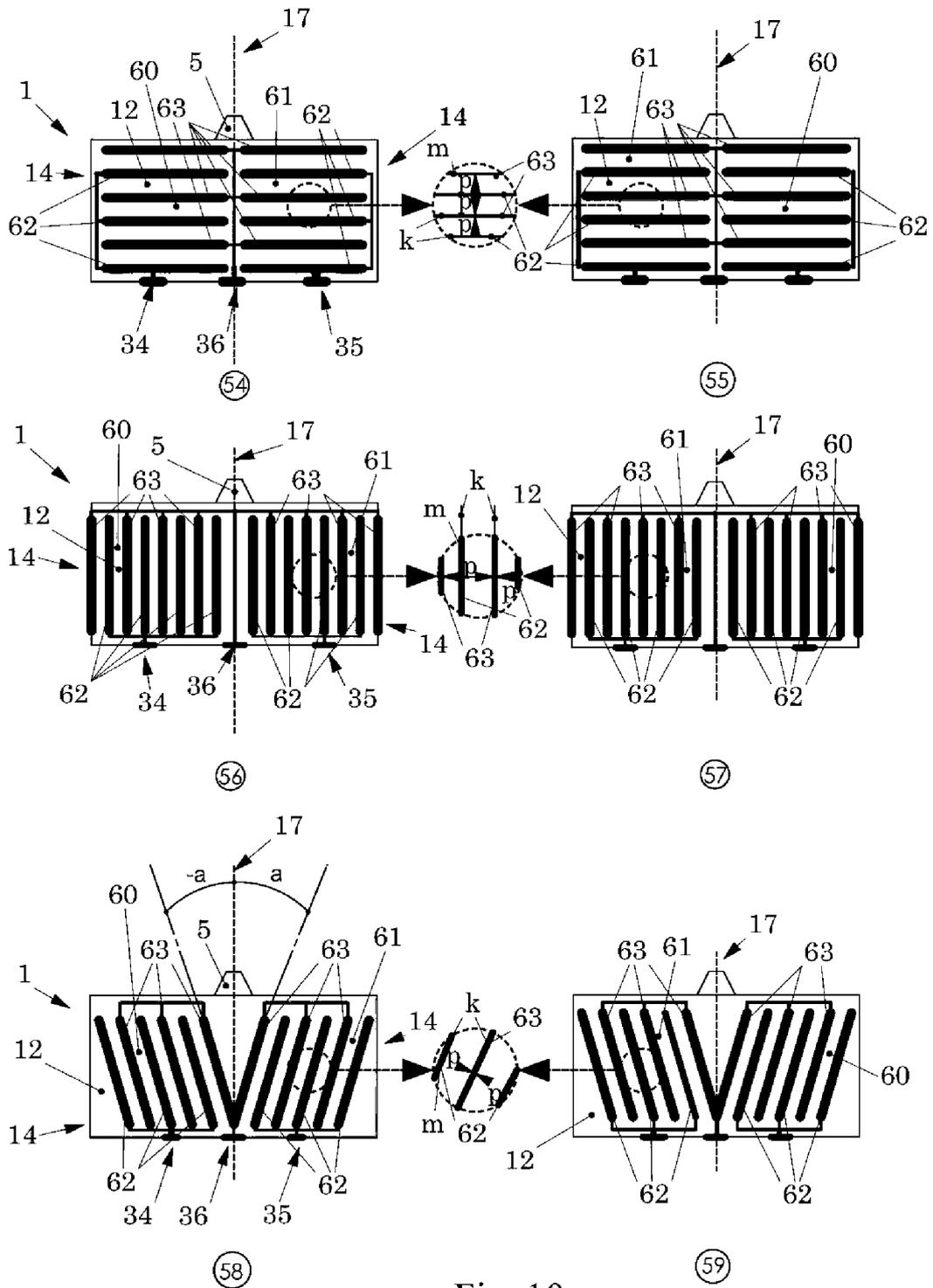


Fig. 10

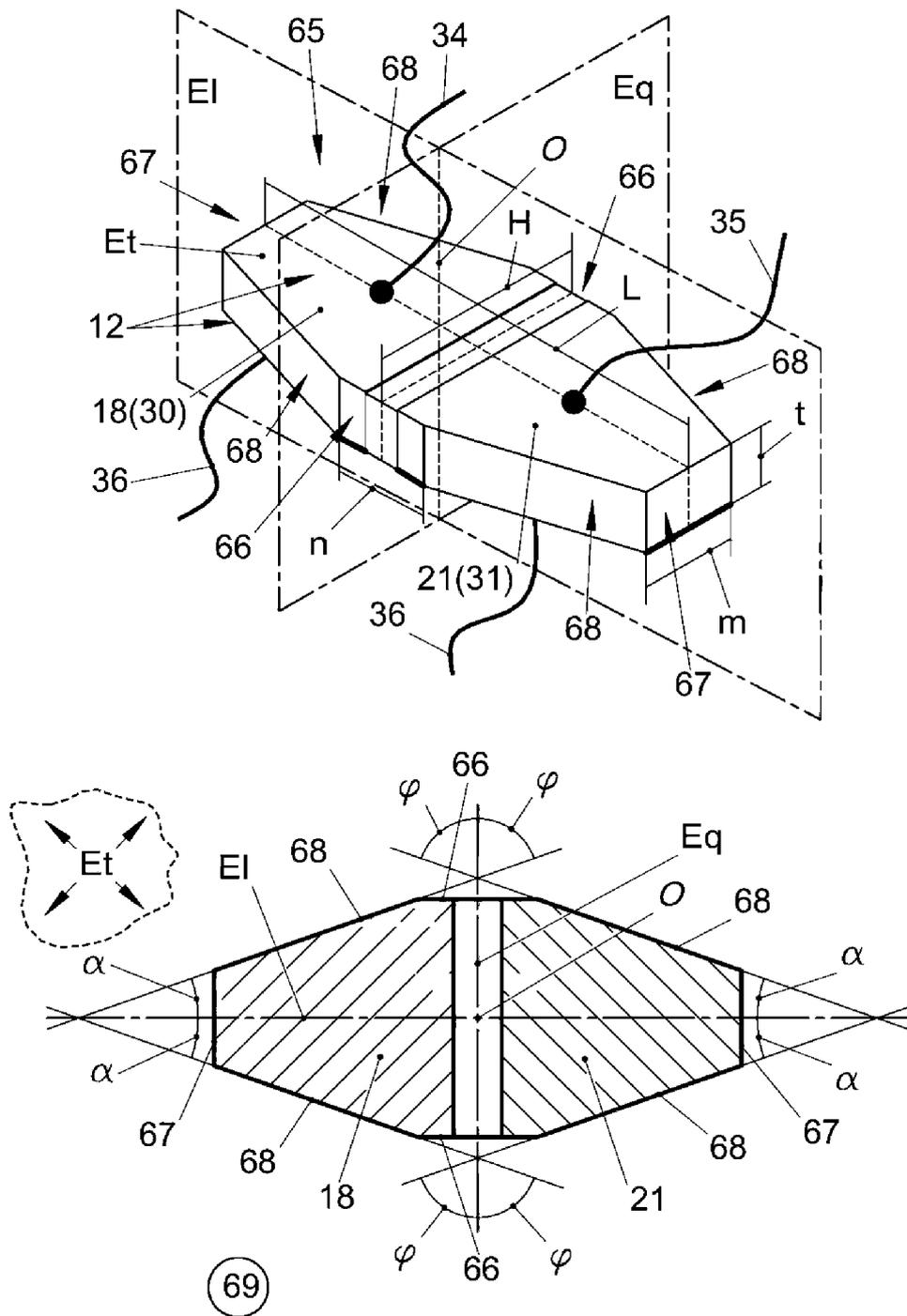


Fig. 11

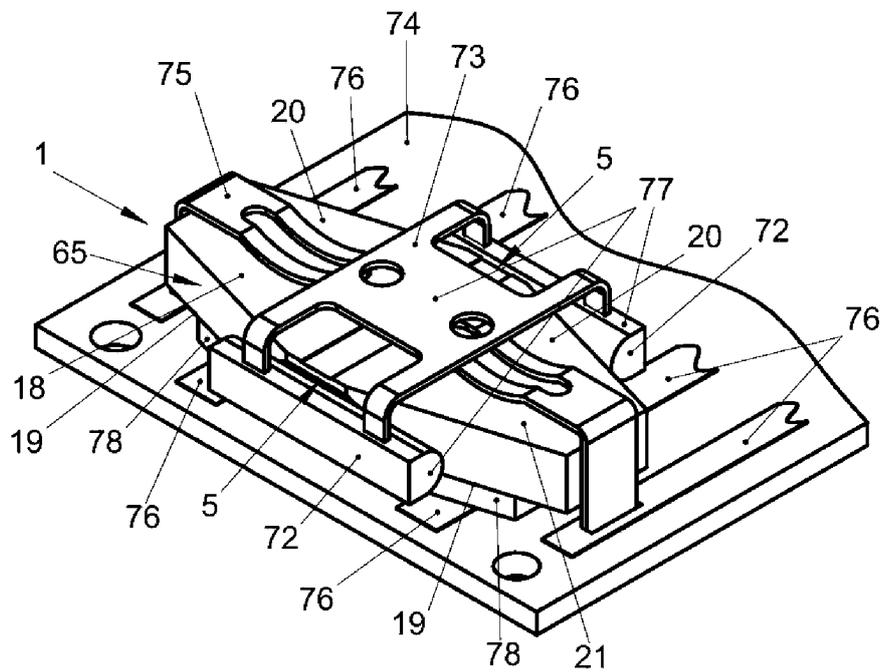


