



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 103 61 481 A1** 2005.02.17

(12)

Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **103 61 481.8**

(22) Anmeldetag: **23.12.2003**

(43) Offenlegungstag: **17.02.2005**

(51) Int Cl.7: **F16F 15/03**

F16F 15/02

(66) Innere Priorität:

103 33 492.0 **22.07.2003**

(71) Anmelder:

**Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der
angewandten Forschung e.V., 80686 München, DE**

(74) Vertreter:

Köllner & Partner, Patentanwälte, 60596 Frankfurt

(72) Erfinder:

**Melz, Tobias, Dr.-Ing., 64285 Darmstadt, DE;
Matthias, Michael, Dr.-Ing., 64287 Darmstadt, DE;
Herold, Sven, Dr., 64297 Darmstadt, DE; Hanselka,
Holger, Prof., 64297 Darmstadt, DE**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

DE 41 42 885 A1

GB 22 22 657 A1

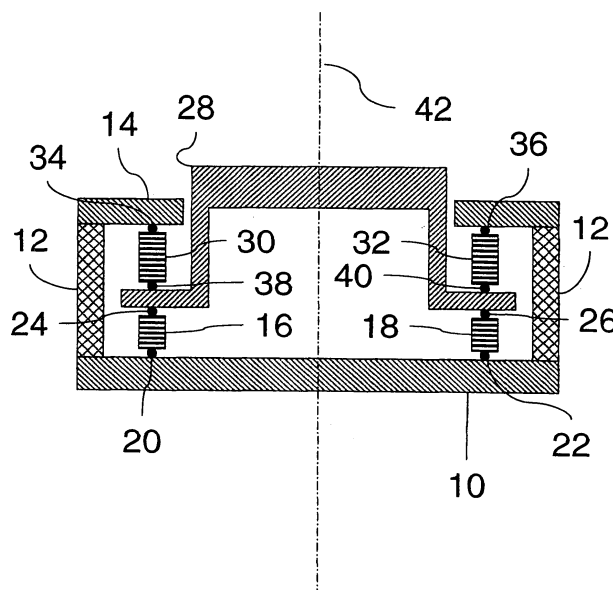
US 50 30 873 A1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

(54) Bezeichnung: **Modulare Schnittstelle zum Dämpfen mechanischer Schwingungen**

(57) Zusammenfassung: Schnittstellen zum Dämpfen mechanischer Schwingungen werden beispielsweise eingesetzt zur Schwingungsdämpfung in der Automobiltechnik oder Luft- und Raumfahrttechnik. Die Schnittstellen weisen ein Basisanschlusselement (10), ein Lastanschlusselement (28) und ein Abstützelement (14) auf, wobei das Abstützelement (14) mit dem Basisanschlusselement (10) über eine Vorspanneinrichtung (12) verbunden ist. Ein erstes Energiewandler-System (16, 18) erstreckt sich zwischen Angriffspunkten (20, 22) auf dem Basisanschlusselement (10) und Angriffspunkten (24, 26) auf dem Lastanschlusselement (28). Ein zweites Energiewandler-System (30, 32) erstreckt sich zwischen Angriffspunkten (34, 36) auf dem Abstützelement (14) und Angriffspunkten (38, 40) auf dem Lastanschlusselement (28).



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft eine Schnittstelle zum Dämpfen oder Isolieren mechanischer Schwingungen mittels mehrerer Energiewandler-Systeme. Derartige Schnittstellen dienen beispielsweise zum Dämpfen von Schwingungen im Bereich des allgemeinen Maschinenbaus, der Automobiltechnik, des Bauingenieurwesens oder der Luft- und Raumfahrt-technik.

[0002] In Maschinen, Fahrzeugen und ähnlichen Baugruppen entstehen, z. B. durch den Betrieb von Aggregaten (beispielsweise Aggregaten zur Stromerzeugung) oder durch sonstige Umgebungsbedingungen erregte, dynamische mechanische Störungen in Form von Schwingungen. Die Frequenzen dieser Schwingungen reichen bis in den höherfrequenten akustischen Bereich und bewirken lokal am Ort der Störereinstellung bzw. der Störeinkunft oder, nach Übertragung über mechanische Lastpfade, weiter entfernt unerwünschte dynamische und/oder akustische Effekte. In der Folge ergeben sich Komforteinbußen, Sicherheitsprobleme, Bauteilschädigungen infolge von struktureller Ermüdung, verminderte Lebensdauer, reduzierte Funktionalitäten, etc.

Stand der Technik

[0003] Zur Dämpfung oder Isolierung mechanischer Schwingungen wird häufig die sogenannte Materialdämpfung eingesetzt, bei der die mechanische Energie der Schwingung unmittelbar in thermische Energie umgesetzt wird. Beispiele hierfür sind elastische oder viskoelastische Dämpfungssysteme.

[0004] Daneben werden zunehmend Maßnahmen eingesetzt, die auf weiteren Energiewandler-Systemen beruhen. Diese Energiewandler-Systeme wandeln i. d. R. mechanische in elektrische Energie um und umgekehrt. Beide Effekte werden für die Dämpfung mechanischer Schwingungen eingesetzt. Man unterscheidet dabei in der Regel zwischen aktiven, semi-aktiven und passiven Schwingungsdämpfern.

[0005] Bei der passiven und semi-aktiven Schwingungsdämpfung wird die mechanische Energie der Schwingungen mit Hilfe eines elektrisch-mechanischen Energiewandlers (z. B. einer Piezokeramik) zunächst in elektrische Energie umgewandelt. Diese elektrische Energie wird dann im Fall der passiven Schwingungsdämpfung in einer passiven elektrischen Schaltung (z. B. einem ohmschen Widerstand) dissipiert, d. h. in thermische Energie umgewandelt, bzw. im Fall der semi-aktiven Schwingungsdämpfung mit Hilfe einer aktiven elektrischen Schaltung umgeleitet (z. B. elektrischer Tilger). Derartige Systeme werden beispielsweise in N.W. Hagood and A. von Flotow: Damping of Structural Vibrations with Piezoelectric Materials and Passive Electrical Networks,

Journal of Sound and Vibration 146 (2), 243 (1991), beschrieben.

[0006] Bei der aktiven Schwingungsisolierung wird zwischen einer Störquelle (Basisseite) und einer Anschlussseite mindestens ein Aktuator-System geschaltet. Als "Aktuator" wird in diesem Zusammenhang ein Energiewandler bezeichnet, welcher z. B. elektrische Signale in mechanische Bewegungen umwandeln kann, beispielsweise ein Piezo-Aktuator oder ein pneumatischer Aktuator. Entscheidend ist, dass die Charakteristik (z. B. Ausdehnung) der Aktuatoren durch ein Ansteuersignal kontrolliert veränderbar ist. Ein Beispiel für ein System zur aktiven Schwingungsisolierung mit Hilfe von Aktuator-Elementen ist in der US 5,660,255 offenbart. Zwischen einer Basisgehäuse und einer zu isolierenden Nutzlast werden Aktuator-Elemente, sowie eine kleine zusätzliche Masse eingebracht. Auf der kleinen Masse sind Sensoren angebracht, welche die Verschiebung der kleinen Masse registrieren. Aus der Verschiebung wird mit Hilfe einer elektronischen Regelung und einer externen elektrischen Energiequelle ein Stellsignal für die Aktuator-Elemente generiert. Die Aktuator-Elemente werden so angesteuert, dass die Schwingungsbewegung am Ort der Nutzlast weitgehend eliminiert wird.

[0007] Fig. 1 zeigt einen Satelliten als Beispiel für eine aktive Entkopplung von Störquellen und sensiblen Komponenten, die mechanisch nicht gestört werden sollten. Der Satellit enthält interne Störquellen **1**, etwa mechanische Kühler, Motoren, etc. Die mechanischen Störungen dieser Störquellen **1** werden durch aktive Elemente **2, 3, 4** gedämpft, so dass sich die Störungen nicht von den Störquellen **1** über Übertragungswege **3, 4** auf die empfindlichen Komponenten **5** (Kameras, Reflektoren, etc.) auswirken.

[0008] Neben der Nutzung zur aktiven, passiven und semi-aktiven Schwingungsdämpfung können die elektrisch-mechanischen Energiewandler oft auch gleichzeitig als Stellglieder zur mechanischen Positionierung einer Nutzlast genutzt werden. Dies kann beispielsweise dadurch erfolgen, dass eine ringförmige Anordnung einer Mehrzahl von Aktuatoren in eine schwingungsreduzierende Schnittstelle integriert wird, welche z. B. eine gezielte Verkipfung einer Struktur gegenüber einer Basis bewirken kann. Ein derartiges System wird beispielsweise in DE 195 27 514 C2 offenbart.

[0009] Aus konstruktiven Gründen werden Aktuator-Systeme in der Praxis häufig mit einer Vorlast betrieben. Häufig handelt es sich dabei um eine mechanische Vorlast in Form einer Druck- oder Zugbelastung auf das Aktuator-System. Bei Piezo-Aktuatoren beispielsweise, bei denen eine Ausdehnung über die Ruhelänge (d. h. Länge des Aktuators ohne beaufschlagte Spannung) hinaus zu mechanischen Be-

schädigungen des Aktuators führen würde, ist ein Betrieb ohne Vorspannung praktisch nicht sinnvoll bzw. nicht möglich. Die konstruktive Realisierung einer Vorrichtung zum Ausüben einer Vorspannung stellt jedoch insbesondere bei dem bzw. den Aktuatoren ein Problem dar, deren Ausdehnungsrichtung sich parallel zu der von der Nutzlast ausgeübten Kraft (beispielsweise der Gewichtskraft) erstreckt und somit eine häufig negative Auswirkung auf die aktuatorische Wirksamkeit hat. In US 5,660,255 ist keine befriedigende Lösung dieses Problems offenbart.

[0010] In DE 195 27 514 C2 wird eine Schnittstelle zur Schwingungsreduktion in strukturdynamischen Systemen offenbart, bei der eine Schwingungsisola-tion zwischen einem strukturseitigen Bauteil und einem basisseitigen Bauteil durch eine Mehrzahl von eine Hauptrichtung aufweisenden Aktuatoren erfolgt. Eine Druckvorspannung auf die Aktuatoren wird durch Dehnschrauben zwischen dem basisseitigen Bauteil und dem strukturseitigen Bauteil gewährleistet. Eine derartige starre mechanische Verbindung zwischen dem basisseitigen Bauteil und dem strukturseitigen Bauteil hat jedoch den Nachteil, dass dadurch eine Brücke geschaffen wird, über die sich Schwingungen von einer basisseitigen Störquelle zum strukturseitigen Bauteil ausbreiten können.

Aufgabenstellung

[0011] Aufgabe der vorliegenden Erfindungen ist es, eine möglichst schallübertragungsarme Schnittstelle zur Schwingungsreduktion anzugeben, welche zur aktiven, semi-aktiven und passiven Schwingungsisolierung sowie zu einer mechanischen Positionierung einer Last genutzt werden kann.

Lösung

[0012] Diese Aufgabe wird durch die Erfindung mit den Merkmalen des unabhängigen Anspruchs gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen gekennzeichnet.

[0013] Es wird eine Schnittstelle zur Reduktion mechanischer Schwingungen vorgeschlagen, welche ein Basisanschlusselement, ein Lastanschlusselement und mindestens ein Abstützelement aufweist. Dabei erstreckt sich zwischen mindestens einem auf dem Basisanschlusselement liegenden Angriffspunkt und mindestens einem auf dem Lastanschlusselement liegenden Angriffspunkt mindestens ein erstes Energiewandler-System.

[0014] Das Energiewandler-System kann je nach Anwendung und Anforderungen auf verschiedenen physikalischen Prinzipien beruhen. Als besonders vorteilhaft haben sich insbesondere Piezo-Aktuatoren erwiesen. Aber auch Aktuatoren, die auf sogenannten Formgedächtnislegierungen oder anderen

Materialien mit Gedächtnis-Effekt basieren, sowie magneto- oder elektrostriktive Aktuatoren, pneumatische oder hydraulische Aktuatoren, magneto- oder elektrorheologische Flüssigkeits-Aktuatoren und Dämpfungselemente lassen sich vorteilhaft einsetzen. Auch Kombinationen verschiedener Energiewandler-Systeme sind möglich, beispielsweise die Kombination (z. B. eine Serien- oder Parallelschaltung) eines Piezo-Aktuators mit einem "konventionellen" Dämpfungssystem, wie beispielsweise eine Federsystem oder einem Gummidämpfer.

[0015] Federsysteme oder elastische Materialien lassen sich in Kombination mit Piezo-Aktuatoren auch einsetzen, um eine Vorlast auf den Piezo-Aktuator zu erzeugen oder eine bestehende Vorlast zu erhöhen. Auch Schwingungen in unterschiedlichen Frequenzbereichen lassen sich durch Kombination verschiedener Wirkprinzipien und Energiewandler-Systeme ausgleichen, also z. B. hochfrequente Schwingungen durch aktive oder passive Dämpfung mittels Piezo-Aktuatoren, niederfrequente Schwingungen durch konventionelle Dämpfungselemente (z. B. viskoelastische Dämpfer).

[0016] Zwischen mindestens einem auf dem Abstützelement liegenden Angriffspunkt und mindestens einem auf dem Lastanschlusselement liegenden Angriffspunkt erstreckt sich mindestens ein zweites Energiewandler-System. Für die Auswahl und die Zusammensetzung dieses zweiten Energiewandler-Systems gelten die oben angeführten Beschreibungen zum ersten Energiewandler-System sinngemäß.

