



(12) **Patentschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2015 114 245.7**
(22) Anmeldetag: **27.08.2015**
(43) Offenlegungstag: **02.03.2017**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **17.04.2025**

(51) Int Cl.: **B81B 7/02 (2006.01)**
H04R 1/00 (2006.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
USound GmbH, Graz, AT

(74) Vertreter:
**Canzler & Bergmeier Patentanwälte Partnerschaft
mbB, 85055 Ingolstadt, DE**

(72) Erfinder:
**Rusconi Clerici Beltrami, Andrea, Wien, AT;
Bottoni, Ferruccio, Graz, AT**

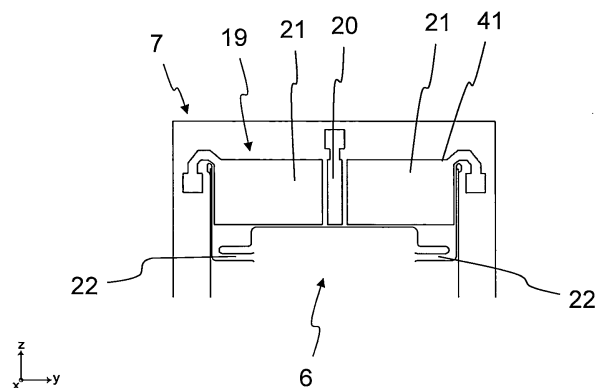
(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	10 2012 215 239	A1
DE	10 2014 106 753	A1
US	2011 / 0 075 867	A1
US	2011 / 0 182 150	A1
US	2014 / 0 177 881	A1
US	2 860 183	A
EP	1 051 058	A2
WO	86/ 01 362	A1

(54) Bezeichnung: **MEMS-Lautsprecher mit geschlossenem Regelsystem**

(57) Hauptanspruch: MEMS-Lautsprecher (1) zum Erzeugen von Schallwellen im hörbaren Wellenlängenspektrum mit einem Tragelement (9), einer gegenüber dem Tragelement (9) entlang einer z-Achse auslenkbaren Membran (2), zumindest einem sich am Tragelement (9) abstützenden piezoelektrischen Aktuator (7) zum Auslenken der Membran (2), der über eine Hubstruktur (6) mit der Membran (2) verbunden ist, und einer elektronischen Steuereinheit (11) zum Ansteuern des Aktuators (7), dadurch gekennzeichnet, dass der MEMS-Lautsprecher (1) zumindest einen Positionssensor (19) umfasst, mittels dem der Steuereinheit (11) ein von der Membranauslenkung abhängiges Sensor-signal (37) bereitstellbar ist, dass der Positionssensor (19) zumindest teilweise in den Aktuator (7) integriert ist, so dass mit diesem mittelbar die Position der Membran (2) entlang der z-Achse erfassbar ist, dass ein Verbindungselement (22) ein freies Ende des Positionssensors (19) mit der Hubstruktur (6) verbindet und dass die Steuereinheit (11) derart ausgebildet ist, dass sie elastische Schwingungseigenschaften des Verbindungselements (22) berücksichtigt und dass sie ein Funktionsselbsttest-Verfahren, ein Verzerrungsreduktions-Verfahren, ein Beschädigungsschutz-Verfahren und/oder ein Kompensations-Verfahren von Verhaltensänderungen durchführt, wobei sie das Sensor-signal (37) analysiert und/oder mit einem in der Steuerein-

heit (11) abgespeicherten Referenzsignal (8) abgleicht und den Aktuator (7) unter Berücksichtigung des Analyseergebnisses (35) und/oder Vergleichsergebnisses (34) geregelt ansteuert.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft einen MEMS-Lautsprecher zum Erzeugen von Schallwellen im hörbaren Wellenlängenspektrum mit einem Tragelement, insbesondere einem Membrantragrahmen, einer gegenüber dem Tragelement entlang einer z-Achse auslenkbaren Membran, zumindest einem sich am Tragelement abstützenden piezoelektrischen Aktuator zum Auslenken der Membran und einer elektronischen Steuereinheit zum Ansteuern des Aktuators.

[0002] Die Bezeichnung MEMS steht für mikroelektromechanische Systeme. Derartige Systeme werden besonders in elektronischen Geräten verbaut, die nur wenig Bauraum bieten. Die Performance bekannter MEMS-Lautsprecher ist größtenteils von idealen Umgebungsbedingungen abhängig. Schon kleine Schläge oder andere Umwelteinflüsse, wie Temperatur oder Luftdruck, können sich dabei nachteilig auf die Leistungsfähigkeit des Systems auswirken. Ferner können Alterungseffekte die Leistungsfähigkeit derartiger MEMS-Lautsprecher negativ beeinflussen. Die heutigen Anforderungen an derartige MEMS-Lautsprecher verlangen jedoch langfristig auch bei sich verändernden äußeren Einflüssen eine zumindest gleichbleibende Klangqualität.