Fig.13

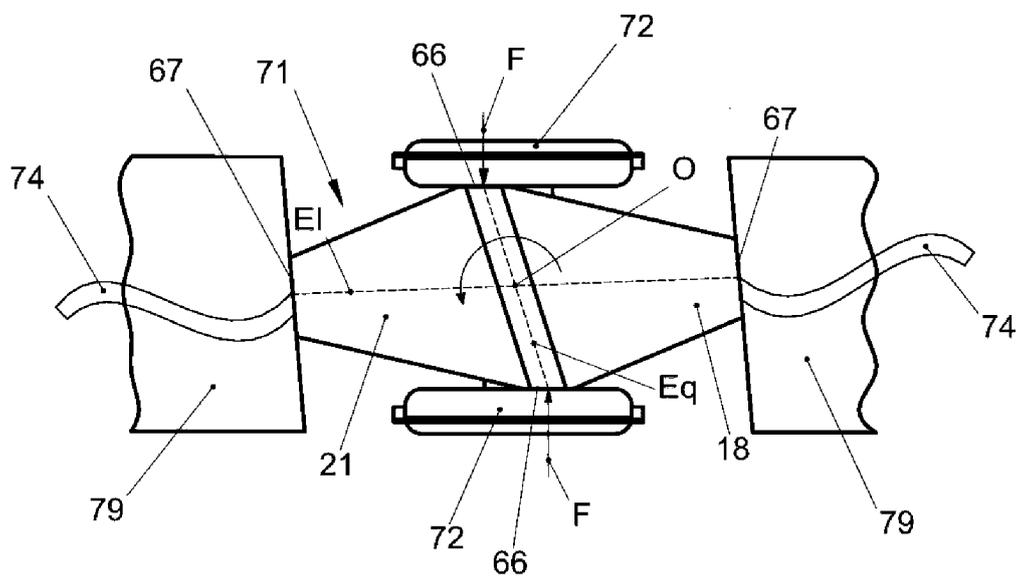
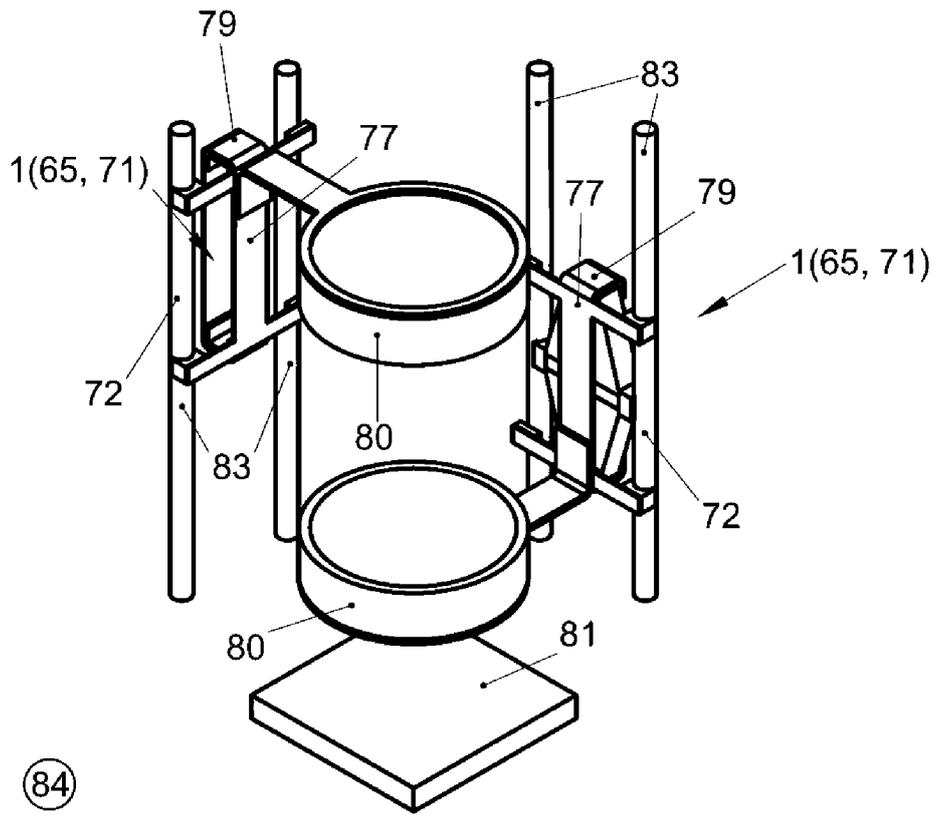
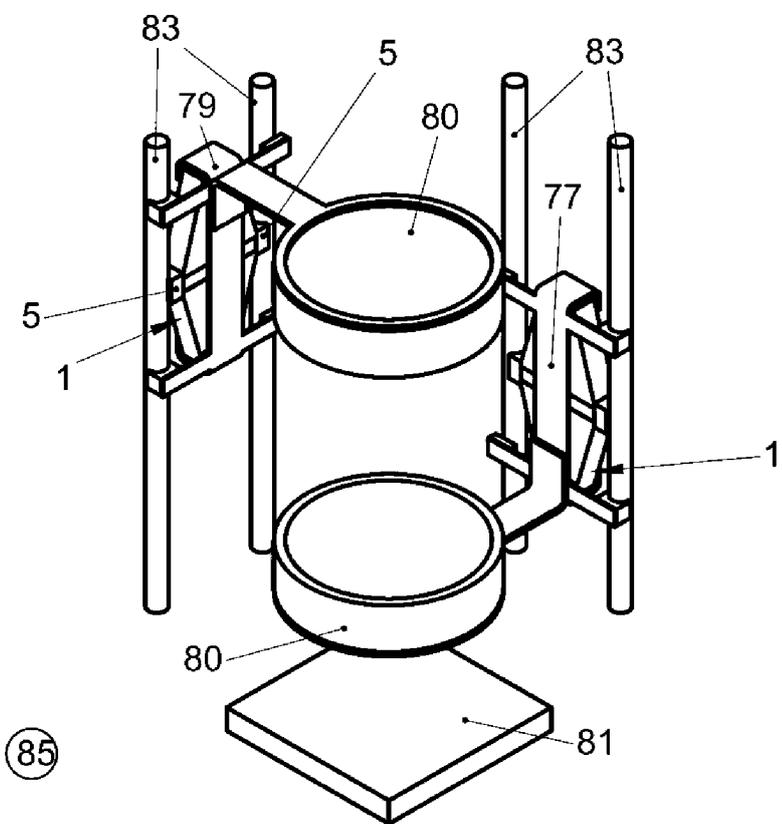