[0017] Das Basisanschlusselement ist mit dem mindestens einen Abstützelement über mindestens eine Vorspanneinrichtung derart verbunden, dass durch die Vorspanneinrichtung eine Vorlast auf das erste und das zweite Energiewandler-System ausgeübt werden kann. Bei dieser Vorlast kann es sich beispielsweise um eine mechanische Druck- oder Zugbelastung handeln. Wahlweise ist auch ein Betrieb mit der Vorlast Null möglich, also ein Betrieb bei dem keine Kraft auf die Energiewandler-Systeme ausgeübt wird. Wahlweise kann diese Vorlast (auch die Vorlast Null) noch beispielsweise mit einer elektrischen Vorlast kombiniert werden. Die Vorspanneinrichtung kann elastisch oder inelastisch sein. Die Vorlast kann direkt oder indirekt auf die Energiewandler-Systeme ausgeübt werden, also beispielsweise auch indirekt über ein zusätzliches Federsystem.

[0018] Das Lastanschlusselement soll einen in einem Zwischenraum zwischen dem Basisanschlusselement und dem Abstützelement liegenden Teil und einen außerhalb des Zwischenraums zwischen dem Basisanschlusselement und dem Abstützelement liegenden Teil aufweisen.

[0019] Unter Zwischenraum ist dabei nicht nur ein abgeschlossener Hohlraum zu verstehen, sondern jeglicher Raum zwischen Basisanschlusselement und Lastanschlusselement.

[0020] Diese Bedingung gewährleistet den Vorteil, dass das Lastanschlusselement für eine Montage einer Last leicht zugänglich ist. Die Schwingungsisolierung erfolgt beispielsweise über den zwischen dem Basisanschlusselement und dem Abstützelement liegenden Teil, wodurch eine Druckvorspannung auf die Energiewandler-Systeme ausgeübt werden kann. Die Montage einer Last hingegen erfolgt an dem außerhalb des Zwischenraums zwischen dem Basisanschlusselement und dem Abstützelement liegenden Teil des Lastelements. Letzterer ist nun nicht mehr durch die räumlichen Maße des Zwischenraums beschränkt, kann also beliebig in Form und Größe ausgestaltet sein und dadurch beispielsweise spezielle Erfordernisse der Anschlussgeometrie der Last berücksichtigen.

[0021] Das Basisanschlusselement und das Lastanschlusselement können beispielsweise eine ebene Montagefläche aufweisen. Dies erleichtert den Einbau der Schnittstelle in vorhandene Strukturen zur Isolierung einer vibrationsempfindlichen Last von einer oder mehreren Störquellen. Weiterhin lassen sich auf diese Weise mehrere Schnittstellen auf einfache Weise seriell hintereinanderschalten.

[0022] Die beschriebene Schnittstelle kann

- als Lagerungselement,
- als modulares Übertragungselement und/oder
- als Stellelement

in Strukturen eingearbeitet werden.

[0023] Die vorgeschlagene Anordnung zeichnet sich insbesondere dadurch aus, dass das Lastanschlusselement i. d. R. nur über das erste und das zweite Energiewandler-System mit dem Abstützelement bzw. dem Basisanschlusselement verbunden ist. Auf diese Weise wird die Anzahl der Schallbrücken zwischen basisseitigen Störquellen und einer Nutzlast auf das technisch notwendige Minimum reduziert.

[0024] Trotz dieser Reduktion der Schallbrücken ist durch die starre oder flexible Vorspanneinrichtung, welche eine Verbindung zwischen Basisanschlusselement und Abstützelement herstellt, eine definierte Einstellung einer Vorspannung der Energiewandler-Systeme möglich. Dies kann beispielsweise dadurch erfolgen, dass als Vorspanneinrichtung ein elastisches Element, Dehnschrauben oder ähnliche in ihrer Länge veränderbare Elemente eingesetzt werden.

[0025] Es lassen sich Energiewandler-Systeme mit

einer gemeinsamen oder mit unterschiedlichen Vorzugsrichtungen einsetzen, letzteres z. B. um Schwingungen in verschiedenen Raumrichtungen zu isolieren. Vorteilhafterweise wird dann für jede Raumrichtung ein separates Abstützelement und eine separate Vorspanneinrichtung verwendet. Für jede Raumrichtung werden dann vorzugsweise jeweils mindestens ein sich zwischen dem Basisanschlusselement und dem Lastanschlusselement erstreckendes Energiewandler-System und mindestens ein sich zwischen dem Lastanschlusselement und dem Abstützelement erstreckendes Energiewandler-System eingesetzt. Wiederum kann dann eine Vorspannung auf die Energiewandler-Systeme ausgeübt werden, ohne dass Schallbrücken zwischen Basiselement und Lastanschlusselement geschaffen werden.

[0026] Weiterhin können auch für eine Raumrichtung mehr als zwei Energiewandler-Systeme eingesetzt werden. Dies kann insbesondere dann von Vorteil sein, wenn es sich bei den Energiewandler-Systemen um Aktuator-Systeme handelt, welche nicht nur eine reine Translation des Lastanschlusselements, sondern beispielsweise auch eine Verkipfung bewirken sollen. Wenn z. B. zwei Paare von Aktuator-Systemen parallel angeordnet sind, so führt eine ungleiche Ausdehnung der beiden Paare zu einer Verkipfung des Lastanschlusselements um eine Achse senkrecht zur Vorzugsrichtung der beiden Paare von Aktuator-Systemen. Analog lässt sich mit mehreren Paaren von Aktuator-Systemen eine Verkipfung des Lastanschlusselements um mehrere Achsen erzielen. Auf diese Weise lassen sich beispielsweise auch Torsionsschwingungen im Basisanschlusselement vom Lastanschlusselement isolieren.

[0027] In einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung weisen das Basisanschlusselement und das Lastanschlusselement jeweils standardisierte Anschlussgeometrien auf. Bei diesen Anschlussgeometrien kann es sich beispielsweise um Gewinde, Flansche, Schraubbolzen etc. handeln. Dies ermöglicht einen schnellen und kostengünstigen Austausch oder eine Ergänzung bestehender Elemente und Strukturen durch die beschriebene Schnittstelle zur Schwingungsreduktion. Beispielsweise in der Satellitentechnik kann die Schnittstelle auf einfache Weise zwischen den Hauptkörper, der z. B. Störquellen in Form von Motoren enthält, und eine positionsempfindliche Antenne geschaltet werden, ohne dass konstruktive Änderungen der gesamten Anordnung erforderlich sind. Es kann beispielsweise auf standardisierte Flanschgeometrien zurückgegriffen werden.

[0028] Vorteilhafter Weise weist die Vorspanneinrichtung ein die Aktuator-Systeme umschließendes Rohr auf. Das Rohr kann kreisförmige, rechteckige oder beliebige Querschnittsgeometrie aufweisen.

[0029] Dies ist insbesondere dann von Vorteil, wenn alle Energiewandler-Systeme eine gemeinsame Vorzugsrichtung aufweisen. Das geschlossene Rohr kann starr oder flexibel ausgestaltet sein und ist insbesondere so ausgestaltet, dass die Rohrachse annähernd parallel zur Vorzugsrichtung der Aktuator-Systeme ausgerichtet ist. Das Rohr schützt die Aktuator-Systeme vor Umwelteinflüssen, wie z. B. Feuchtigkeit, Schmutz oder ähnlichem. Weiterhin stabilisiert das Rohr die Energiewandler-Systeme gegen Kräfteinwirkungen senkrecht zur Vorzugsrichtung (z. B. Scherkräfte), welche zu mechanischen Beschädigungen der Energiewandler-Systeme führen könnten.

[0030] Bei verschiedenen Methoden zur Schwingungsdämpfung ist es von Vorteil, Informationen über die tatsächliche Schwingung des Lastanschlusselements zu generieren. Daher kann ein Sensorsystem zur Bestimmung von beispielsweise Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung oder Kraft mit einem Element der Schnittstelle verbunden bzw. zwischen geschaltet sein. Insbesondere ist es von Vorteil, wenn ein Sensor mit dem Lastanschlusselement verbunden ist. Weitere Sensorsysteme können beispielsweise mit dem Basisanschlusselement verbunden werden.

[0031] Bei diesen Sensorsystemen kann es sich beispielsweise um kapazitive oder piezoelektrische Beschleunigungs- oder Kraftsensoren, oder um magnetische, elektrostatische oder interferometrische Positions- oder Geschwindigkeitssensoren handeln.

[0032] Die Informationen des mindestens einen Sensorsystems können beispielsweise zur aktiven Schwingungsdämpfung genutzt werden. Dabei werden insbesondere als Energiewandler-Systeme Aktuator-Systeme eingesetzt. Die Signale des Sensorsystems werden einer Regelungselektronik zur Verfügung gestellt. Die Regelungselektronik generiert aus den Sensorsignalen Steuersignale (Zielfunktion), welche über eine Energieversorgung in Stellsignale für die Aktuator-Systeme umgewandelt werden. Durch diese Stellsignale werden die Aktuator-Systeme zu Schwingungen angeregt, welche z. B. gegenphasig zu den zu isolierenden Schwingungen sind und diese am Ort der Last eliminieren oder dämpfen.

[0033] In einer Weiterbildung der Erfindung ist mindestens ein Energiewandler-System ganz oder teilweise als Aktuator-System ausgebildet. Dabei soll ein Teil dieses Aktuator-Systems wiederum gleichzeitig als Energiewandler genutzt werden können, welcher mechanische in elektrische Energie umwandeln kann.

[0034] In dieser Weiterbildung werden also beide Richtungen der Energiewandlung gleichzeitig genutzt. Während in einem Aktuator typischerweise

elektrische Energie in mechanische Energie umgewandelt wird, wird in dieser Ausgestaltung der Erfindung zumindest in einem Teil eines Aktuators gleichzeitig mechanische Energie in elektrische Energie umgewandelt. Aktuatoren, die zu dieser Umkehrung des Wandlerprinzips in der Lage sind, werden auch als multifunktionale Wandler-Systeme bezeichnet. Die dabei verwendeten Werkstoffe, die gleichzeitig mechanische Lasten tragen können und als Aktuator und bzw. oder Sensor (siehe unten) wirken können, werden als multifunktionale Werkstoffe bezeichnet.

[0035] Die Wandlung kann beispielsweise durch Ausnutzung des piezoelektrischen Effekts, beispielsweise mit Hilfe einer Piezokeramik, erfolgen. Dabei wird ein Druck auf eine Piezokeramik oder Druckschwankungen in einer Piezokeramik in elektrische Signale umgewandelt. Da Piezo-Aktuatoren häufig aus Stapeln vieler Piezokeramik-Schichten bestehen, kann beispielsweise eine Schicht aus diesem Stapel gleichzeitig zur Wandlung mechanischer Energie in elektrische Energie genutzt werden.

[0036] Diese Weiterbildung hat verschiedene Vorteile. Zum einen kann zumindest teilweise auf die Nutzung zusätzlicher Sensoren verzichtet werden. Die vom Aktuator-System erzeugten elektrischen Signale dienen gleichzeitig als Sensorsignale und können beispielsweise Informationen über die Beschleunigung oder die Geschwindigkeit der Bewegung einer Nutzlast enthalten.

[0037] Auf diese Weise lässt sich z. B. durch die Schnittstelle die Systemantwort des Gesamtsystems auf eine Störung ermitteln. Beispielsweise können die Aktuator-Systeme der Schnittstelle mit einer bestimmten Referenzstrukturstimulation beaufschlagt werden. Diese Referenzstrukturstimulation führt zu einer Strukturantwort des Gesamtsystems in Form mechanischer Schwingungen. Durch Registrieren des elektrischen Signals eines als Energiewandler zwischen mechanischer und elektrischer Energie wirkenden Aktuators lässt sich die Strukturantwort messtechnisch aufzeichnen. Die gemessene Strukturantwort, z. B. der Übertragungseigenschaften zwischen aktuatorischer Referenzstimulation und Sensor oder die Impedanzbestimmung, erlaubt Aussagen über den aktuellen Strukturzustand des Gesamtsystems, beispielsweise durch Vergleich der gemessenen Strukturantwort bzw. Ermittlung von Strukturkennwerten mit in einer Datenbank hinterlegten Referenzstrukturantworten bzw. Referenzstrukturkennwerten.

[0038] Ein weiterer Vorteil der gleichzeitigen Nutzung zumindest eines Teils eines Aktuator-Systems als mechanisch-elektrischer Energiewandler besteht in der Möglichkeit einer Nutzung als passiver oder semi-aktiver Schwingungsdämpfer. Dabei wird eine elektronische Schaltung zur Dissipation der elektri-

schen Energie eingesetzt.

[0039] Im einfachsten Fall besteht diese elektronische Schaltung aus einem ohmschen Widerstand, in dem die elektrische Energie teilweise in Wärme umgewandelt wird. Eine noch effizientere Schwingungsdämpfung lässt sich durch zusätzlichen Einsatz einer oder mehrerer Spulen und/oder eines oder mehrerer Kondensatoren erzielen. So können z. B. die mechanischen Schwingungen der Schnittstelle in periodischen Schwankungen der Ladungen auf den Oberflächen einer Piezokeramik eines Piezo-Aktuators der Schnittstelle resultieren. Dies entspricht periodisch schwankenden Ladungen auf den Platten eines Kondensators. Werden die beiden Platten des Kondensators (also die beiden Oberflächen der Piezokeramik) z. B. über einen ohmschen Widerstand und eine Spule miteinander verbunden, so entspricht die Wirkungsweise der Anordnung der Wirkung eines gedämpften elektrischen Schwingkreises.

[0040] Eine weitere Steigerung der Effizienz der Schwingungsdämpfung lässt sich dadurch erzielen, dass anstelle zumindest einer Spule eine sogenannte "synthetische Induktivität" verwendet wird. Diese synthetische Induktivität besteht i. d. R. aus einer Kombination mehrerer ohmscher Widerstände mit einem oder mehreren Operationsverstärkern. Auf diese Weise lassen sich höhere Induktivitäten erzielen als mit herkömmlichen Spulen. Dadurch wird die Dämpfung des Schwingkreises weiter erhöht. Diese Technik wird beispielsweise in D. Mayer, Ch. Linz, and V. Krajenski: Synthetische Induktivitäten für die semi-passive Dämpfung, 5. Magdeburger Maschinenbautage, 2001, beschrieben.