[0003] Die US 2014/0177881 A1 offenbart ein Membranergerät. Dieses umfasst einen Träger, eine auf dem Träger aufgehängte Membran und einen ersten Aktuator, der zum Aufbringen einer Kraft in Kontakt mit der Membran ist. Ein zweiter Aktuator, ebenfalls in Kontakt mit der Membran, dient zum Aufbringen einer weiteren Kraft. Mittel zur Bestimmung der Position der Membran relativ zum Träger sind ebenso vorhanden. Steuermittel der ersten und zweiten Aktuatoren wenden ein Verformungssignal auf einen der Aktuatoren an. Ein Steuersignal wird auf den anderen Aktuator angewendet, um die Verschiebung der Membran zu kontrollieren. Die Anwendung des Steuersignals basiert auf der Position der Membran.

[0004] Aus der DE 10 2014 106 753 A1 ist ein MEMS-Lautsprecher bekannt. Dieser dient zum Erzeugen von Schallwellen im hörbaren Wellenlängenspektrum. Er umfasst ein Trägersubstrat mit einem Substrathohlraum und zwei Substratöffnungen auf gegenüberliegenden Seiten. Eine piezoelektrische Aktuatorstruktur ist im Bereich einer Substratöffnung angeordnet und mit dem Randbereich des Trägersubstrats verbunden. Eine in ihrem Randbereich verankerte Membran ist durch die Aktuatorstruktur in Schwingung versetzbar. Zudem ist ein Koppelement vorhanden, das die Aktuatorstruktur mit der Membran verbindet und Schwingungen gegenüber dem Trägersubstrat ermöglicht.

[0005] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, einen MEMS-Lautsprecher zu schaffen, mit dem die aus dem Stand der Technik bekannten Nachteile beseitigt werden können, insbesondere einen MEMS-Lautsprecher zu schaffen, der im Vergleich zu den aus dem Stand der Technik bekannten eine höhere Lebensdauer, eine verbesserte Leistungsfähigkeit und/oder eine verbesserte Klangqualität aufweist.

[0006] Die Aufgabe wird gelöst durch einen MEMS-Lautsprecher mit den Merkmalen des unabhängigen Patentanspruchs 1.

[0007] Vorgeschlagen wird ein MEMS-Lautsprecher zum Erzeugen von Schallwellen im hörbaren Wellenlängenspektrum. Der MEMS-Lautsprecher weist ein Tragelement und eine gegenüber dem Tragelement entlang einer z-Achse auslenkbare Membran auf. Das Tragelement kann hierbei ein Tragrahmen sein. Die Membran überspannt vorzugsweise eine Aussparung des Tragrahmens, so dass die Membran gegenüber dem Tragrahmen zur Erzeugung von Schallwellen in z-Richtung auslenkbar ist. Des Weiteren umfasst der MEMS-Lautsprecher zumindest einen sich am Tragelement abstützenden piezoelektrischen Aktuator zum Auslenken der Membran. Der piezoelektrische Aktuator ist hierbei vorzugsweise als Kantilever bzw. Kragarm ausgebildet. Demnach ist eines seiner beiden Enden fest am Tragelement befestigt, wo hingegen das freie Ende in z-Richtung auslenkbar ist. Mit dem gegenüber dem Tragelement frei beweglichen anderen Ende ist der Aktuator mittelbar über eine Tragstruktur mit der Membran verbunden, so dass beim Auslenken des Aktuators zugleich die Membran in z-Achse ausgelenkt wird. Der piezoelektrische Aktuator umfasst vorzugsweise zumindest eine piezoelektrische Schicht.

[0008] Außerdem umfasst der MEMS-Lautsprecher eine elektronische Steuereinheit zum Ansteuern des Aktuators. Der MEMS-Lautsprecher weist ferner zumindest einen Positionssensor auf. Mit diesem ist mittelbar die Position bzw. Auslenkung der Membran entlang der Z-Achse erfassbar. Der Positionssensor ist vorzugsweise ein piezoelektrischer, ein piezoresistiver und/oder ein kapazitiver Sensor. Mittels des Positionssensors ist der Steuereinheit ein von der Membranauslenkung abhängiges Sensorsignal bereitstellbar.