Fig.14



(84)



(85)

Fig.15

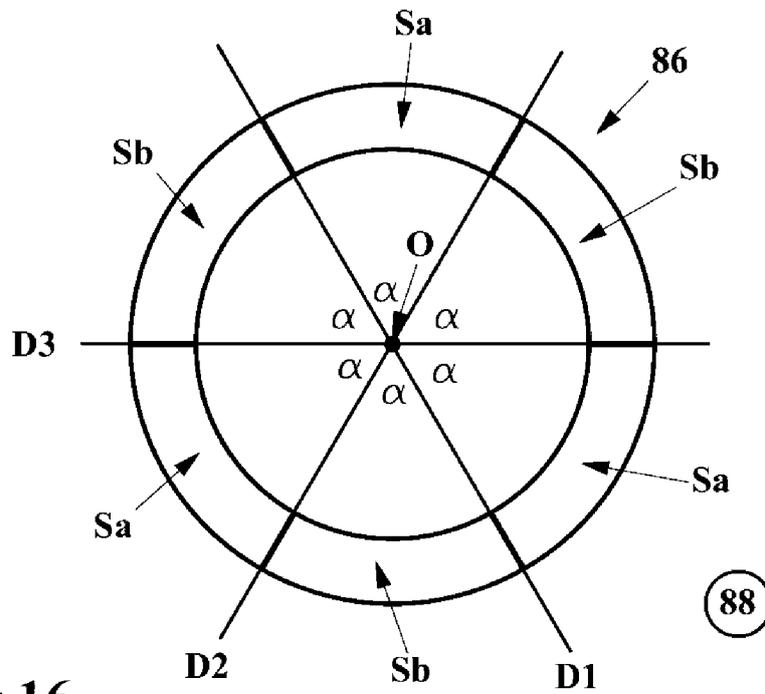
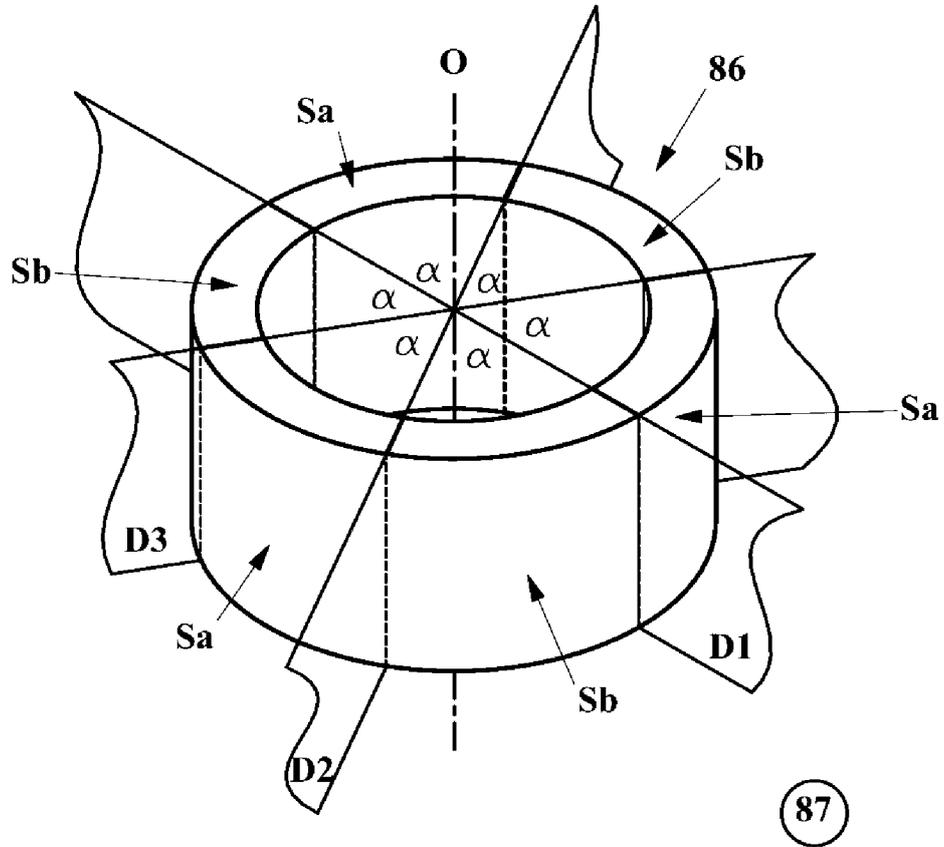
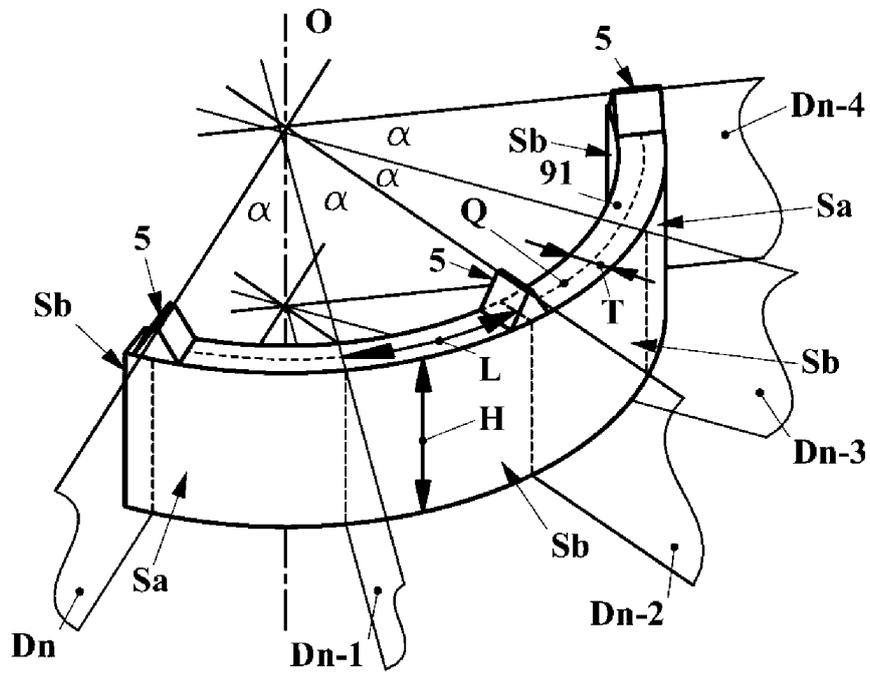
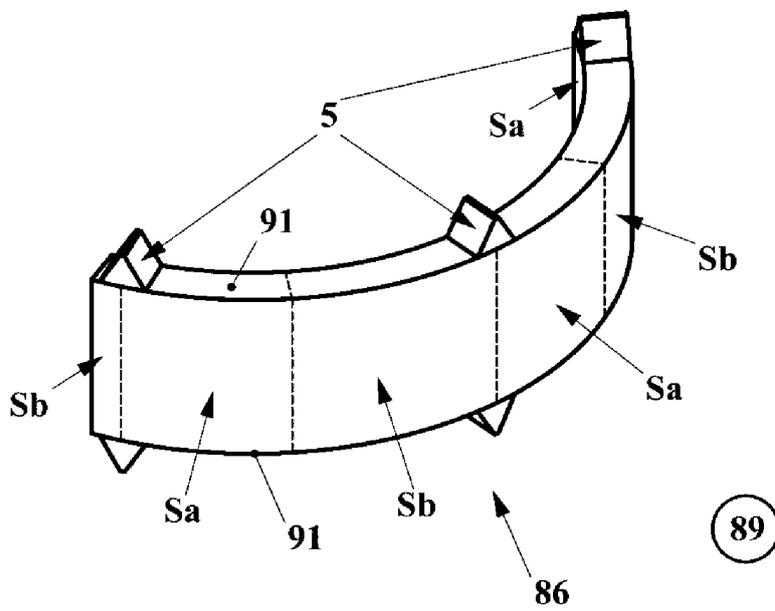