[0041] Die Effizienz der Schwingungsdämpfung lässt sich weiter erhöhen, indem mehrere der oben beschriebenen Schnittstellen in einer der beschriebenen Ausgestaltungen und Beschaltungen in Kaskaden hintereinandergeschaltet werden. Dabei wird jeweils das Basisanschlusselement der folgenden Schnittstelle mit dem Lastanschlusselement der vorhergehenden Schnittstelle verbunden.

Ausführungsbeispiel

[0042] Im Folgenden wird die Erfindung anhand von Ausführungsbeispielen näher erläutert, die in den Figuren schematisch dargestellt sind. Sie ist jedoch nicht auf die Beispiele beschränkt. Gleiche Bezugsziffern in den einzelnen Figuren bezeichnen gleiche oder funktionsgleiche bzw. hinsichtlich ihrer Funktionen einander entsprechende Elemente. Im Einzelnen zeigt:

[0043] Fig. 1 einen Satelliten mit einer aktiven Entkopplung von Störquellen und sensiblen Komponenten entsprechend dem Stand der Technik;

[0044] Fig. 2 eine strukturmechanische Schnittstelle zur Schwingungsdämpfung;

[0045] Fig. 3 eine vereinfachte elektrische Beschaltung zur aktiven Schwingungsdämpfung der in Fig. 2 dargestellten Schnittstelle;

[0046] Fig. 4 eine Ansteuerung der Aktuator-Systeme der Schnittstelle in Fig. 2 zur gezielten Verkipfung einer Nutzlast;

[0047] Fig. 5 die möglichen Verkippsachsen bei einer Schnittstelle mit in 120°-Rotationssymmetrie angeordneten Aktuatoren;

[0048] Fig. 6 eine alternative Ausgestaltung einer strukturmechanischen Schnittstelle zur Schwingungsdämpfung;

[0049] Fig. 7 eine weitere alternative Ausgestaltung einer strukturmechanischen Schnittstelle zur Schwingungsdämpfung;

[0050] Fig. 8 eine strukturmechanische Schnittstelle zur Schwingungsdämpfung in perspektivischer Teildarstellung mit ausgeschnittenem Segment;

[0051] Fig. 9 eine strukturmechanische Schnittstelle zur Schwingungsdämpfung in zwei senkrecht aufeinander stehenden Raumrichtungen;

[0052] Fig. 10 eine strukturmechanische Schnittstelle zur Schwingungsdämpfung in drei nicht senkrecht aufeinanderstehenden Raumrichtungen;

[0053] Fig. 11 eine Anordnung zur teilweisen Nutzung eines Piezo-Aktuators einer strukturmechanischen Schnittstelle als Sensor für eine Strukturanalyse;

[0054] Fig. 12 eine elektrische Beschaltung eines Teils eines Piezo-Aktuators einer strukturmechanischen Schnittstelle zur passiven Schwingungsdämpfung; und

[0055] Fig. 13 eine zu Fig. 12 alternative elektrische Beschaltung eines Teils eines Piezo-Aktuators einer strukturmechanischen Schnittstelle zur passiven Schwingungsdämpfung.

[0056] In Fig. 2 ist eine bevorzugte Ausführung der beschriebenen Schnittstelle zur Schwingungsdämpfung dargestellt. Ein Basisanschlusselement **10** ist über eine Vorspanneinrichtung **12** mit einem Abstützelement **14** verbunden. Ein erstes Energiewandler-System, welches aus den Piezo-Aktuatoren **16** und **18** besteht, erstreckt sich zwischen den Angriffspunkten **20** bzw. **22** auf dem Basisanschlusselement **10** und den Angriffspunkten **24** bzw. **26** auf dem Lastanschlusselement **28**. Ein zweites Energiewand-

ler-System, welches aus den Piezo-Aktuatoren **30** und **32** besteht, erstreckt sich zwischen den Angriffspunkten **34** bzw. **36** auf dem Abstützelement **14** und den Angriffspunkten **38** bzw. **40** auf dem Lastanschlusselement **28**.

[0057] Die dargestellte Anordnung zeigt lediglich einen Querschnitt durch die strukturmechanische Schnittstelle. Die Anordnung dieses Beispiels ist bis auf die Piezo-Aktuatoren **16**, **30**, **18**, **32** symmetrisch zur eingezeichneten Symmetrieachse **42**. Bei dem Basisanschlusselement **10** handelt es sich also um eine Kreisscheibe, bei dem Abstützelement **14** um eine Ringscheibe. Das Lastanschlusselement **28** hat eine zylinderhutförmige Gestalt, wobei sich ein Teil des Lastanschlusselements im Zwischenraum zwischen der Vorspanneinrichtung **14** und dem Basisanschlusselement **10** befindet und ein Teil außerhalb. Die Vorspanneinrichtung **12** besteht aus einem elastischen Rohr mit zum Außendurchmesser der Kreisscheibe des Basisanschlusselements **10** und zum Außendurchmesser der Ringscheibe des Abstützelements **14** identischen Durchmesser. Die Vorspannung erfolgt dadurch, dass die Länge des elastischen Rohrs so gewählt wird, dass das Rohr im Ruhezustand der Anordnung gedehnt wird. Dadurch wird gleichzeitig auf alle Piezo-Aktuatoren eine Druckvorspannung ausgeübt.

[0058] Anstelle der dargestellten vier Piezo-Aktuatoren können auch mehr als vier Aktuatoren verwendet werden. Vorzugsweise sind diese Piezo-Aktuatoren rotationssymmetrisch zur Symmetrieachse **42** angeordnet.

[0059] Das Basisanschlusselement **10** und das Lastanschlusselement **28** sind so ausgestaltet, dass eine einfache und schnelle Montage der Schnittstelle zwischen eine durch Störquellen **1** zu Schwingungen angeregte Basisseite und eine zu isolierende Last erfolgen kann. Zu diesem Zweck sind das Basisanschlusselement **10** und das Lastanschlusselement **28** mit Gewindebohrungen mit Standardmaßen versehen.

[0060] Werden die Piezo-Aktuatoren **16** und **18** durch gleichartige elektrische Ansteuerungen verlängert und die Piezo-Aktuatoren **30** und **32** in gleichem Maße durch geeignete elektrische Ansteuerungen verkürzt, so wird der Abstand zwischen Lastanschlusselement **28** und Basisanschlussplatte **10** vergrößert. Entsprechend wird durch eine Verkürzung der Piezo-Aktuatoren **16** und **18** und eine gleichzeitige Verlängerung der Piezo-Aktuatoren **30** und **32** der Abstand zwischen Lastanschlusselement **28** und Basisanschlussplatte **10** verringert. Die elektrischen Ansteuerungen der Piezo-Aktuatoren sind in **Fig. 2** nicht dargestellt.

[0061] Werden die Piezo-Aktuatoren **16** und **30** sowie **18** und **32** jeweils gegenphasig z. B. mit einer si-

nusförmigen Wechsellspannung geeigneten Amplitude und Frequenz angesteuert, so schwingt das Lastanschlusselement **28** relativ zum Basisanschlusselement **10** auf und ab. Dies lässt sich beispielsweise zur aktiven Schwingungsdämpfung nutzen.

[0062] In **Fig. 3** ist eine elektrische Beschaltung der Schnittstelle gemäß **Fig. 2** dargestellt. Ein auf dem Lastanschlusselement **28** fixierter Beschleunigungssensor **60** ist über einen Phasenschieber **62** mit dem Eingang einer Regelungselektronik **64** verbunden. Ein Ausgang der Regelungselektronik **64** ist über einen Nachverstärker **66** mit den Piezo-Aktuatoren **30** und **32** verbunden. Weiterhin ist der Ausgang der Regelungselektronik **64** über einen 180°-Phasenschieber **68** und einen zweiten Nachverstärker **70** mit den Piezo-Aktuatoren **16** und **18** verbunden.

[0063] Sollen Schwingungen des Basisanschlusselements **10** vom Lastanschlusselement **28** isoliert werden, so werden diese Schwingungen mit Hilfe des Beschleunigungssensors **60** detektiert. Das Sensor-signal wird dann mit Hilfe der Regelungselektronik **64** und des ersten Phasenschiebers **62** in geeignete gegenphasige Ansteuersignale für die Piezo-Aktuatoren **16** und **30** sowie **18** und **32** umgewandelt. Der erste Phasenschieber **62** kann beispielsweise dazu dienen, Phasenverschiebungen zwischen der tatsächlichen Bewegung des Lastanschlusselements **28** und den Sensorsignalen auszugleichen. Diese Notwendigkeit hängt u. a. von der Wirkungsweise des Sensors **60** ab. Bei sinusförmigen Schwingungen beispielsweise, in denen eine Phasenverschiebung von 90° zwischen Beschleunigung und Geschwindigkeit und zwischen Geschwindigkeit und Position auftritt, müsste das Signal eines Geschwindigkeitssensors um 90° phasenverschoben werden, um eine geeignete Längenänderung der Piezo-Aktuatoren vornehmen zu können. Auch Verzögerungen in der Regelungselektronik **64** und dadurch entstehende Phasenverschiebungen können durch den Phasenschieber **62** ausgeglichen werden.

[0064] Die in der Regelungselektronik **64** erzeugten Signale werden in den Nachverstärkern **66** und **70** weiter verstärkt und den Aktuatoren **30** und **32** bzw. **16** und **18** zugeführt. Der zweite Phasenschieber **68** ist erforderlich, da die beiden Aktuator-Systeme **16**, **18** und **30**, **32** i. d. R. gegenphasig angesteuert werden müssen.

[0065] Die Piezo-Aktuatoren **16** und **30** sowie **18** und **32** werden jeweils zu gegenphasigen Schwingungen angeregt, durch welche die Schwingungen auf das Lastanschlusselement **28** übertragen werden. Im Lastanschlusselement **28** überlagern sich die Schwingungen des Basisanschlusselements **10** mit den durch die Piezo-Aktuatoren angeregten Schwingungen – bei geeigneter Phasenwahl – destruktiv, so dass die Schwingungen des Lastanschlusselements

28 gedämpft werden.

[0066] In der dargestellten Anordnung sind die Piezo-Aktuatoren **16**, **18** des ersten Aktuator-Systems sowie die Piezo-Aktuatoren **30**, **32** des zweiten Aktuator-Systems jeweils gleichartig ausgestaltet, d. h. gleiche Ansteuersignale bewirken gleiche Längenänderungen. Daher kann für die Aktuatoren eines Aktuator-Systems jeweils ein einziger Nachverstärker **66** bzw. **70** verwendet werden. Werden innerhalb eines Aktuator-Systems unterschiedliche Aktuatoren verwendet, so müssten für die Aktuatoren jeweils unterschiedliche Nachverstärker eingesetzt werden.

[0067] Die Ansteuerung der Piezo-Aktuatoren ist stark vereinfacht dargestellt. In der Regel weist jeder Piezo-Aktuator zwei elektrische Anschlüsse auf, die mit unterschiedlichen Spannungen beaufschlagt werden müssen. Die Spannungsdifferenz zwischen den elektrischen Anschlüssen bestimmt die Längenausdehnung des Piezo-Aktuators.

[0068] In **Fig. 4** ist dargestellt, wie durch eine gezielte Ansteuerung der Piezo-Aktuatoren der Anordnung in **Fig. 2** auch Kippschwingungen des Basisanschlusselements **10** ausgeglichen bzw. gedämpft werden können. Indem der Piezo-Aktuator **30** durch ein geeignetes elektrisches Ansteuersignal auf eine größere Länge eingestellt wird als der Piezo-Aktuator **32** und entsprechend der Piezo-Aktuator **16** auf eine geringere Länge als der Piezo-Aktuator **18**, wird das Lastanschlusselement **28** relativ zur Ebene des Basisanschlusselements **10** gekippt. Dazu benötigen die Piezo-Aktuatoren **16**, **18**, **30**, **32** (nicht gezeigte) individuelle elektrische Ansteuerungen.

[0069] Treten im Basisanschlusselement **10** Kippschwingungen auf, so können diese beispielsweise durch Vergleich der Signale verschiedener, an unterschiedlichen Orten auf der Oberfläche des Lastanschlusselements **28** angebrachter Sensoren detektiert werden. Die Signale werden dann mit Hilfe einer Regelungselektronik **64** in geeignete Ansteuersignale der Piezo-Aktuatoren umgewandelt, so dass das Lastanschlusselement **28** relativ zum Basisanschlusselement **10** eine Kippschwingung ausführt, die sich mit der Kippschwingung des Basisanschlusselements **10** destruktiv überlagert und diese somit im Lastanschlusselement **28** dämpft.

[0070] Die Regelungselektronik **64** kann beispielsweise so aufgebaut sein, dass aus den Signalen zweier auf dem Lastanschlusselement **28** fixierter Sensoren ein Summen- und ein Differenzsignal gebildet wird, die in getrennten Reglern zu Ansteuersignalen für die Piezo-Aktuatoren umgewandelt werden. Das Ansteuersignal für jeden Piezo-Aktuator ist dann eine Überlagerung aus Signalen beider Regler.