[0009] Die Steuereinheit ist ausgebildet, um einen Funktionsselbsttest durchzuführen. Auch ist die Steuereinheit ausgebildet, um Verzerrungen zu reduzieren. Außerdem ist die Steuereinheit ausgebildet, um die bewegten Komponenten des MEMS-Lautsprechers vor Überbelastungen und infolgedessen Beschädigungen zu schützen. Ferner ist die Steuereinheit ausgebildet, um durch Alterungseffekte und/oder äußere Einflüsse bedingte Verhaltensände-

rungen des MEMS-Lautsprechers kompensieren zu können. Hierfür ist die Steuereinheit derart ausgebildet, dass das Sensorsignal analysierbar und/oder mit einem in der Steuereinheit abgespeicherten Referenzsignal abgleichbar ist. Durch die Analyse des Ist-Sensorsignals können beispielsweise Eigenschaften des MEMS-Lautsprechers bestimmt werden, wie beispielsweise dessen Eigenfrequenz. Ferner kann beispielsweise eine nichtlineare Oszillation des Sensorsignals identifiziert werden.

[0010] Durch den Abgleich des Sensorsignals mit dem Referenzsignal können bei Feststellung einer Abweichung Verhaltensänderungen des MEMS-Lautsprechers festgestellt werden. Derartige Verhaltensänderungen können beispielsweise durch äußere Einflüsse, insbesondere Temperatur und/oder Druckänderungen hervorgerufen werden. Ebenso können aber auch Alterungseffekte, insbesondere der piezoelektrischen Schicht des Aktuators, eine Veränderung des Verhaltens hervorrufen. So kann sich der piezoelektrische Koeffizient durch äußere Einflüsse oder Alterungseffekte degenerieren, wodurch die piezoelektrische Leistungsfähigkeit reduziert wird. Infolgedessen kann der piezoelektrische Aktuator bei einer Referenzspannung im Laufe der Zeit eine immer geringere Kraft und infolgedessen einen immer geringeren Hub der Membran hervorrufen.

[0011] Ferner können durch einen derartigen Abgleich aber auch nichtlineare Oszillationen des MEMS-Lautsprecher identifiziert werden, die eine Verzerrung des ausgegebenen Klangs hervorrufen. Aber auch Überbelastungen, die zu einer Beschädigung der bewegten Komponenten des MEMS-Lautsprechers führen können, sind durch eine derartige Analyse und/oder einen derartigen Abgleich identifizierbar.

[0012] Um eine Beschädigung des MEMS-Lautsprechers vermeiden zu können und die Klangqualität unabhängig von äußeren Einflüssen sowie Alterungseffekten auf einem gleichbleibend hohen Niveau sicherstellen zu können, ist die Steuereinheit ferner derart ausgebildet, dass der Aktuator unter Berücksichtigung des Analyseergebnisses und/oder des Vergleichsergebnisses geregelt ansteuerbar ist. Demnach ist der Aktuator beispielsweise bei Feststellung einer alterungsbedingten oder durch äußere Einflüsse hervorgerufenen Leistungsminderung fortan mit einer höheren elektrischen Spannung betreibbar. Hierbei wird demnach der piezoelektrische Aktuator mit einem die Leistungsminderung kompensierender höheren Spannung betrieben. Ebenso kann der piezoelektrische Aktuator aber auch bei einer festgestellten Überbelastung und/oder Verzerrung mit einer reduzierten Spannung betrieben werden. Zusammenfassend ist demnach festzustellen, dass der MEMS-Lautsprecher mit einer

gemäß der vorangegangenen Beschreibung ausgebildeten Steuereinheit langlebiger und/oder über längeren Zeitraum mit gleichbleibend hoher Klangqualität betrieben werden kann.

[0013] Vorteilhaft ist es, wenn mittels der Steuereinheit zumindest ein Signalwert analysierbar und/oder mit einem Referenzwert abgleichbar ist. Zusätzlich oder alternativ ist es ferner vorteilhaft, wenn der zeitliche Signalverlauf des Sensorsignals analysierbar und/oder mit einem Referenzsignalverlauf abgleichbar ist. Dies kann vorzugsweise innerhalb eines Zeitfensters und/oder eines festgelegten Frequenzbereiches erfolgen. So ist es insbesondere vorteilhaft zumindest einen einzelnen Signalwert zu analysieren und/oder mit einem Referenzwerte abzugleichen, um ein Funktionstest durchführen zu können, eine Verhaltensänderung verstellen zu können und/oder eine Überbelastung identifizieren zu können. Des Weiteren kann insbesondere durch die Analyse und/oder den Abgleich eines Signalverlaufs zur Verzerrungsreduktion eine nichtlineare Oszillation festgestellt werden.