Fig.16



(114)



(89)

Fig. 17

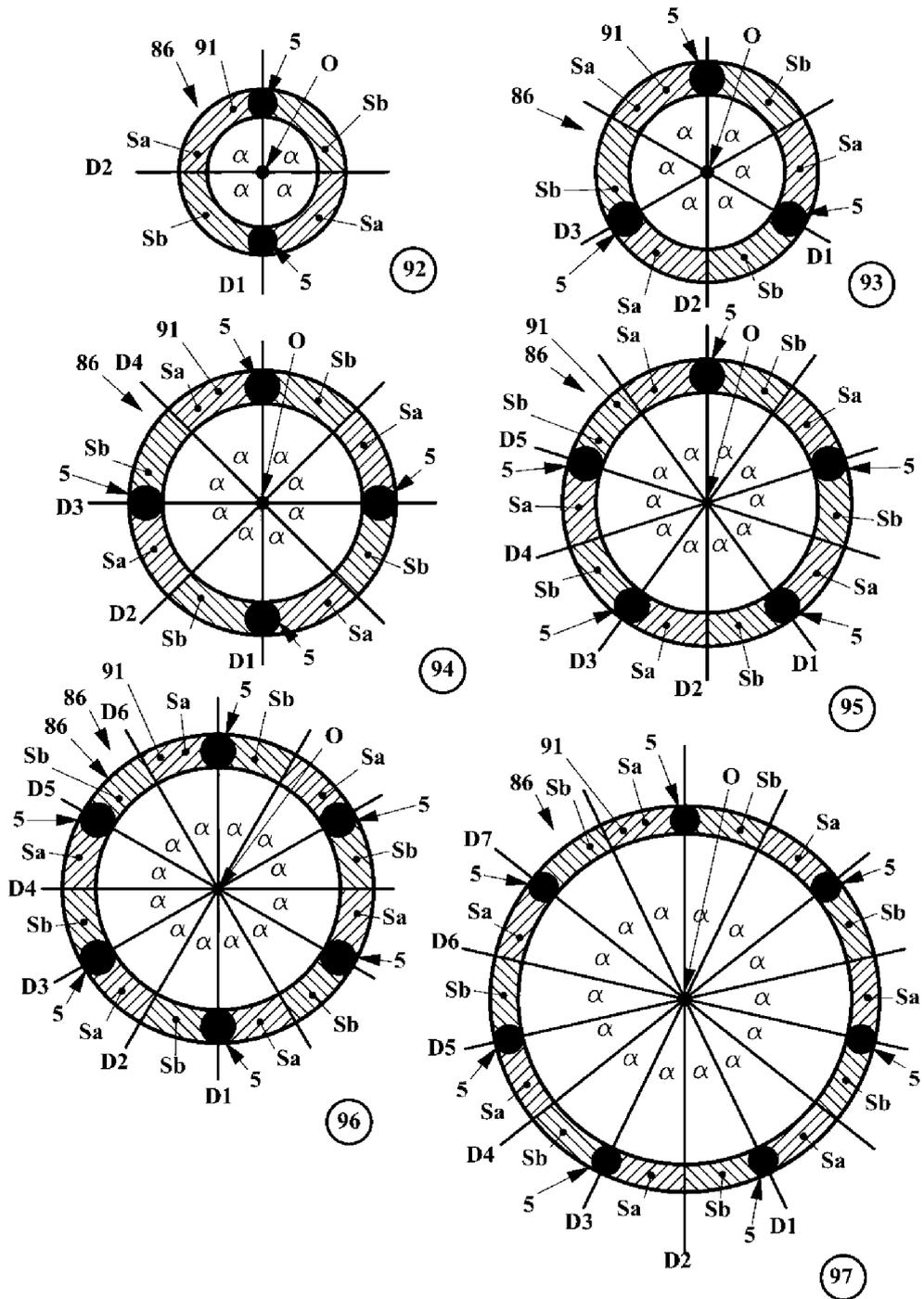


Fig.18

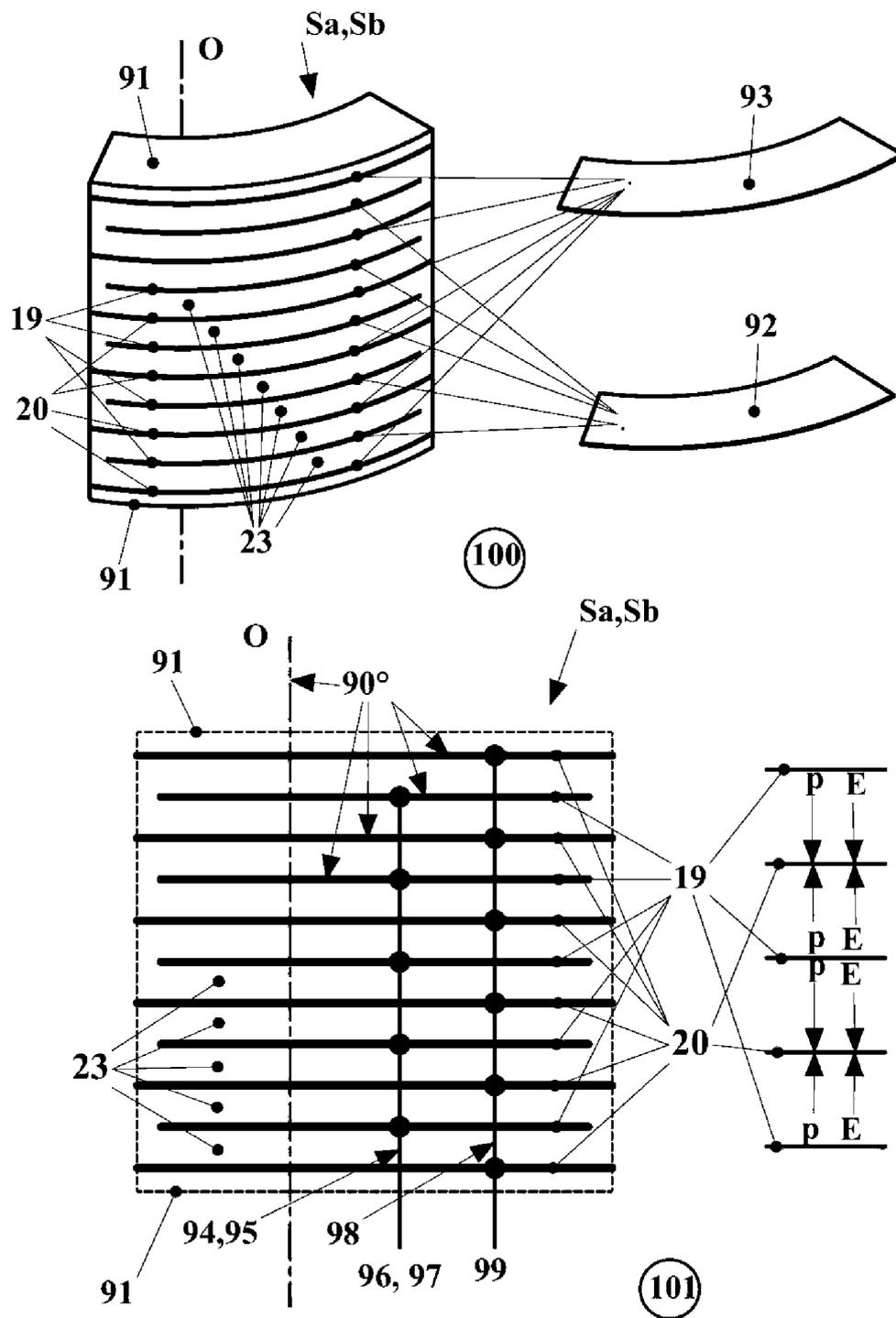