[0071] In diesem Ausführungsbeispiel, in dem ledig-

lich zwei Aktuator-Paare **16** und **30** bzw. **18** und **32** verwendet werden, ist nur eine Verkippung des Lastanschlusselements **28** um eine Achse senkrecht zur Symmetrieachse **42** möglich. Werden, wie oben beschrieben, mehr Aktuator-Paare eingesetzt, so sind Verkippungen um mehrere Achsen senkrecht zur Symmetrieachse **42** möglich. In **Fig. 5** ist als Beispiel eine Schnittstelle mit drei Aktuator-Paaren **80**, **82**, **84** skizzenhaft in Draufsicht dargestellt. Nur die Aktuator-Paare **80**, **82**, **84** und die Kippachsen sind dargestellt. Jedes der Aktuator-Paare **80**, **82** und **84** besteht jeweils aus einem Aktuator, der sich zwischen einem Angriffspunkt auf dem Basisanschlusselement **10** und einem Angriffspunkt auf dem Lastanschlusselement **28** erstreckt und einem Aktuator, der sich zwischen einem Angriffspunkt auf dem Abstützelement **14** und einem Angriffspunkt auf dem Lastanschlusselement **28** erstreckt. Die Aktuatoren jeweils eines Aktuator-Paars sind in dieser Ausführung linear senkrecht zur Zeichenebene angeordnet und daher nicht einzeln zu erkennen. Die Aktuator-Paare **80**, **82**, **84** sind 120°-rotationssymmetrisch um die zur Zeichenebene senkrechte Symmetrieachse **42** angeordnet.

[0072] Die Anordnung erlaubt eine Verkippung des Lastanschlusselements **28** um die drei Kippachsen **88**, **90** und **92**, welche jeweils senkrecht zur Symmetrieachse **42** angeordnet sind.

[0073] Die Anordnung bietet den Vorteil, dass neben Kippschwingungen um verschiedene Achsen auch Torsionsschwingungen des Basisanschlusselements **10** gedämpft werden können. Dies kann beispielsweise dadurch erfolgen, dass die Aktuator-Paare **80**, **82** und **84** zyklisch angesteuert werden.

[0074] In **Fig. 6** ist ein Beispiel dargestellt, welches zeigt, dass die Angriffspunkte eines der Aktuatoren eines Aktuator-Paares nicht in einer Linie angeordnet sein müssen. Das Lastanschlusselement **28** ist in dieser Ausführung so ausgestaltet, dass die Summe der Abstände zwischen den Angriffspunkten **34** bzw. **36** und **38** bzw. **40** und der Abstände zwischen den Angriffspunkten **24** bzw. **26** und **20** bzw. **22** größer ist als der Abstand zwischen dem Basisanschlusselement **10** und dem Abstützelement **14**. Mit anderen Worten, das Lastanschlusselement **28** kann so ausgestaltet werden, dass die Summe der Längen eines Aktuator-Paares **16**, **30** bzw. **18**, **32** nicht dem Abstand zwischen Basisanschlusselement **10** und Abstützelement **14** entsprechen muss. Es sind auch Ausgestaltungen möglich, bei denen die Länge eines einzelnen Aktuators den Abstand zwischen Basisanschlusselement **10** und Abstützelement **14** überschreitet.

[0075] Dadurch kann auf verschiedene Längen von Aktuatoren zurückgegriffen werden, ohne dass die äußere Bauform, die im wesentlichen durch den Ab-

stand zwischen Basisanschlusselement **10** und Abstützelement **14** bestimmt wird, signifikant geändert werden muss. Da die maximale Längenänderung eines Piezo-Aktuators von der Baulänge des Piezos abhängt, kann so durch die Verwendung längerer Piezo-Aktuatoren eine Verlängerung des Stellwegs der Schnittstelle erzielt werden. Weiterhin lassen sich durch die Verwendung verschiedener Piezo-Aktuatoren Schwingungen unterschiedlicher Schwingungsfrequenzen dämpfen, da auch die Resonanzfrequenz der Piezo-Aktuatoren signifikant von der Baulänge der Piezokeramik abhängt.

[0076] In **Fig. 7** ist ein Ausführungsbeispiel dargestellt, welches zeigt, dass die sich zwischen Angriffspunkten auf dem Basisanschlusselement **10** und dem Lastanschlusselement **28** erstreckenden Aktuatoren **100** und die sich zwischen Angriffspunkten auf dem Abstützelement **14** und auf dem Lastanschlusselement **28** erstreckenden Aktuatoren **106** nicht auf der gleichen Seite der Symmetrieachse **42** angeordnet sein müssen. Ein Piezo-Aktuator **100** erstreckt sich zwischen einem Angriffspunkt **102** auf dem Basisanschlusselement **10** und einem Angriffspunkt **104** auf dem Lastanschlusselement **28**. Ein weiterer Piezo-Aktuator **106** erstreckt sich zwischen einem Angriffspunkt **108** auf dem Lastanschlusselement **28** und einem Angriffspunkt **110** auf dem Abstützelement **14**.

[0077] In vielen Fällen werden die Aktuatoren so angeordnet, dass sich insgesamt die auf das Lastanschlusselement **28** ausgeübten Drehmomente gegenseitig aufheben. Dadurch wird sichergestellt, dass alle Aktuatoren stets unter einer Druckvorspannung stehen. In der in **Fig. 7** dargestellten Anordnung kann dies z. B. dadurch erfolgen, dass benachbart zu dem Piezo-Aktuator **106** weitere, in dieser Schnittdarstellung nicht abgebildete, – Piezo-Aktuatoren angeordnet werden, welche sich zwischen Angriffspunkten auf dem Basisanschlusselement **10** und Angriffspunkten auf dem Lastanschlusselement **28** erstrecken und so das durch den Piezo-Aktuator **106** auf das Lastanschlusselement **28** ausgeübte Drehmoment kompensieren. Beispielsweise kann die Anordnung sechs 120°-rotationssymmetrische Piezo-Aktuatoren aufweisen. Diese sind so angeordnet, dass sich jeweils ein Aktuator des ersten Aktuator-Systems (d. h. Erstreckung zwischen Angriffspunkten auf dem Basisanschlusselement **10** und dem Lastanschlusselement **28**) und ein Aktuator des zweiten Aktuator-Systems (d. h. Erstreckung zwischen Angriffspunkten auf dem Abstützelement **14** und dem Lastanschlusselement **28**) relativ zur Symmetrieachse **42** gegenüberliegen. Benachbarte Aktuatoren gehören zu unterschiedlichen Aktuator-Systemen.

[0078] In **Fig. 8** ist eine Schnittstelle zur Schwingungsdämpfung in perspektivischer Teildarstellung

mit ausgeschnittenem Segment dargestellt. Ein Piezo-Aktuator **130** erstreckt sich zwischen einem Angriffspunkt **132** auf dem Basisanschlusselement **10** und einem Angriffspunkt **134** auf dem Lastanschlusselement **28**. Ein weiterer Piezo-Aktuator **136** erstreckt sich zwischen einem Angriffspunkt **138** auf dem Lastanschlusselement **28** und einem Angriffspunkt **140** auf dem Abstützelement **14**.

[0079] In dieser Darstellung ist zu erkennen, dass sowohl das Basisanschlusselement **10** als auch die Oberfläche des Lastanschlusselements **28** für Montagezwecke frei zugänglich sind. Die Vorspanneinrichtung **12** ist als elastisches, zylindrisches Rohr ausgestaltet, welches die Aktuator-Systeme vollständig umschließt und diese so vor unerwünschten Belastungen durch Scherkräfte senkrecht zu ihrer Vorzugsrichtung und vor Umwelteinwirkungen schützt. Die elektrischen Zuführungen zu den – Piezo-Aktuatoren können beispielsweise durch eine Öffnung **142** im Basisanschlusselement **10** zu den Piezo-Aktuatoren **130** und **136** geführt werden.

[0080] In **Fig. 9** ist eine Draufsicht auf eine Anordnung dargestellt, welche den Einsatz der Erfindung zur Schwingungsdämpfung in verschiedenen Raumrichtungen zeigt. Ein aus den Piezo-Aktuatoren **160** und **162** bestehendes Aktuator-System erstreckt sich zwischen den Angriffspunkten **164** bzw. **166** auf dem Basisanschlusselement **10** und den Angriffspunkten **168** bzw. **170** auf dem Lastanschlusselement **28**. Ein aus den Piezo-Aktuatoren **172** und **174** bestehendes Aktuator-System erstreckt sich zwischen den Angriffspunkten **176** bzw. **178** auf einem ersten Abstützelement **180** und den Angriffspunkten **182** bzw. **184** auf dem Lastanschlusselement **28**. Die Aktuatoren **160**, **162**, **172** und **174** weisen dieselbe Raumrichtung (im Folgenden als X-Richtung bezeichnet) als Vorzugsrichtung auf.

[0081] Ein aus den Piezo-Aktuatoren **190** und **192** bestehendes Aktuator-System erstreckt sich zwischen den Angriffspunkten **194** bzw. **196** auf dem Basisanschlusselement **10** und den Angriffspunkten **198** bzw. **200** auf dem Lastanschlusselement **28**. Ein aus den – Piezo-Aktuatoren **202** und **204** bestehendes Aktuator-System erstreckt sich zwischen den Angriffspunkten **206** bzw. **208** auf einem zweiten Abstützelement **210** und den Angriffspunkten **212** bzw. **214** auf dem Lastanschlusselement **28**. Die Aktuatoren **190**, **192**, **202** und **204** weisen dieselbe Raumrichtung (im Folgenden als Y-Richtung bezeichnet) als Vorzugsrichtung auf, wobei diese Raumrichtung senkrecht zur obengenannten Vorzugsrichtung der Aktuatoren **160**, **162**, **172** und **174** steht.

[0082] Das Abstützelement **14** besteht in diesem Ausführungsbeispiel aus zwei separaten Abstützelementen **180** und **210**. Diese sind jeweils mit einer Vorspanneinrichtung **216** bzw. **218** (beispielsweise

einem Gummiquader) mit dem Basisanschlusselement **10** verbunden.

[0083] Die Montage einer Last auf das in diesem Beispiel einen kreuzförmigen Querschnitt aufweisende Lastanschlusselement **28** kann dadurch erfolgen, dass das Lastanschlusselement zusätzlich eine ebene Montageplatte aufweist, welche auf das Kreuz des Lastanschlusselements aufgebracht ist.

[0084] Die Anordnung weist verschiedene Vorteile auf. Zum einen können transversale Schwingungen des Basisanschlusselements **10** in X- und Y-Richtung durch geeignete Ansteuerungen der Piezo-Aktuatoren gedämpft werden. Dabei kann für jede Raumrichtung beispielsweise eine elektronische Schaltung zur aktiven Schwingungsdämpfung analog zu der in **Fig. 3** beschriebenen Schaltung eingesetzt werden. Zusätzlich können auch Kippschwingungen des Basisanschlusselements **10** gegen die X- bzw. Y-Achse durch geeignete Ansteuerung der Piezo-Aktuatoren analog zu **Fig. 4** ausgeglichen werden.

[0085] Durch die Vorspanneinrichtungen **216** und **218** werden die Piezo-Aktuatoren in die beiden Raumrichtungen unterschiedlich vorgespannt. Dies kann für Anwendungen von Vorteil sein, bei denen beispielsweise aufgrund unterschiedlicher zu erwartender Schwingungen in X- und Y-Richtung in diesen beiden Raumrichtungen unterschiedliche Arten von Piezo-Aktuatoren eingesetzt werden sollen.

[0086] Zusätzlich zu den hier dargestellten Aktuatoren in X- und Y-Richtung lassen sich analog auch noch zusätzliche Aktuatoren in der zur X- und Y-Richtung senkrechten Raumrichtung einsetzen. Auch hierfür bietet sich wieder ein separates Abstützelement an. Vorzugsweise ist dieses Abstützelement wieder so ausgestaltet, dass das Lastanschlusselement **28** für Montagezwecke frei zugänglich ist.

[0087] In **Fig. 10** ist eine zu **Fig. 9** alternative Anordnung zur Schwingungsdämpfung in verschiedenen Raumrichtungen dargestellt. Die Anordnung weist, wie die Anordnung in **Fig. 9**, wiederum ein Basisanschlusselement **10** und zwei Abstützelemente **180** und **210** auf, die mit dem Basisanschlusselement **10** über die Vorspanneinrichtungen **216** bzw. **218** verbunden sind. Ein erster Piezo-Aktuator **230** erstreckt sich zwischen einem Angriffspunkt **232** auf dem Basisanschlusselement **10** und einem Angriffspunkt **234** auf dem Lastanschlusselement **28**. Ein zweiter Piezo-Aktuator **236** erstreckt sich zwischen einem Angriffspunkt **238** auf dem Abstützelement **180** und einem Angriffspunkt **240** auf dem Lastanschlusselement **28**. Ein dritter Piezo-Aktuator **242** erstreckt sich zwischen einem Angriffspunkt **244** auf dem Abstützelement **210** und einem Angriffspunkt **246** auf dem Lastanschlusselement **28**.

[0088] Die Anordnung zeigt, dass es nicht zwingend erforderlich ist, dass jeweils ein sich zwischen dem Basisanschlusselement **10** und dem Lastanschlusselement **28** erstreckender Aktuator und ein sich zwischen einem Abstützelement und dem Lastanschlusselement **28** erstreckender Aktuator gleiche Vorzugsrichtung aufweisen.

[0089] Alternativ zu der in **Fig. 10** dargestellten Anordnung lassen sich auch noch weitere Piezo-Aktuatoren zur Dämpfung von Schwingungen in weiteren Raumrichtungen einsetzen. So könnten beispielsweise vier Piezo-Aktuatoren und drei Abstützelemente so angeordnet werden, dass die Piezo-Aktuatoren jeweils in die Ecken eines auf einer seiner Spitze stehenden Tetraeders weisen.

[0090] In **Fig. 11** ist dargestellt, wie ein Piezo-Aktuator als Sensor für eine Strukturanalyse genutzt werden kann. Es handelt sich um eine Detailansicht eines beliebigen Piezo-Aktuators aus einem der oben angeführten Ausführungsbeispiele, also beispielsweise um den Piezo-Aktuator **16** in **Fig. 2**. Der Piezo-Aktuator besteht in diesem Beispiel aus einem Stapel mehrerer Piezokeramik-Elemente.