[0014] Zum Funktionsselbsttest und/oder zur Verstellung einer Verhaltensänderung ist es vorteilhaft, wenn die Steuereinheit derart ausgebildet ist, dass durch die Analyse des vom Positionssensor an die Steuereinheit übermittelter Ist-Sensorsignals ein Ist-Standardverhalten des MEMS-Lautsprechers ermittelbar ist. Dieses ermittelte Ist-Standardverhalten kann dann, insbesondere bei der ersten Inbetriebnahme des MEMS-Lautsprechers, als Referenz-Standardverhaltens in einem Speicher der Steuereinheit hinterlegt sein. Dieses in einem ersten Schritt festgestellte Ist-Standardverhaltens bildet dann das neue Referenzsignal bzw. das neue Soll-Standardverhaltens, mittels dem durch einen erneuten Abgleich eine erneute Verhaltensveränderung des MEMS-Lautsprechers feststellbar ist.

[0015] Zum Funktionsselbsttest ist es ferner vorteilhaft, wenn in der Steuereinheit ein von einem Referenz-Aktuatorsignal abhängiges Soll-Sensorsignal abgespeichert ist. Dieses Soll-Sensorsignal gibt demnach das Soll-Standardverhalten des MEMS-Lautsprechers wieder.

[0016] Zum Funktionsselbsttest ist es ferner vorteilhaft, wenn die Steuereinheit derart ausgebildet ist, dass der Aktuator mit dem Referenz-Aktuatorsignal, welches eine Soll-Auslenkung der Membran hervorruft bzw. erzeugt, ansteuerbar ist. Nach dieser Ansteuerung mit dem Referenz-Aktuatorsignal ist es vorteilhaft, wenn das von der Ist-Auslenkung abhängige Ist-Sensorsignal mit dem Soll-Sensorsignal abgleichbar ist. Ferner ist es vorteilhaft, wenn die Steuereinheit bei diesem Abgleich eine Abweichung des Ist-Sensorsignals vom Soll-Sensorsignal zu ermitteln vermag. Zusätzlich oder alternativ ist es

vorteilhaft, wenn die Steuereinheit bei einer festgestellten Abweichung eine Fehlermeldung ausgibt und/oder an eine übergeordnete Steuereinheit meldet. Hierdurch kann der MEMS-Lautsprecher vorzugsweise selbstständig überprüfen, ob dieser ordnungsgemäß arbeitet. Falls dem nicht so ist, ist es vorteilhaft, wenn die Steuereinheit derart ausgebildet ist, dass sie fortan bei einer Ansteuerung des Aktuators über eine Anpassung der elektronischen Ansteuerung diese Verhaltensänderung kompensiert.

[0017] Des Weiteren ist es vorteilhaft, wenn die Steuereinheit derart ausgebildet ist, dass diese den Funktionsselbsttest automatisch bei einem sensorisch erkannten Ereignis durchzuführen vermag. Ein derartiges Ereignis ist insbesondere ein identifizierter Systemstart, eine sensorisch erfasste äußere Stoßeinwirkung oder eine sensorisch erfasste Verhaltensänderung des MEMS-Lautsprechers.

[0018] Beim Funktionsselbsttest ist es vorteilhaft, wenn die Steuereinheit derart ausgebildet ist, dass diese zumindest zwischen zwei Fehlerarten, insbesondere einer Aktuatorbeschädigung, einer Membranbeschädigung und/oder einer Verstopfung der Schallaustrittsöffnung, differenzieren kann. Hierdurch kann eine gezielte Gegenmaßnahme eingeleitet werden, um den identifizierten Fehler zumindest teilweise kompensieren zu können.

[0019] Nachfolgend kommen vorteilhafte Ausgestaltungen der Steuereinheit zur Verzerrungsreduktion. Demnach ist es vorteilhaft, wenn die Steuereinheit zur Verzerrungsreduktion derart ausgebildet ist, dass durch die Analyse des Ist-Sensorsignals eine nichtlineare Oszillation des MEMS-Lautsprechers ermittelbar ist. Hierfür wird vorzugsweise der zeitliche Signalverlauf des Sensorsignals analysiert. Durch eine derart identifizierte nichtlineare Oszillation können Verzerrungen festgestellt werden.