Fig.19

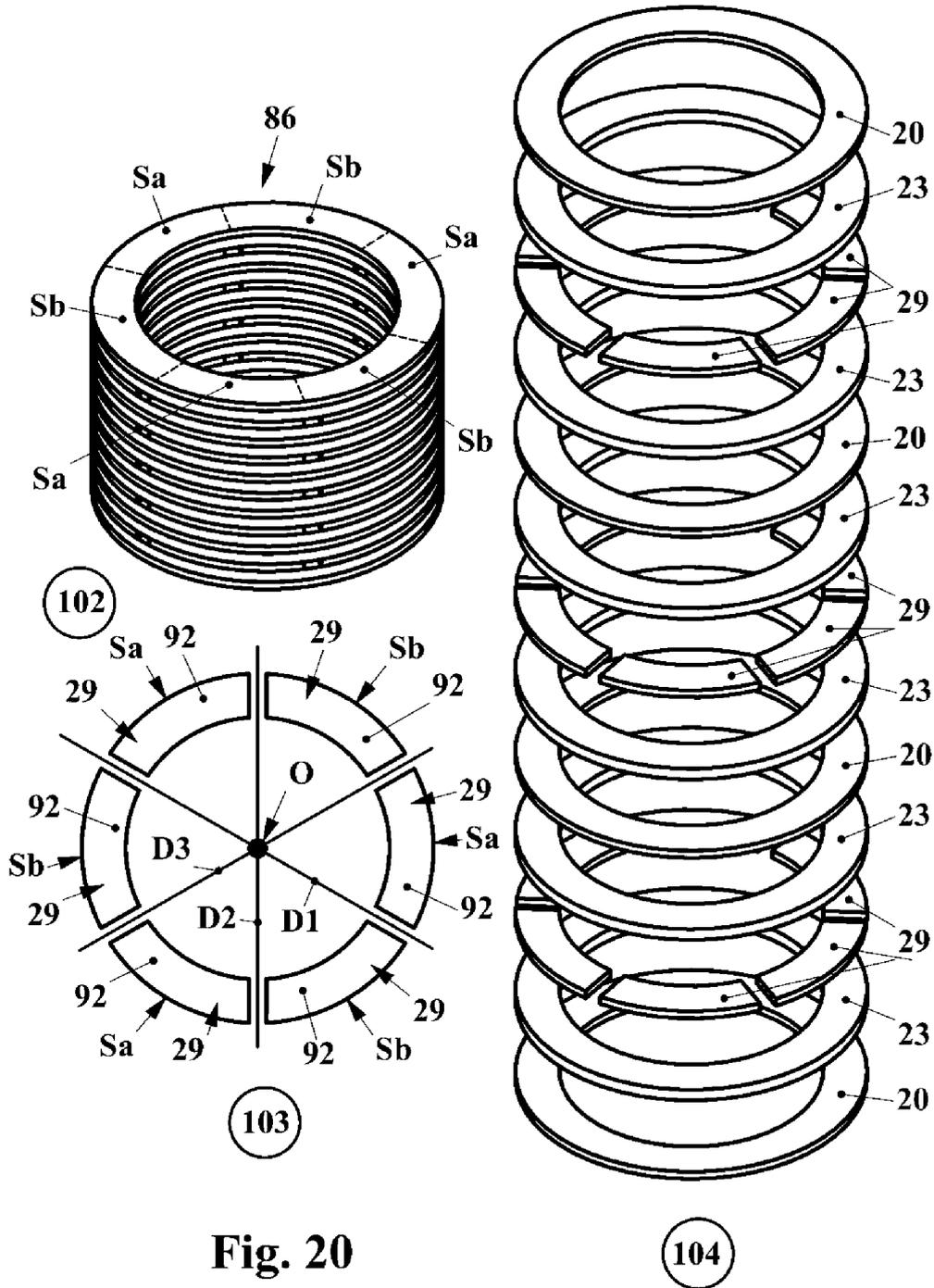


Fig. 20

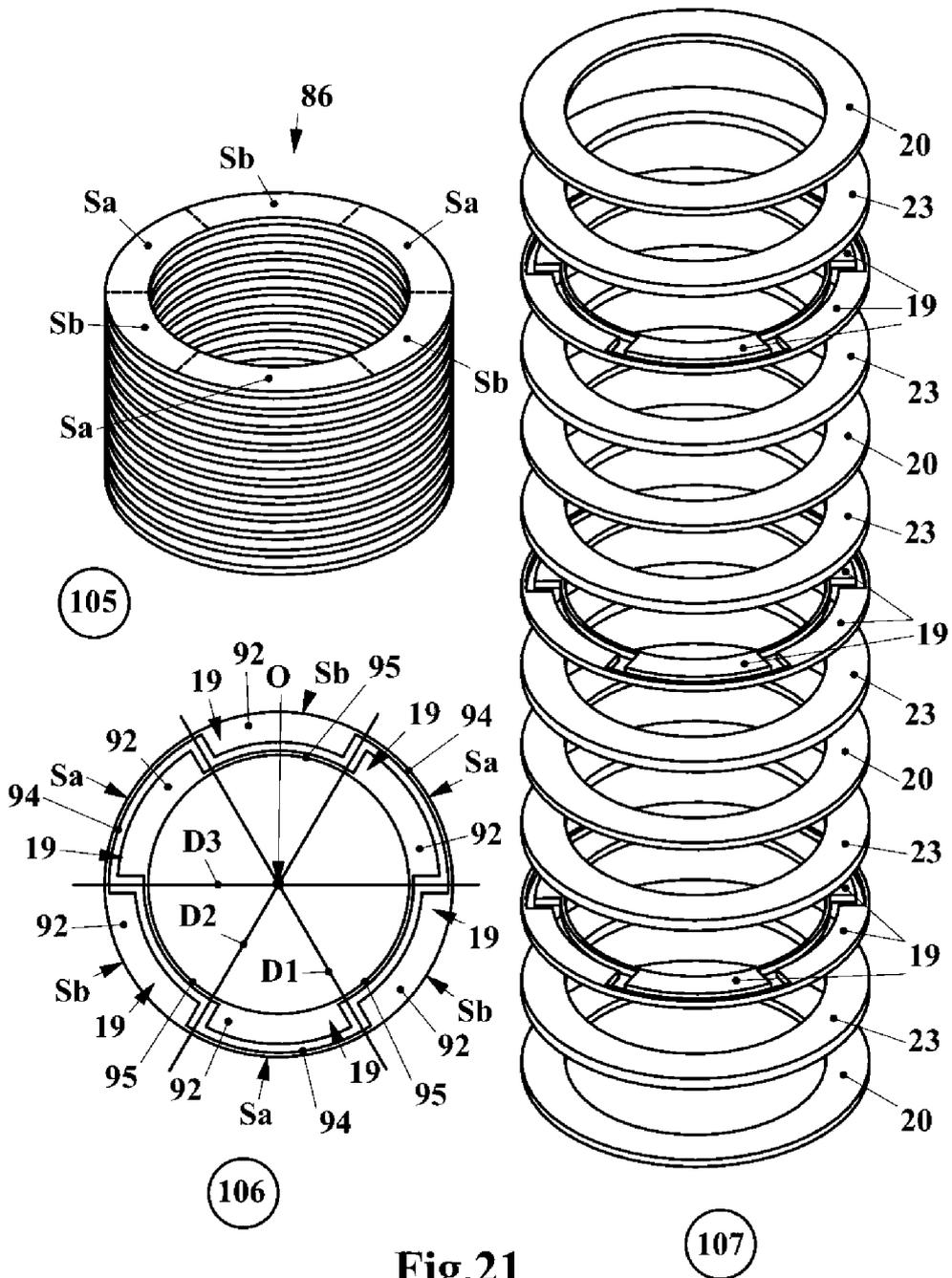


Fig.21

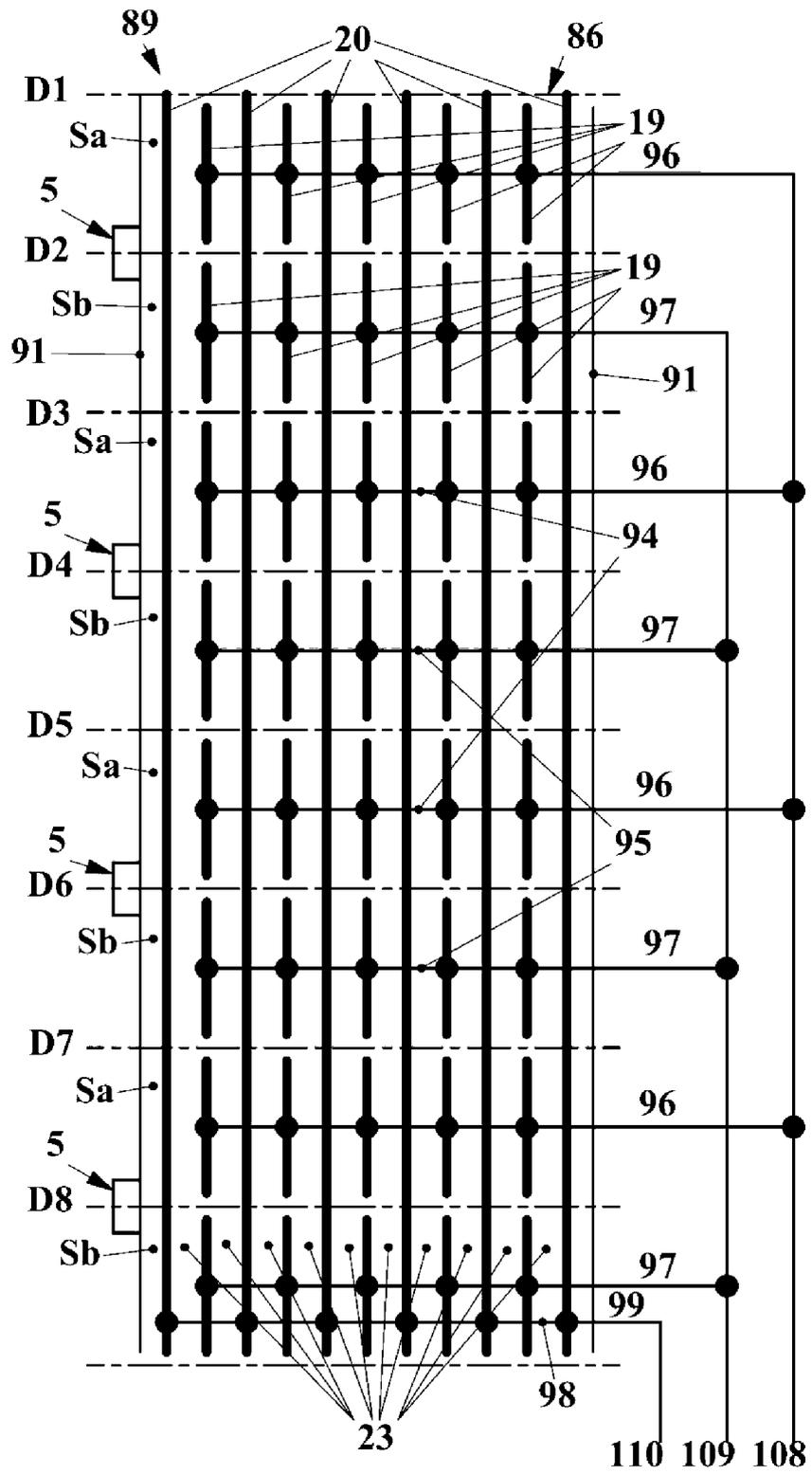