[0091] Durch eine variable Spannungsquelle **260** wird der Piezo-Aktuator **16** mit einer bestimmten Spannung beaufschlagt, wobei der Schalter **262** zunächst geschlossen ist. Wird dann der Schalter **262** schlagartig geöffnet, so ändert sich die Länge des Piezo-Aktuators **16** plötzlich. Das Gesamtsystem, also auch die hier nicht dargestellten anderen Elemente wie z. B. das Lastanschlusselement **28**, beginnt zu schwingen. Man bezeichnet dies als die Strukturantwort des Gesamtsystems auf die Stimulation durch Öffnen des Schalters **262**.

[0092] Die Schwingungen des Gesamtsystems wiederum bewirken einen sich periodisch ändernden Druck auf den Piezo-Aktuator **16**. Diese Druckschwankungen resultieren aufgrund des Piezoeffektes in Schwankungen der elektrischen Spannung zwischen den Elektroden **264** und **266** eines Piezokeramik-Elements **268** des Piezo-Aktuators **16**. Mit Hilfe eines Messgerätes **270** lassen sich diese Spannungsschwankungen registrieren und aufzeichnen.

[0093] Anstelle eines einfachen Ausschaltens der an den Piezo-Aktuator **16** angelegten Spannung lässt sich das Gesamtsystem auch noch durch andere Spannungsverläufe stimulieren. Beispielsweise kann eine einfache Sinusspannung verwendet werden oder ein Spannungspuls. Die jeweilige Strukturantwort des Gesamtsystems auf verschiedene Arten von Stimulationen lassen sich durch Vergleich mit Simulationswerten oder durch Vergleich mit Referenzstrukturantworten für eine Systemanalyse des Gesamtsystems nutzen. Wird beispielsweise die Strukturschnittstelle in einen Trägerarm eines Satelliten-

systems oder in ein Feder-Dämpfer-System im Fahrwerksbereich eines Kraftfahrzeugs integriert, so können durch regelmäßige Strukturanalysen z. B. frühzeitig Defekte (z. B. durch Materialermüdung etc.) detektiert und geeignete Gegenmaßnahmen ergriffen werden.

[0094] Weiterhin kann das als Sensor wirkende Piezokeramik-Element **268** in **Fig. 11** auch für eine aktive Schwingungsdämpfung gemäß **Fig. 3** eingesetzt werden. Anstelle des Signals des Beschleunigungssensors **60** in **Fig. 3** wird nun die zwischen den Elektroden **264** und **266** abfallende Spannung (nach geeigneter Phasenverschiebung im Phasenschieber **62**) als Eingangssignal für die Regelungselektronik **64** verwendet. Auf diese Weise kann auf das zusätzliche Einbringen eines Sensors in die Schnittstelle verzichtet werden.

[0095] In den **Fig. 12** und **13** sind mögliche Beschaltungen der Energiewandler zur Schwingungsdämpfung dargestellt. Es handelt sich wiederum um einen beliebigen Piezo-Aktuator der Schnittstelle, wobei auch mehrere Aktuatoren gleichzeitig in dieser oder ähnlicher Weise beschaltet werden können. Im Folgenden wird angenommen, dass es sich um den Aktuator **16** handelt, welcher sich zwischen dem Basisanschlusselement **10** und dem Lastanschlusselement **28** erstreckt. Das Basisanschlusselement **10** und das Lastanschlusselement **28** sind stark vereinfacht dargestellt, die Angriffspunkte **20** und **24** und die übrigen Komponenten der Schnittstelle sind aus Vereinfachungsgründen nicht dargestellt.

[0096] Der Piezo-Aktuator **16** in den **Fig. 12** und **13** ist, ähnlich zu der in **Fig. 11** dargestellten Anordnung, wieder als Stapel mehrerer (in diesem Fall sechzehn) Piezokeramikelemente ausgestaltet. Die (von der Seite des Basisanschlusselements **10** her gezählt) Piezokeramikelemente **7** bis **13** sind derart zu einer Einheit **280** zusammengefasst, dass das elektrische Potenzial dieser Einheit zwischen einem dem Basisanschlusselement **10** naheliegenden Anschluss **282** der Einheit **280** und einem dem Lastanschlusselement **28** naheliegenden Anschluss **284** der Einheit **280** abgegriffen werden kann.

[0097] In **Fig. 12** sind die Anschlüsse **282** und **284** mit jeweils einem Ende eines ohmschen Widerstands **286** verbunden. Weiterhin ist der Anschluss **282** mit Massepotenzial verbunden. In **Fig. 13** ist der Anschluss **282** mit einer Induktivität **288** verbunden. Diese Induktivität **288** ist mit einem ohmschen Widerstand **286** verbunden, welcher wiederum mit dem Anschluss **284** verbunden ist. Weiterhin ist der Anschluss **282** mit Massepotenzial verbunden. Wenn das Lastanschlusselement **28** relativ zum Basisanschlusselement **10** mechanische Schwingungen ausführt, so resultiert dies in periodisch schwankendem Druck auf den Piezo-Aktuator **16**. Diese Druck-

schwankungen führen aufgrund des piezoelektrischen Effekts zu Schwankungen der Ladung auf den gegenüberliegenden Oberflächen der Einheit **280**. Diese Ladungsschwankungen resultieren in einer Schwankung der Spannung zwischen den Anschlüssen **282** und **284**, was zu einem periodischen Stromfluss durch die elektrische Beschaltung führt.

[0098] Die Anordnung in **Fig. 13** wirkt wie ein aus einer Kapazität, einer Induktivität und einem ohmschen Widerstand bestehender gedämpfter Serienschwingkreis. Die Anschlüsse **282** und **284** wirken dabei wie die Platten eines Kondensators, deren Ladung periodisch variiert. Bei jeder Schwingung wird ein Teil der elektrischen Energie im Ohmschen Widerstand **286** in thermische Energie umgewandelt und die Schwingung dadurch gedämpft. Die Auswahl geeigneter ohmscher Widerstände und Induktivitäten erfolgt entsprechend dem in N.W. Hagood and A. von Flotow: Damping of Structural Vibrations with Piezoelectric Materials and Passive Electrical Networks, Journal of Sound and Vibration 146 (2), 243 (1991) beschriebenen Verfahren.

Bezugszeichenliste

1	interne Störquellen
2	aktives Element
3	aktives Element
4	Übertragungswege
5	empfindliche Elemente
10	Basisanschlusselement
12	Vorspanneinrichtung
14	Abstützelement
16	Piezo-Aktuator des ersten Aktuator-Systems zwischen Basisanschlusselement 10 und Lastanschlusselement 28
18	Piezo-Aktuator des ersten Aktuator-Systems zwischen Basisanschlusselement 10 und Lastanschlusselement 28
20	Angriffspunkt des Aktuators 16 auf dem Basisanschlusselement 10
22	Angriffspunkt des Aktuators 18 auf dem Basisanschlusselement 10
24	Angriffspunkt des Aktuators 16 auf dem Lastanschlusselement 28
26	Angriffspunkt des Aktuators 18 auf dem Lastanschlusselement 28
28	Lastanschlusselement
30	Piezoaktuator des zweiten Aktuator-Systems zwischen Abstützelement 15 und Lastanschlusselement 28

32	Piezoaktuator des zweiten Aktuator-Systems zwischen Abstützelement 15 und Lastanschlusselement 28	164	Angriffspunkt des Piezo-Aktuators 160 auf dem Basisanschlusselement
34	Angriffspunkt des Piezoaktuators 30 auf dem Abstützelement 14	166	Angriffspunkt des Piezo-Aktuators 162 auf dem Basisanschlusselement
36	Angriffspunkt des Piezoaktuators 32 auf dem Abstützelement 14	168	Angriffspunkt des Piezo-Aktuators 160 auf dem Lastanschlusselement
38	Angriffspunkt des Piezoaktuators 30 auf dem Lastelement 28	170	Angriffspunkt des Piezo-Aktuators 162 auf dem Lastanschlusselement
40	Angriffspunkt des Piezoaktuators 32 auf dem Lastelement 28	172	Piezo-Aktuator
42	Symmetrieachse	174	Piezo-Aktuator
60	Beschleunigungssensor	176	Angriffspunkt des Piezo-Aktuators 172 auf dem Abstützelement 180
62	Phasenschieber	178	Angriffspunkt des Piezo-Aktuators 174 auf dem Abstützelement 180
64	Regelungselektronik	180	Abstützelement
66	erster Nachverstärker	182	Angriffspunkt des Piezo-Aktuators 172 auf dem Lastanschlusselement
68	180°-Phasenschieber	184	Angriffspunkt des Piezo-Aktuators 174 auf dem Lastanschlusselement
70	zweiter Nachverstärker	190	Piezo-Aktuator
80	erstes Aktuator-Paar	192	Piezo-Aktuator
82	zweites Aktuator-Paar	194	Angriffspunkt des Piezo-Aktuators 190 auf dem Basisanschlusselement
84	drittes Aktuator-Paar	196	Angriffspunkt des Piezo-Aktuators 192 auf dem Basisanschlusselement
88	Kippachse	198	Angriffspunkt des Piezo-Aktuators 190 auf dem Lastanschlusselement
90	Kippachse	200	Angriffspunkt des Piezo-Aktuators 192 auf dem Lastanschlusselement
92	Kippachse	202	Piezo-Aktuator
100	Piezo-Aktuator	204	Piezo-Aktuator
102	Angriffspunkt des Piezo-Aktuators 100 auf dem Basisanschlusselement	206	Angriffspunkt des Piezo-Aktuators 202 auf dem Abstützelement 210
104	Angriffspunkt des Piezo-Aktuators 100 auf dem Lastanschlusselement	208	Angriffspunkt des Piezo-Aktuators 204 auf dem Abstützelement 210
106	Piezo-Aktuator	210	Abstützelement
108	Angriffspunkt des Piezo-Aktuators 106 auf dem Lastanschlusselement	212	Angriffspunkt des Piezo-Aktuators 202 auf dem Lastanschlusselement 28
110	Angriffspunkt des Piezo-Aktuators 106 auf dem Abstützelement	214	Angriffspunkt des Piezo-Aktuators 204 auf dem Lastanschlusselement 28
130	Piezo-Aktuator	216	Vorspanneinrichtung
132	Angriffspunkt des Piezo-Aktuators 130 auf dem Basisanschlusselement	218	Vorspanneinrichtung
134	Angriffspunkt des Piezo-Aktuators 130 auf dem Lastanschlusselement	230	Piezo-Aktuator
136	Piezo-Aktuator		
138	Angriffspunkt des Piezo-Aktuators 136 auf dem Lastanschlusselement		
140	Angriffspunkt des Piezo-Aktuators 136 auf dem Abstützelement		
142	Öffnung im Basisanschlusselement für elektrische Zuführung zu den Piezo-Aktuatoren		
160	Piezo-Aktuator		
162	Piezo-Aktuator		

- 232 Angriffspunkt des Piezo-Aktuators 230 auf dem Basisanschlusselement 10
- 234 Angriffspunkt des Piezo-Aktuators 230 auf dem Lastanschlusselement 28
- 236 Piezo-Aktuator
- 238 Angriffspunkt des Piezo-Aktuators 236 auf dem Abstützelement 180
- 240 Angriffspunkt des Piezo-Aktuators 236 auf dem Lastanschlusselement 28
- 242 Piezo-Aktuator
- 244 Angriffspunkt des Piezo-Aktuators 242 auf dem Abstützelement 210
- 246 Angriffspunkt des Piezo-Aktuators 242 auf dem Lastanschlusselement 28
- 260 variable Spannungsquelle
- 262 Schalter
- 264 erste Elektrode des Piezokeramik-Elements 268
- 266 zweite Elektrode des Piezokeramik-Elements 268
- 268 Piezokeramik-Element
- 270 Messgerät
- 280 zusammengefasste Einheit aus Piezokeramik-Elementen des – Piezo-Aktuators 16
- 282 dem Basisanschlusselement 10 naheliegender Anschluss der Einheit 280
- 284 dem Lastanschlusselement 28 naheliegender Anschluss der Einheit 280
- 286 ohmscher Widerstand
- 288 Induktivität

Liste der zitierten Literatur:

- US 5,660,255
DE 195 27 514 C2
N.W. Hagood and A. von Flotow: Damping of Structural Vibrations with Piezoelectric Materials and Passive Electrical Networks, Journal of Sound and Vibration 146 (2), 243 (1991).
D. Mayer, Ch. Linz, and V. Krajenski: Synthetische Induktivitäten für die semi-passive Dämpfung, 5. Magdeburger Maschinenbautage, 2001.

Patentansprüche

1. Schnittstelle zur Reduktion mechanischer Schwingungen, welche ein Basisanschlusselement (10), ein Lastanschlusselement (28) und mindestens ein Abstützelement (14; 180, 210) aufweist, **dadurch gekennzeichnet**,
a) dass sich zwischen mindestens einem auf dem

Basisanschlusselement (10) liegenden Angriffspunkt (20, 22; 102; 132; 164, 166, 194, 196; 232) und mindestens einem auf dem Lastanschlusselement (28) liegenden Angriffspunkt (24, 26; 104; 134; 168, 170, 198, 200) mindestens ein erstes Energiewandler-System (16, 18; 100; 130; 160, 162, 190, 192; 230) erstreckt;
b) dass sich zwischen mindestens einem auf dem Abstützelement (14; 180, 210) liegenden Angriffspunkt (34, 36; 110; 140; 176, 178, 206, 208) und mindestens einem auf dem Lastanschlusselement (28) liegenden Angriffspunkt (38, 40; 108; 138; 182, 184, 212, 214) mindestens ein zweites Energiewandler-System (30, 32; 106; 136; 172, 174, 202, 204) erstreckt;
c) dass das Basisanschlusselement (10) mit dem mindestens einen Abstützelement (14; 180, 210) über mindestens eine Vorspanneinrichtung (12; 216, 218) derart verbunden ist, dass durch die Vorspanneinrichtung eine Vorlast auf das erste (16, 18; 100; 130; 160, 162, 190, 192; 230) und das zweite (30, 32; 106; 136; 172, 174, 202, 204) Energiewandler-System ausgeübt werden kann; und
d) dass das Lastanschlusselement (28) einen in einem Zwischenraum zwischen dem Basisanschlusselement (10) und dem Abstützelement (14; 180, 210) liegenden Teil und einen außerhalb des Zwischenraums zwischen dem Basisanschlusselement (10) und dem Abstützelement (14; 180, 210) liegenden Teil aufweist.