Fig.22

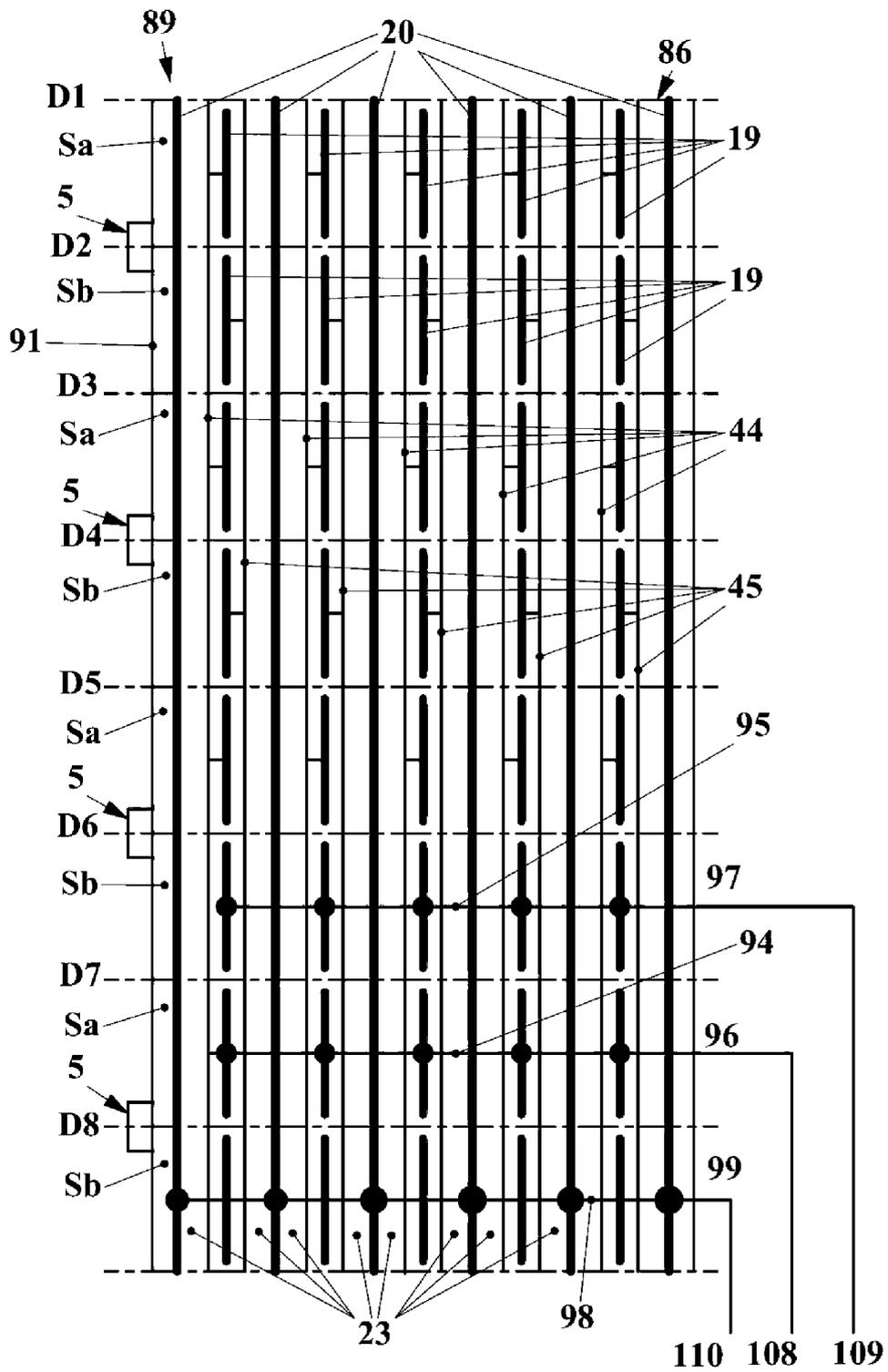


Fig.23

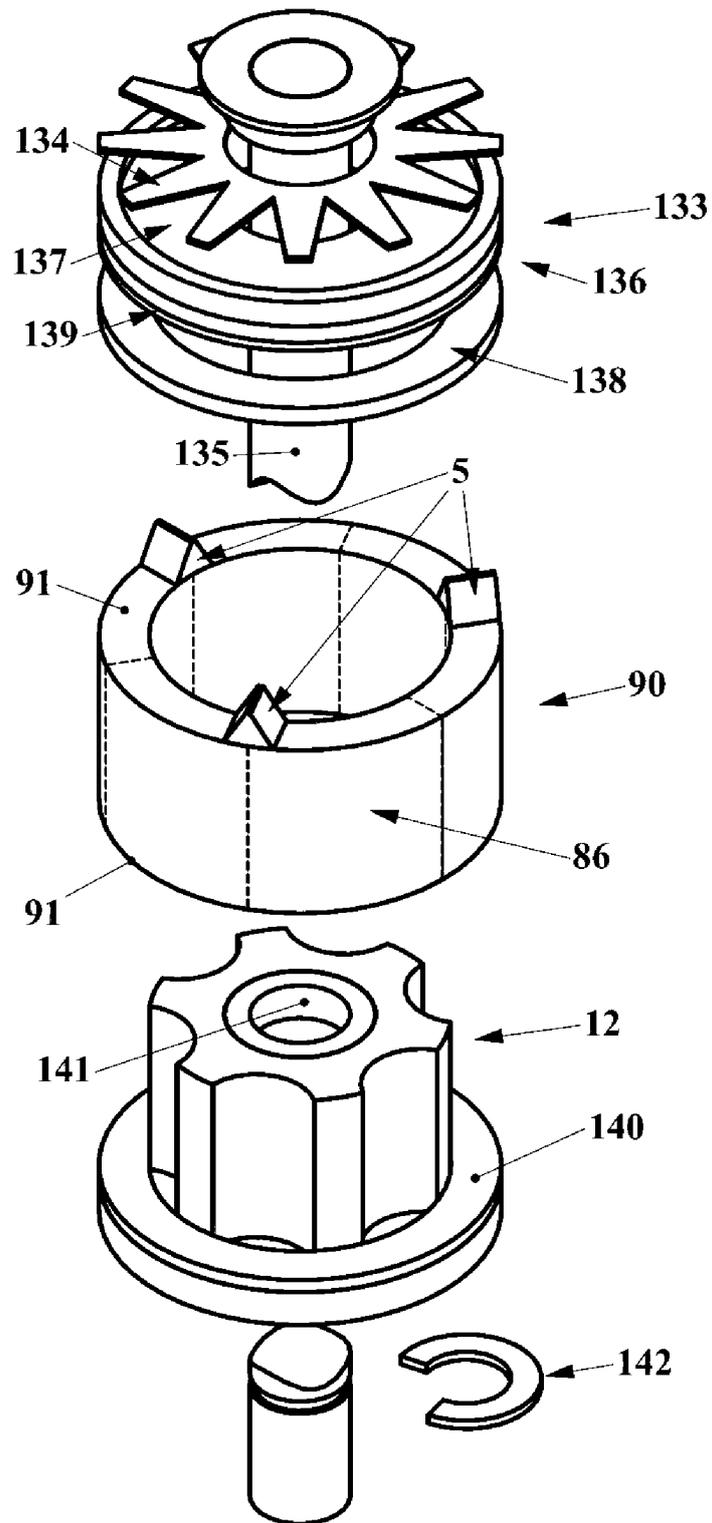


Fig. 24

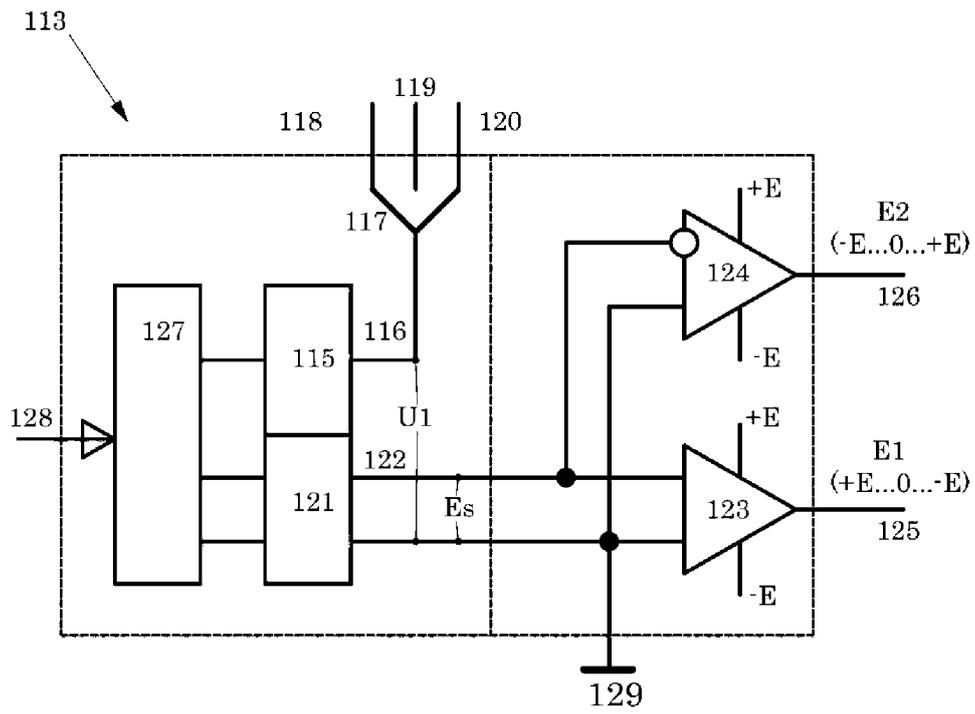


Fig. 26

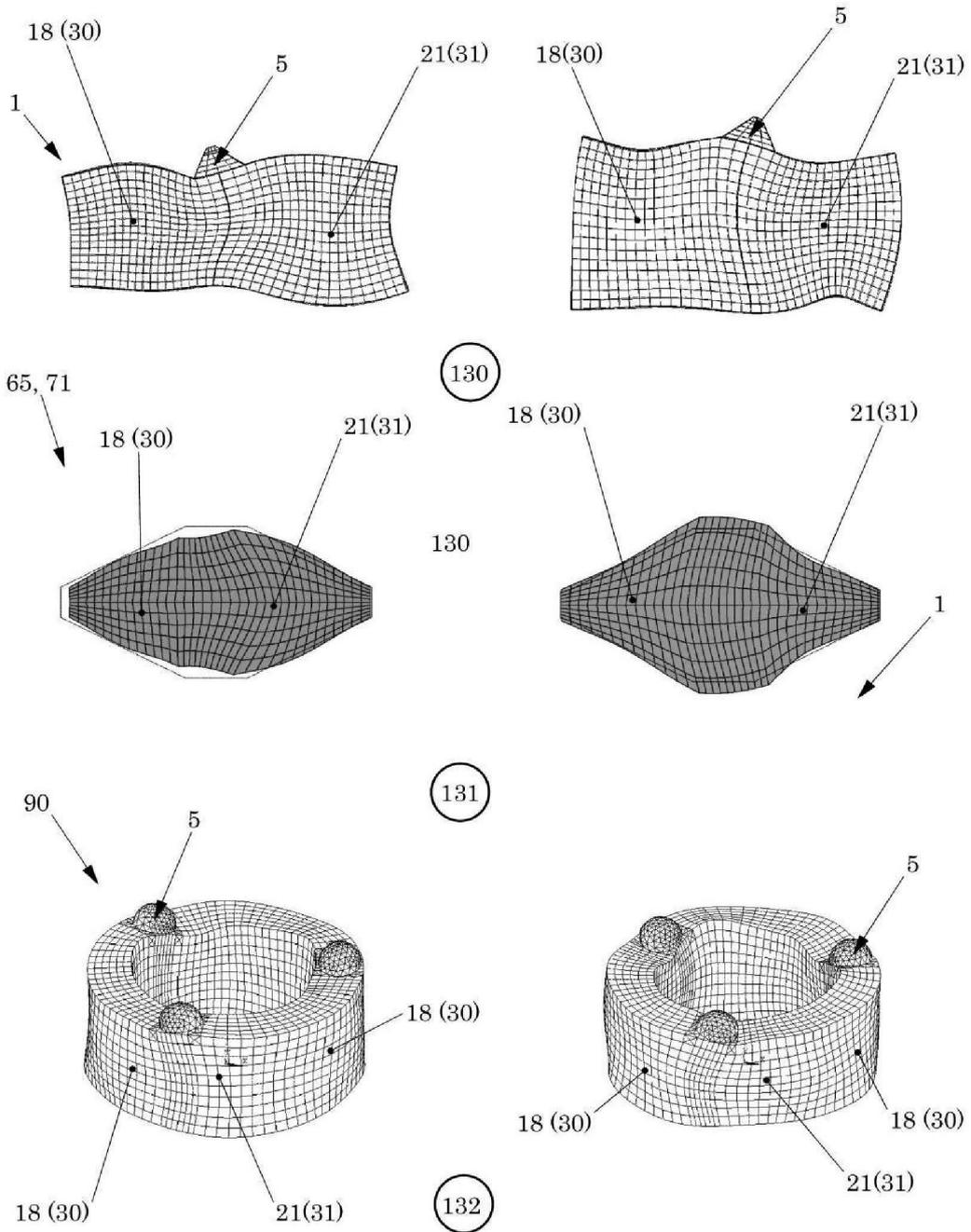


Fig.27

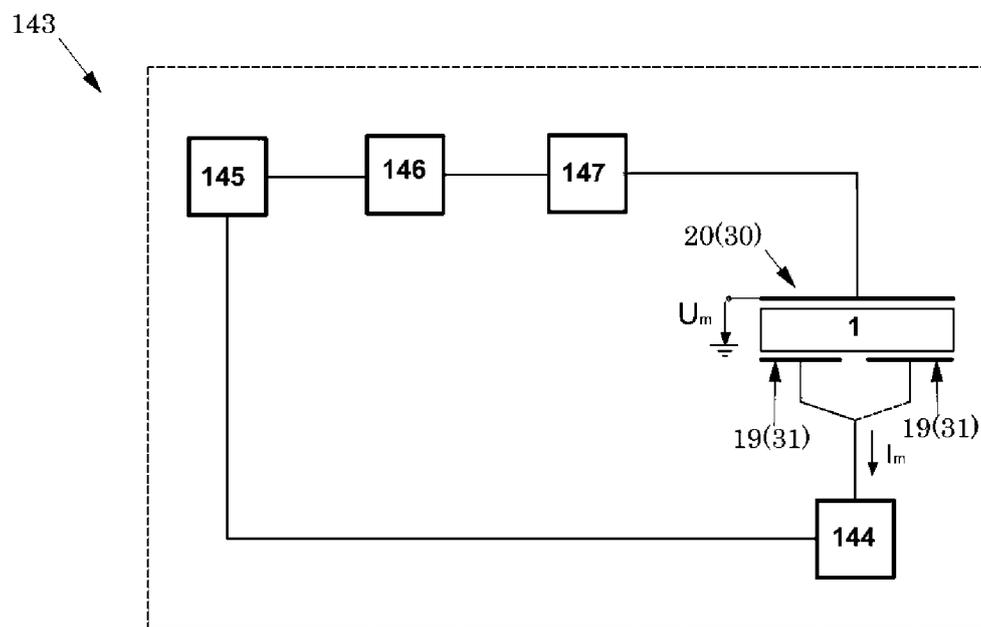