2. Schnittstelle nach dem vorhergehenden Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass die Energiewandler-Systeme (16, 18, 30, 32; 100, 106; 130, 136; 160, 162, 190, 192, 172, 174, 202, 204; 230, 238, 242) mindestens eins der folgenden Elemente aufweisen:
– einen Piezo-Aktuator,
– einen Formgedächtnislegierungs-Aktuator,
– einen elektro- oder magnetorheologischen Flüssigkeits-Aktuator oder Flüssigkeitsdämpfer, oder
– einen elektro- oder magnetostriktiven Aktuator.

3. Schnittstelle nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass das Basisanschlusselement (10) und das Lastanschlusselement (28) standardisierte Anschlussgeometrien aufweisen.

4. Schnittstelle nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorspanneinrichtung (12) ein die Aktuator-Systeme (16, 18, 30, 32; 100, 106; 130, 136) umschließendes Rohr aufweist.

5. Schnittstelle nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens ein Sensorsystem (60) zur Bestimmung von Weg und/oder Geschwindigkeit und/oder Beschleunigung und/oder Kraft mit dem Lastanschlusselement

ment **(28)** verbunden ist.

6. Schnittstelle nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass mindestens ein Energiewandler-System (**16, 18, 30, 32; 100, 106; 130, 136; 160, 162, 172, 174, 190, 192, 202, 204; 230, 236, 242**) als Aktuator-System ausgebildet ist, und dass mindestens ein Aktuator-System oder ein Teil mindestens eines Aktuator-Systems gleichzeitig als Energiewandler genutzt werden kann, der mechanische Energie in elektrische Energie umwandeln kann.

7. Anordnung zur Reduktion mechanischer Schwingungen, gekennzeichnet durch,
– eine Schnittstelle nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
– mindestens ein als Bewegungs- und/oder Beschleunigungs- und/oder Geschwindigkeits- und/oder Kraftsensor wirkendes System, und
– eine elektronische Schaltung, welche aus einem Signal des als Bewegungs- und/oder Beschleunigungs- und/oder Geschwindigkeits- und/oder Kraftsensor wirkenden Systems eine Zielfunktion zur Ansteuerung der Energiewandler-Systeme der Schnittstelle generiert.

8. Anordnung zur Reduktion mechanischer Schwingungen, gekennzeichnet durch,
– eine Schnittstelle nach Anspruch 6, und
– eine elektronische Schaltung zur passiven oder semi-aktiven Schwingungsreduktion.

9. Anordnung zur Reduktion mechanischer Schwingungen, dadurch gekennzeichnet, dass mehrere Schnittstellen nach einem der vorhergehenden Ansprüche in Kaskaden derart hintereinandergeschaltet sind, dass jeweils das Basisanschlusselement (**10**) der folgenden Schnittstelle mit dem Lastanschlusselement (**28**) der vorhergehenden Schnittstelle verbunden ist.