Fig. 28

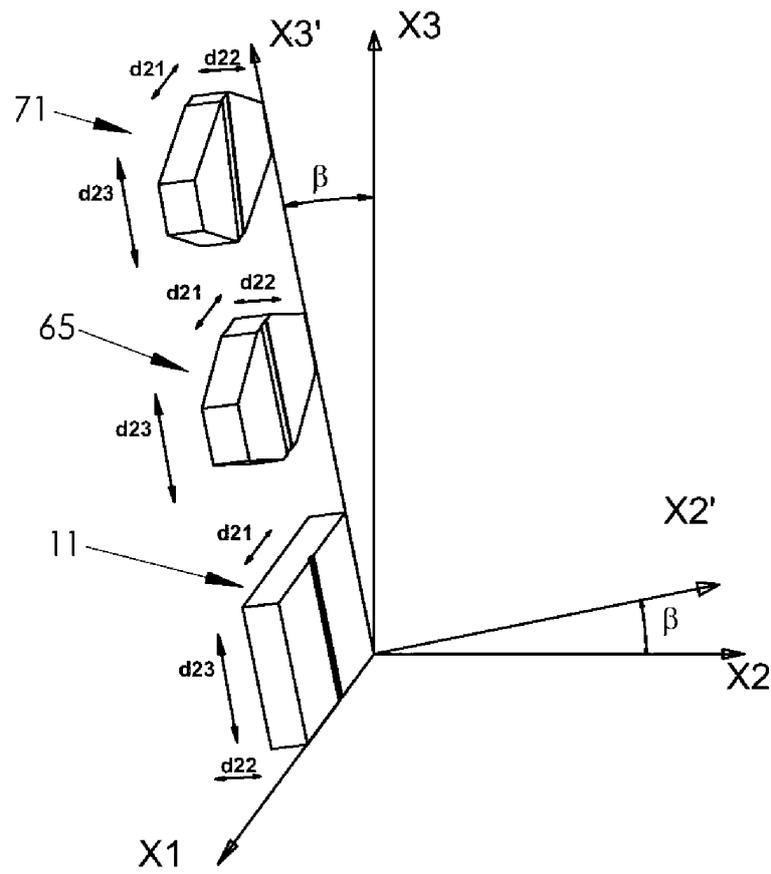


Fig. 29

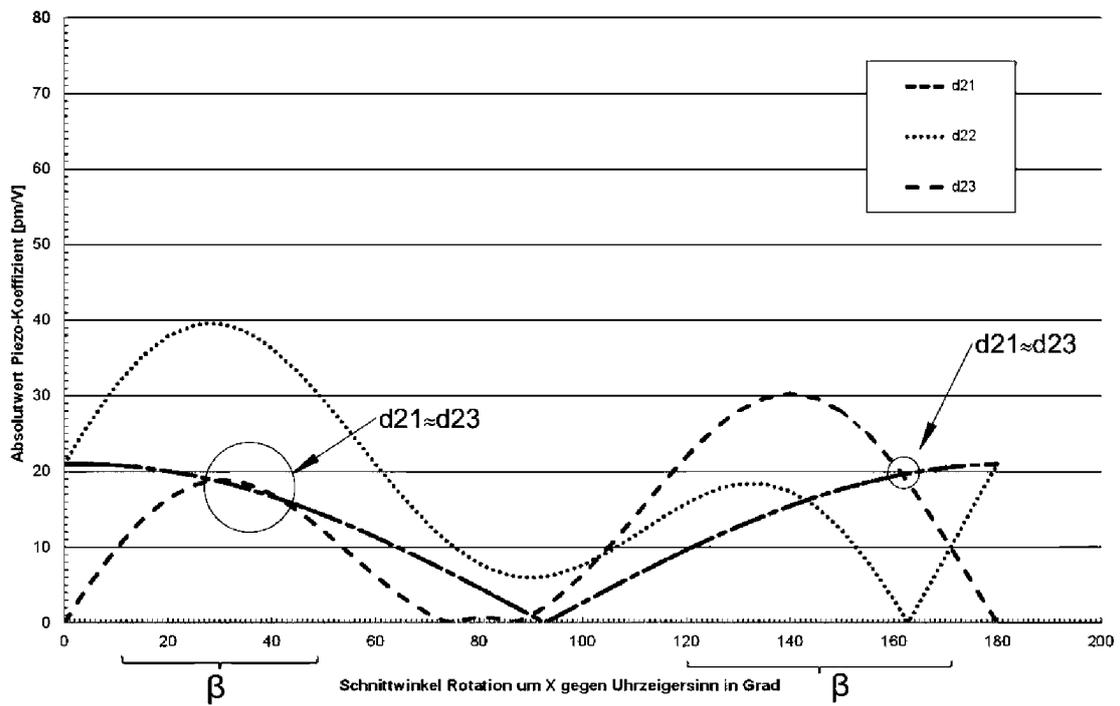


Fig. 30