Es folgen 12 Blatt Zeichnungen

Fig. 1

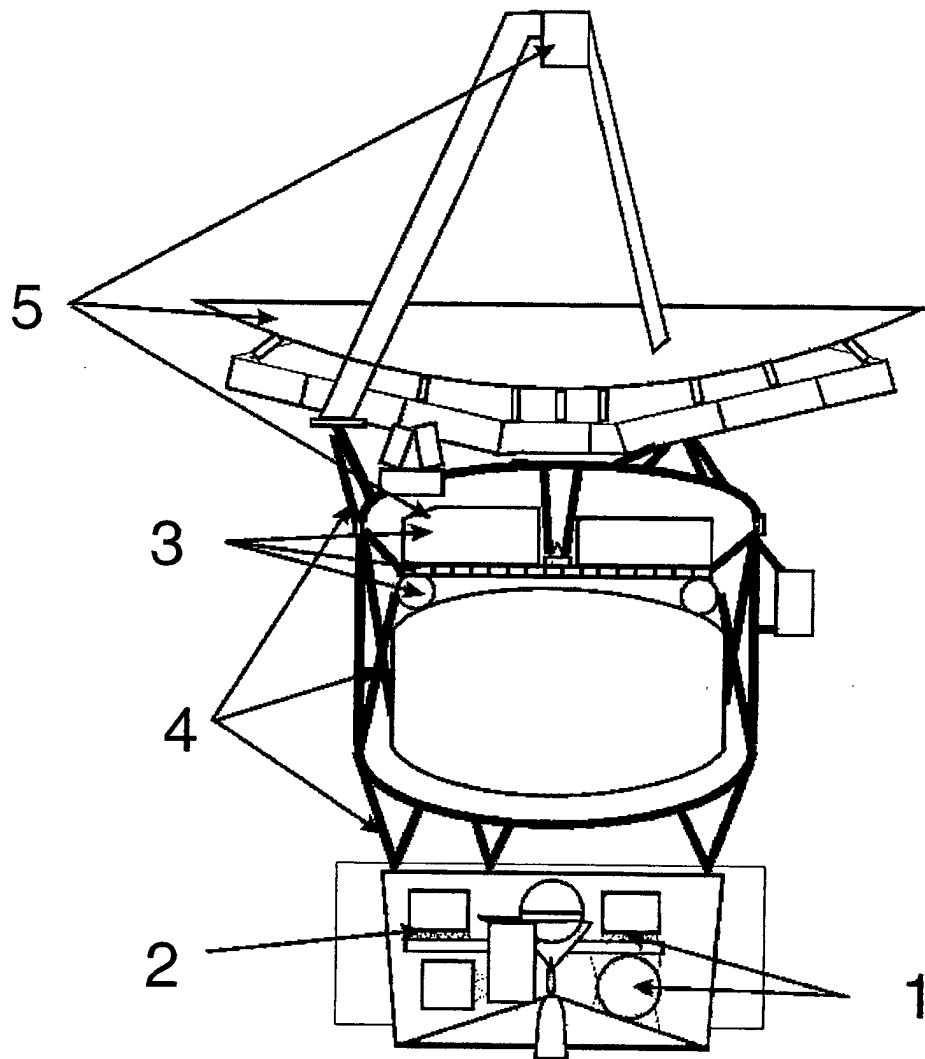


Fig. 2

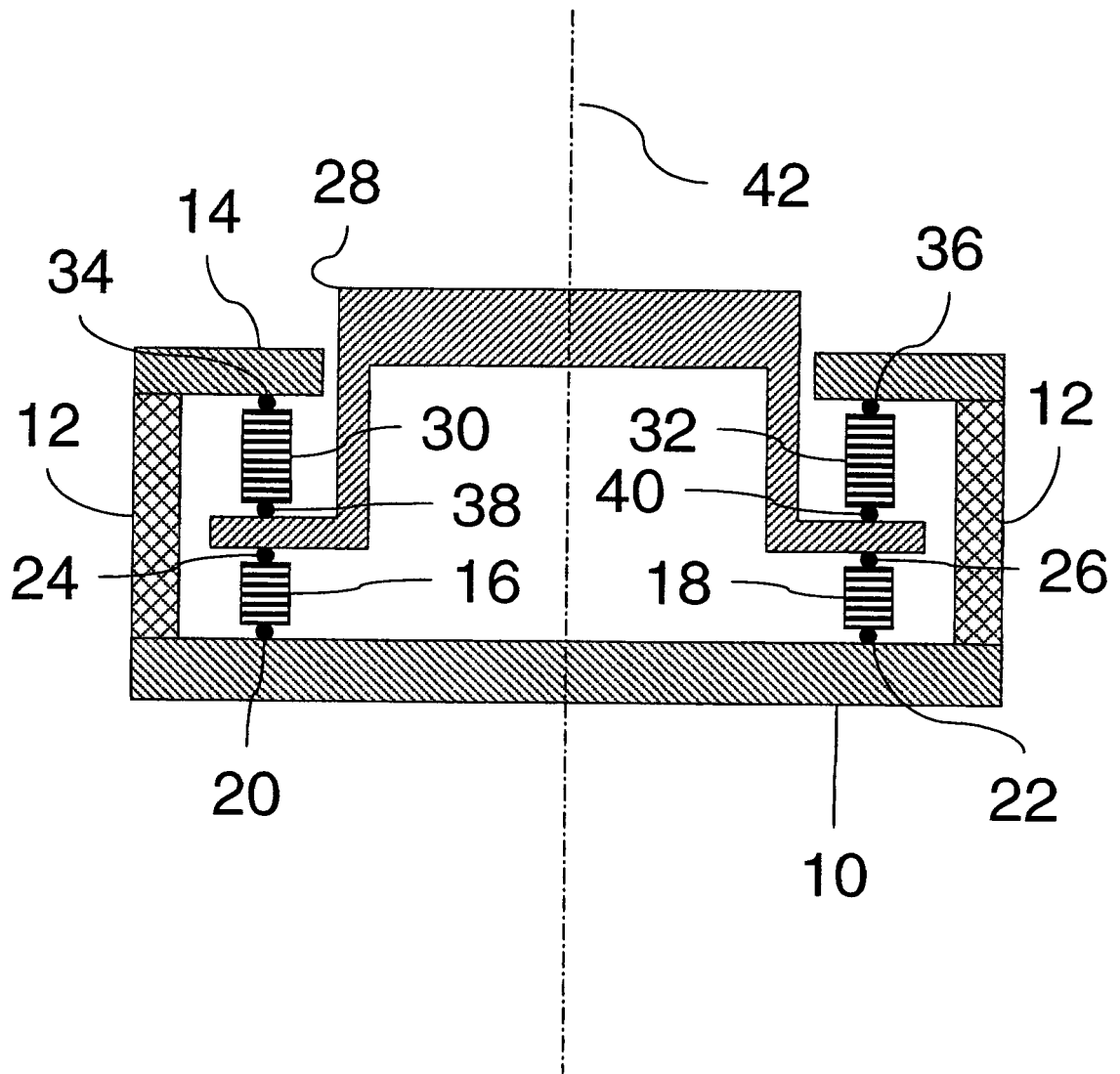


Fig. 3

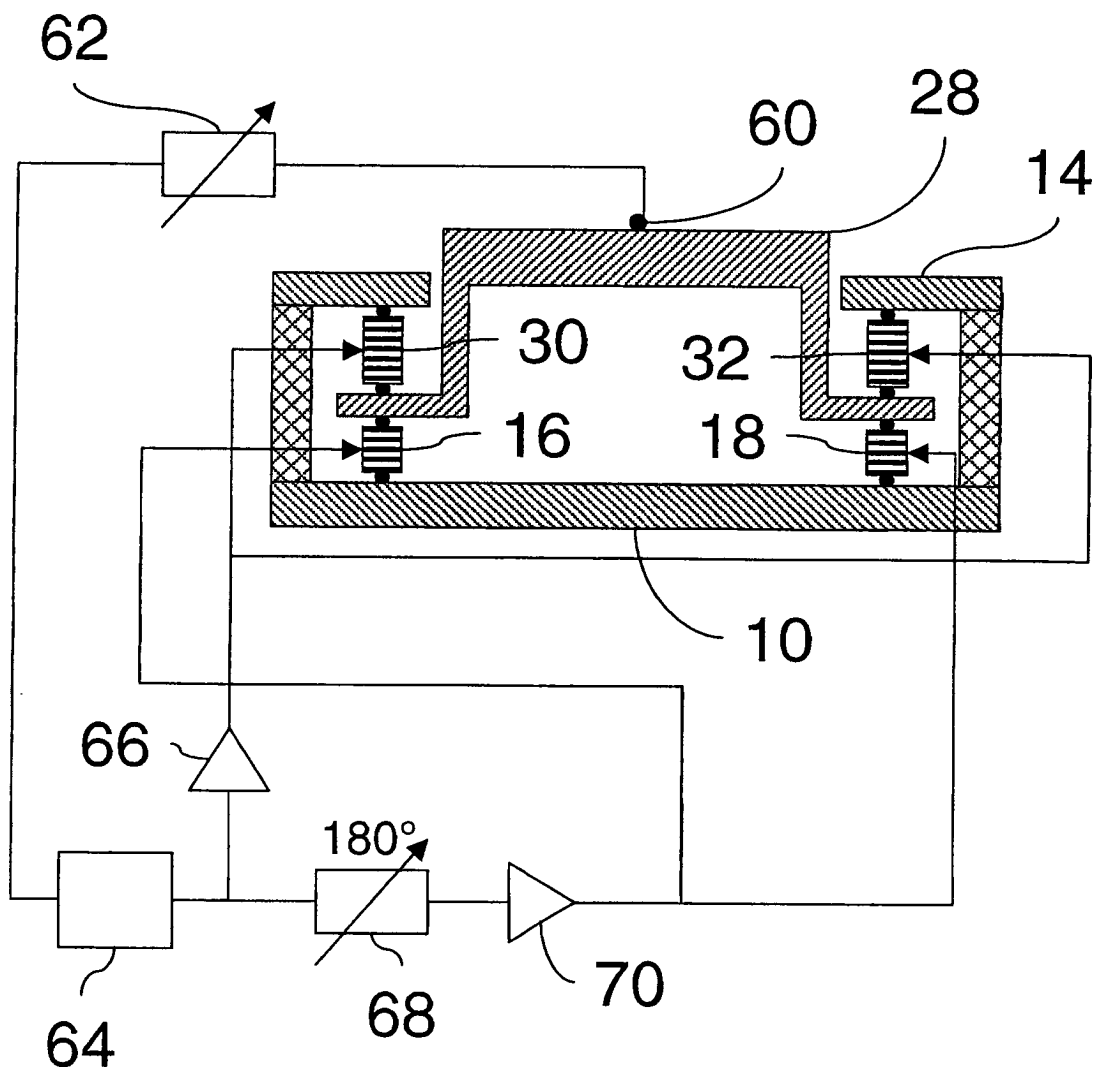


Fig. 4

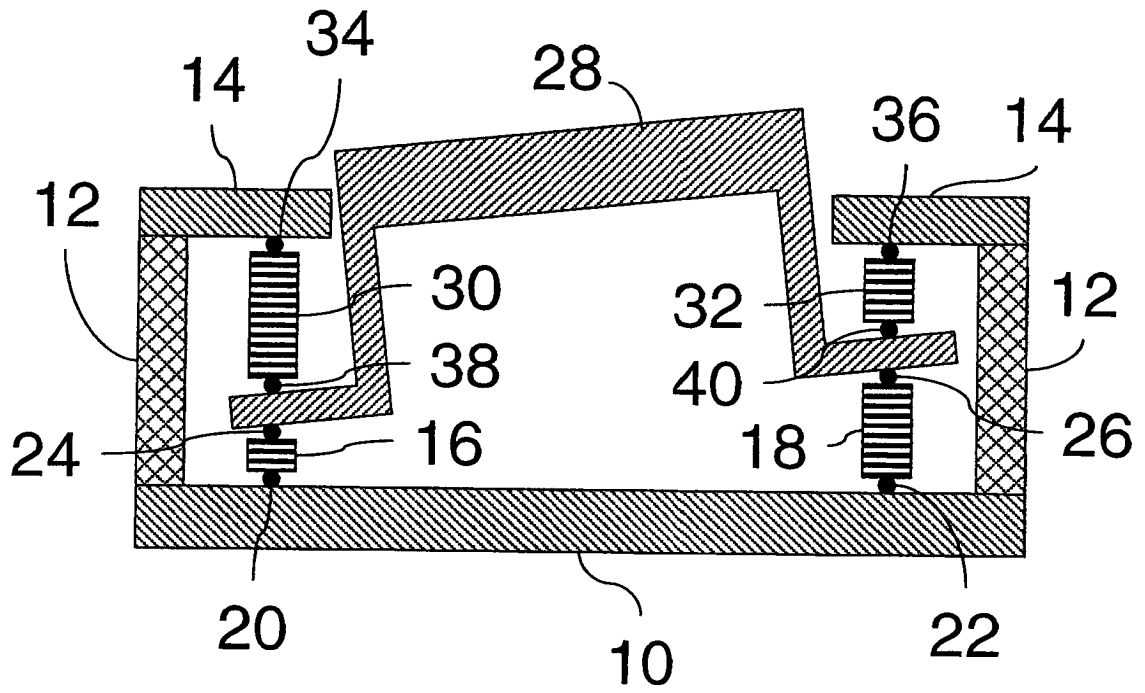


Fig. 5

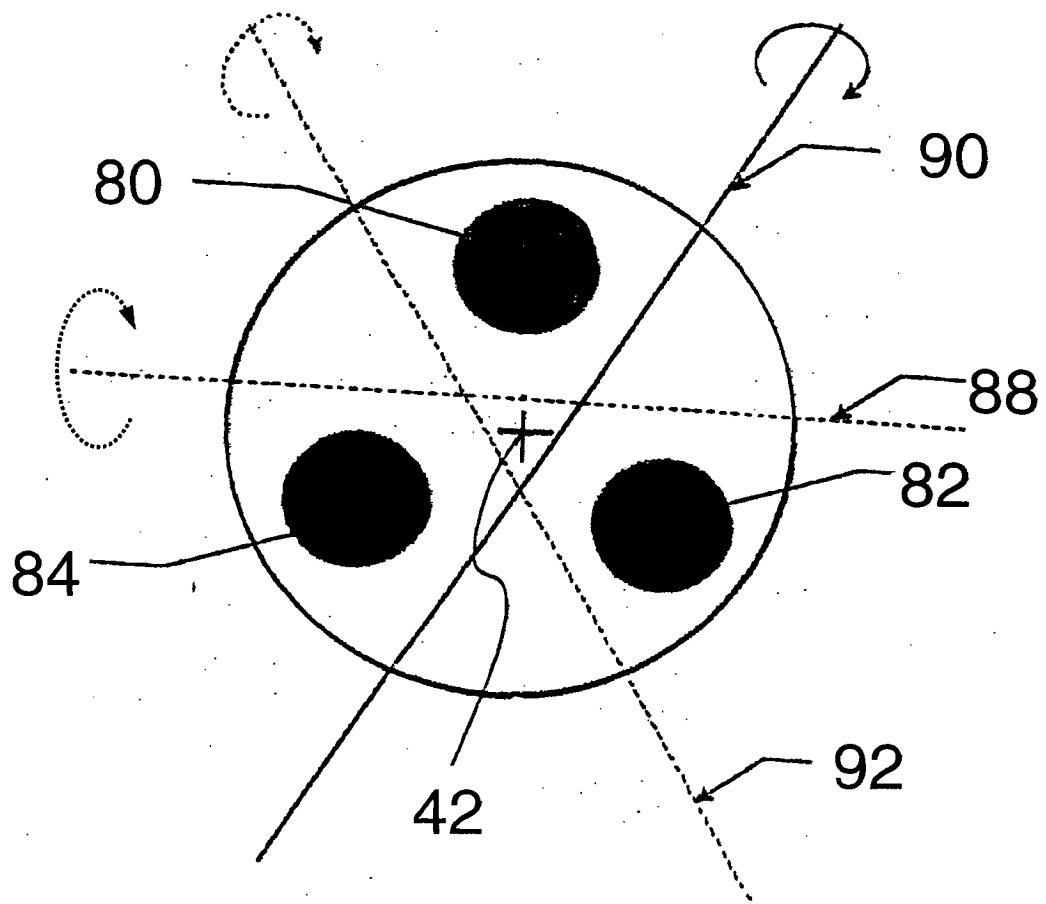


Fig. 6

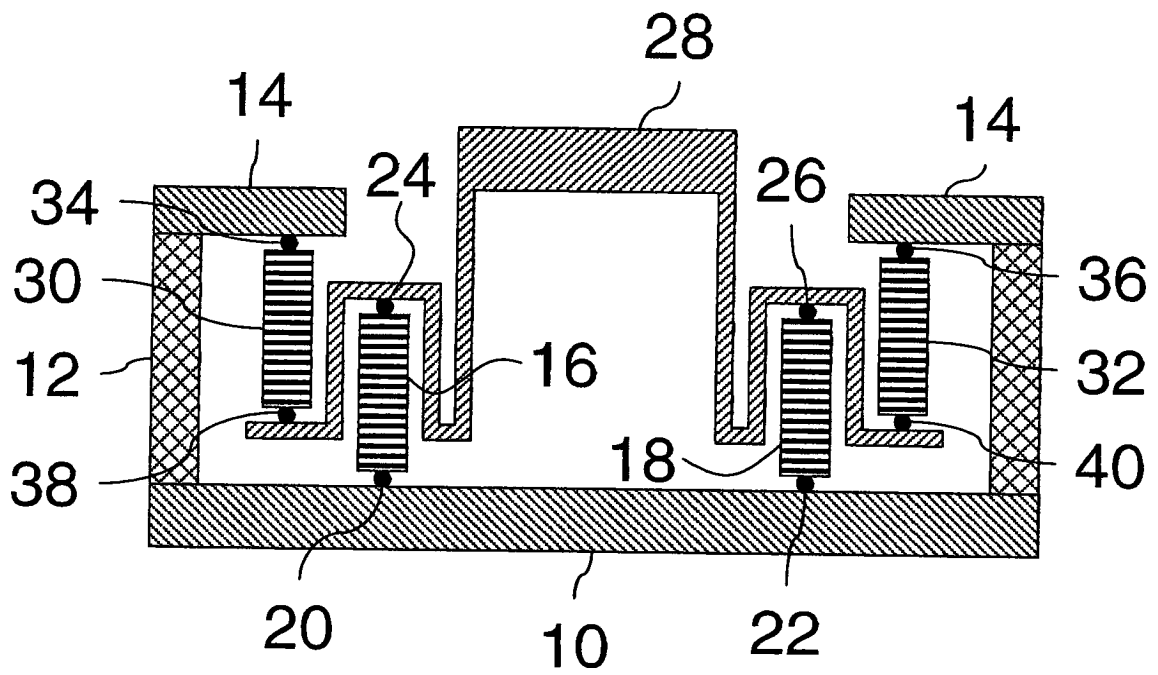


Fig. 7

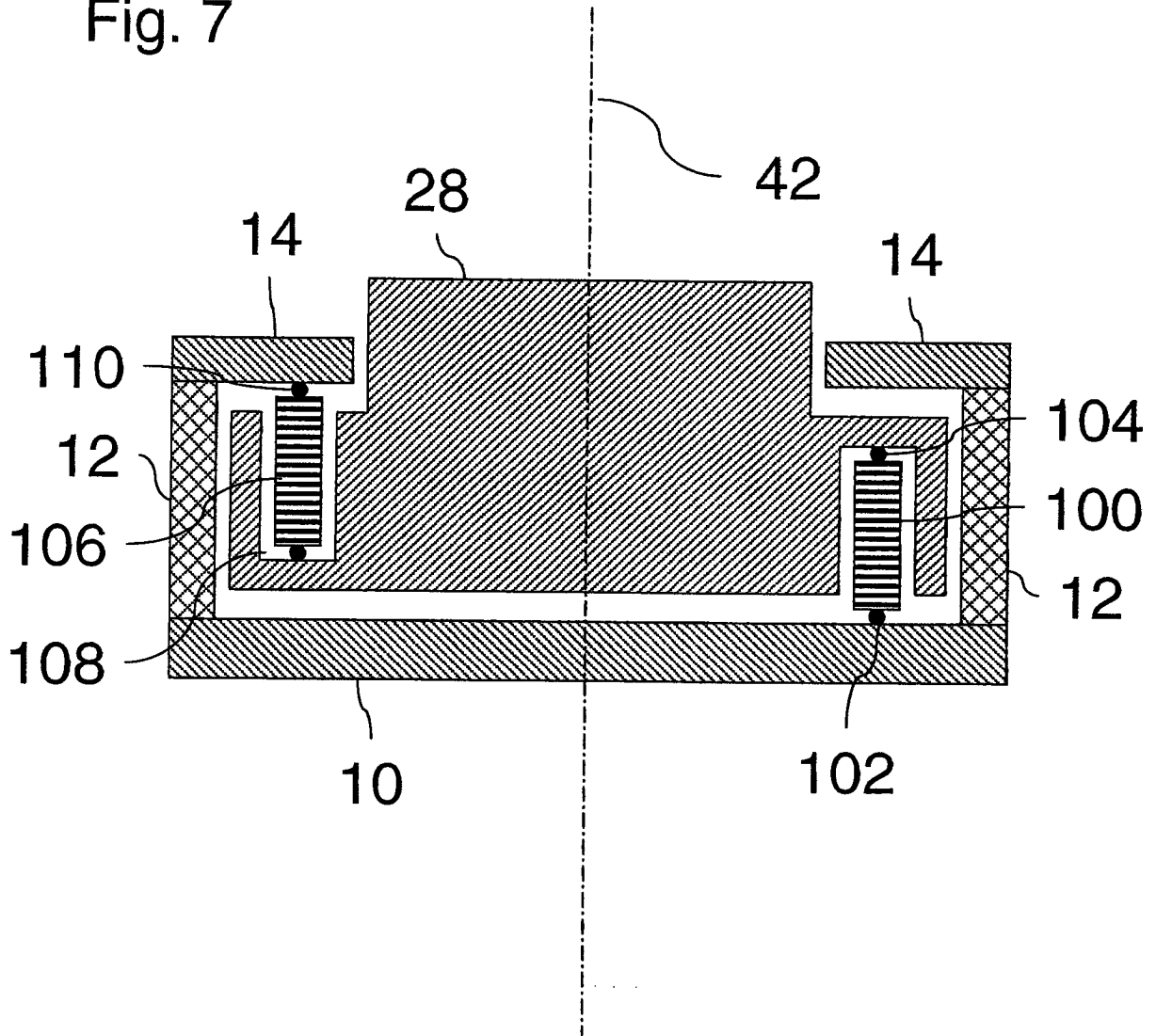


Fig. 8

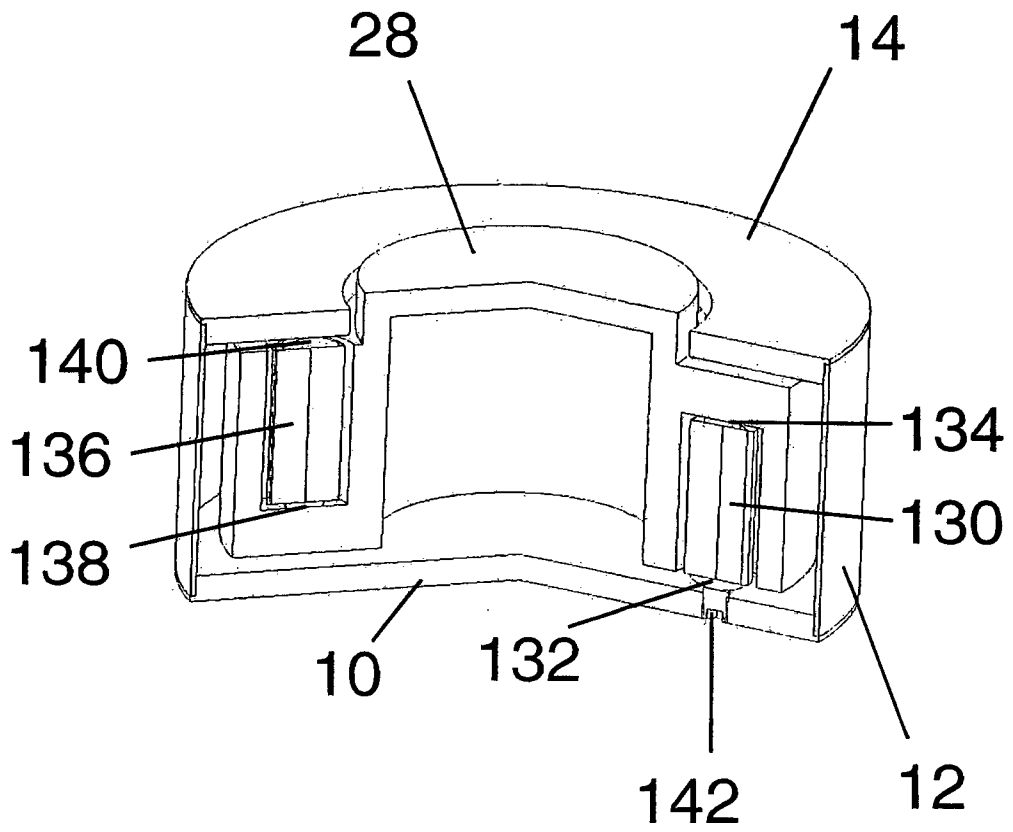


Fig. 9

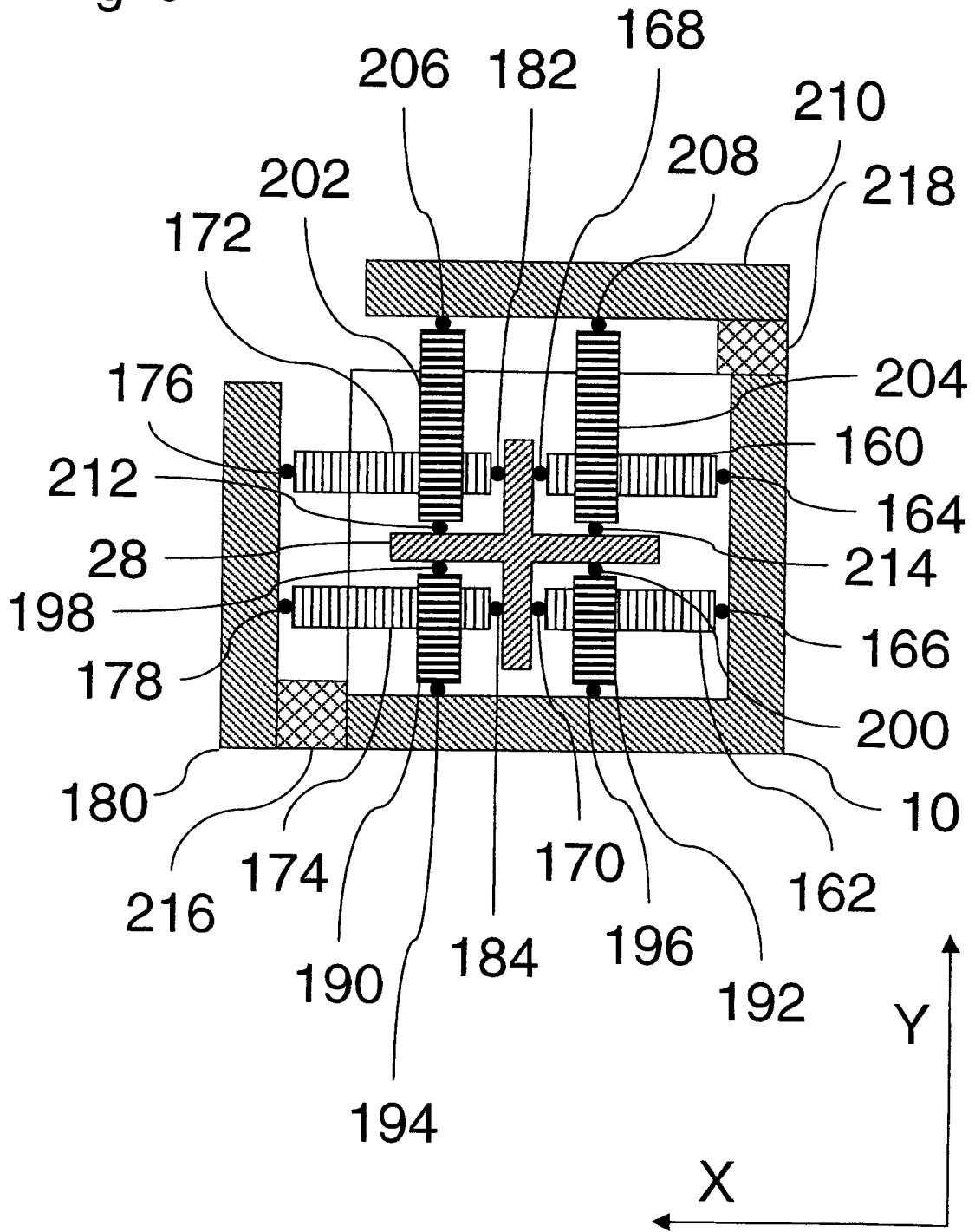


Fig. 10

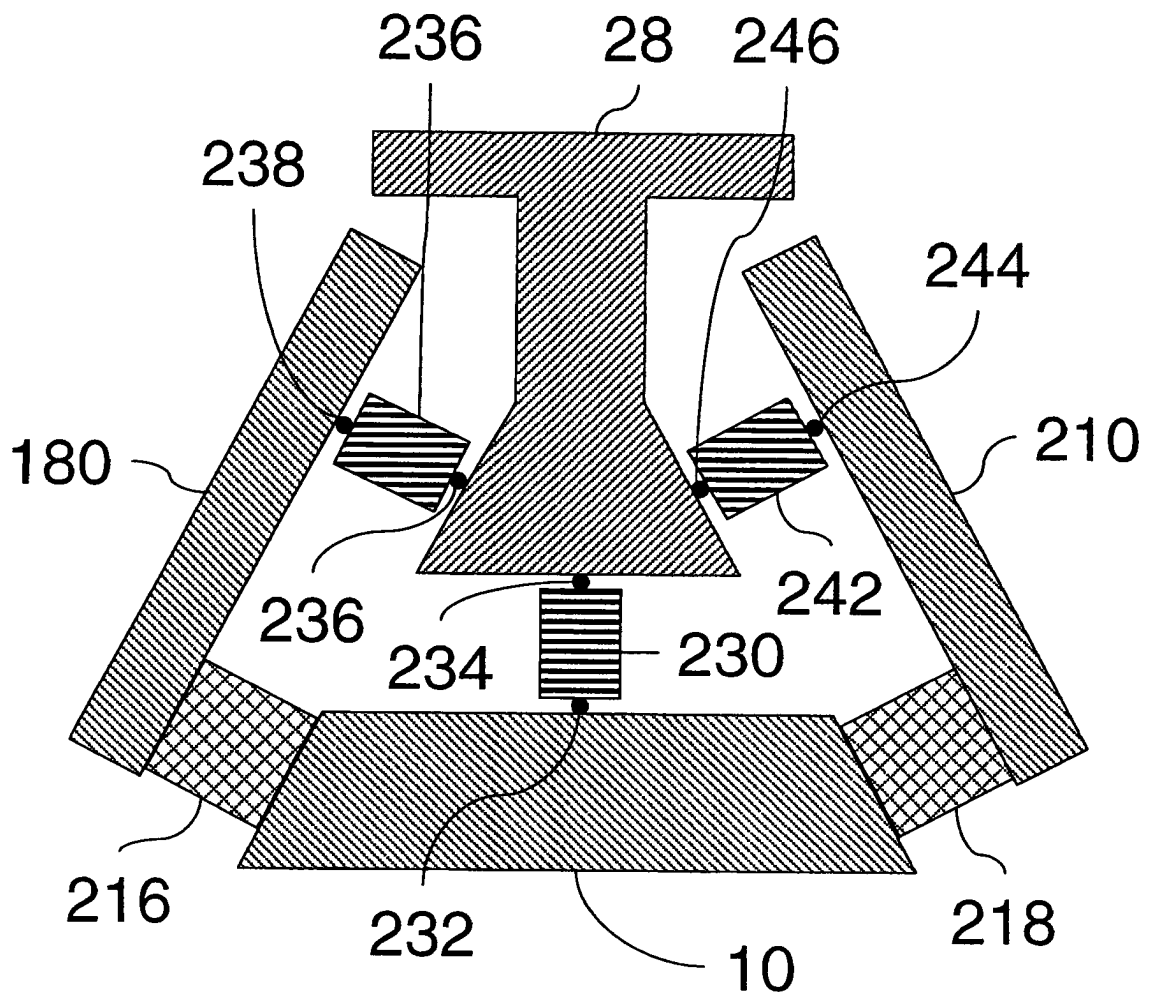


Fig. 11

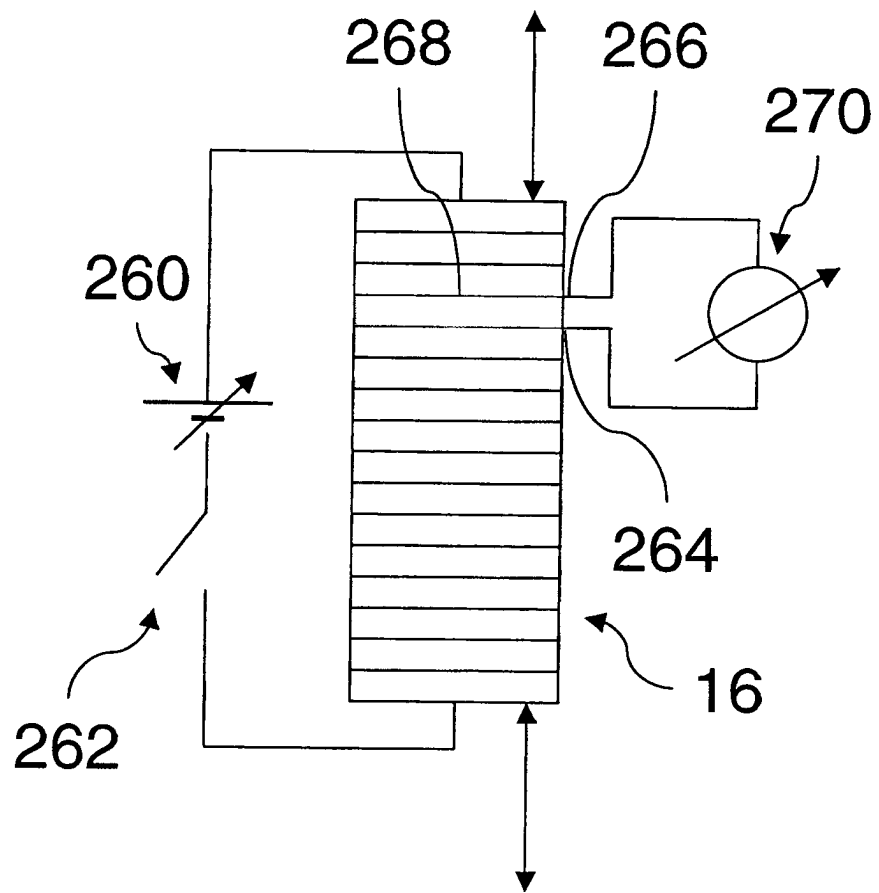


Fig. 12

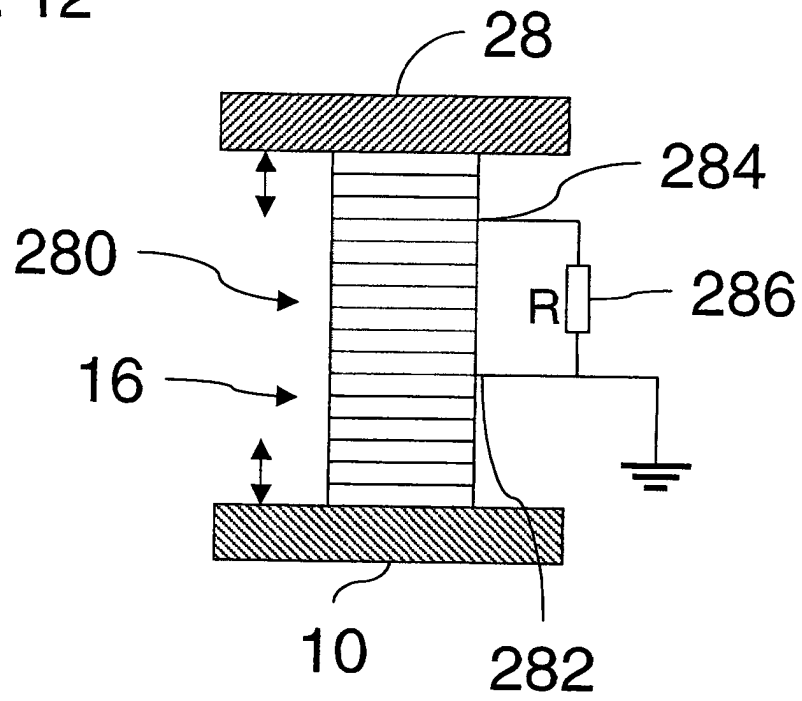


Fig. 13