[0020] Zur Verzerrungsreduktion ist es vorteilhaft, wenn die Steuereinheit derart ausgebildet ist, dass der Aktuator mit einem die ermittelte nichtlineare Oszillation zumindest teilweise reduzierenden Kompensation-Aktuatorsignal ansteuerbar ist. Hierdurch kann die Klangqualität des MEMS-Lautsprechers verbessert werden.

[0021] Zur Realisierung eines Beschädigungsschutzes ist die Steuereinheit vorzugsweise gemäß der nachfolgenden Beschreibung ausgebildet. Demnach ist es vorteilhaft, wenn die Steuereinheit derart ausgebildet ist, dass durch die Analyse des Ist-Sensorsignals, insbesondere der Höhe zumindest eines Signalwertes, ein Maximalausschlag der Membran ermittelbar ist. Hierdurch kann eine bereits erfolgte oder unmittelbar bevorstehende Überbelastung der

bewegten Komponenten des MEMS-Lautsprechers zuverlässig identifiziert werden.

[0022] Zum Beschädigungsschutz ist es ferner vorteilhaft, wenn in der Steuereinheit ein Schwellwert mit einer maximal zulässigen Schwellwerthöhe abgespeichert ist. Der Schwellwert bzw. dessen Schwellwerthöhe definiert hierbei die maximal zulässige Auslenkung entlang der z-Achse, bis zu der der MEMS-Lautsprecher mindestens beschädigungsfrei betreibbar ist.

[0023] Zusätzlich ist es vorteilhaft, wenn die Steuereinheit zum Beschädigungsschutz des MEMS-Lautsprecher derart ausgebildet ist, dass zum Erkennen einer Überbelastung das von einer ersten Auslenkung abhängige Ist-Sensorsignal, insbesondere zumindest ein Signaleinzelwert, mit dem maximal zulässigen Schwellwert abgleichbar ist. Ferner ist es vorteilhaft, wenn die Steuereinheit ausgebildet ist, um den Aktuator bei einem identifizierten Überschreiten des Schwellwertes mit einem, insbesondere reduzierten, Aktuatorsignal anzusteuern, das eine zur ersten Auslenkung reduzierte zweite Auslenkung erzeugt. Hierdurch kann vorteilhafterweise vermieden werden, dass die bewegten Komponenten des MEMS-Lautsprechers derart stark ausgelenkt werden, dass diese beschädigt werden.

[0024] Die nachfolgenden Spezifikationen der Steuereinheit sind insbesondere zum Beschädigungsschutz und/oder zur Kompensation von Verhaltensänderungen des MEMS-Lautsprechers vorteilhaft. Demnach ist es vorteilhaft, wenn die Steuereinheit zu diesem Zweck derart ausgebildet ist, dass durch die Analyse des Ist-Sensorsignals eine Ist-Eigenfrequenz des MEMS-Lautsprechers ermittelbar ist. Die Ist-Eigenfrequenz stellt hierbei eine das aktuelle Verhalten des MEMS-Lautsprecher repräsentierende Eigenschaft dar. Des Weiteren ist die Kenntnis über die Ist-Eigenfrequenz notwendig, um bei einer zeitlich zu langen Ansteuerung im Bereich der Eigenfrequenz eine Beschädigung des MEMS-Lautsprechers vermeiden zu können.

[0025] Vorteilhaft ist es, wenn in der Steuereinheit zur Ermittlung der Ist-Eigenfrequenz ein Analysesignal, insbesondere ein Rauschsignal, abgespeichert ist. Das Analysesignal erstreckt sich vorzugsweise innerhalb eines unterhalb der Resonanzfrequenz des MEMS-Lautsprechers liegenden Frequenzbereichs.

[0026] Diesbezüglich ist es ferner vorteilhaft, wenn die Steuereinheit zur Ermittlung der Ist-Eigenfrequenz derart ausgebildet ist, dass der Aktuator mit dem Analysesignal ansteuerbar ist und/oder ein die Ist-Eigenfrequenz identifizierendes Maximum innerhalb des Frequenzbereiches ermittelbar ist. Hierdurch kann schnell und mit einfachen Mitteln die Ist-

Eigenfrequenz des MEMS-Lautsprechers ermittelt werden.

[0027] Zum Beschädigungsschutz und/oder zur Kompensation von Verhaltensänderungen ist es vorteilhaft, wenn in der Steuereinheit eine Referenz-Eigenfrequenz abgespeichert ist.

[0028] Ferner ist es diesbezüglich vorteilhaft, wenn die Steuereinheit zum Beschädigungsschutz und/oder zur Kompensation von Verhaltensänderungen derart ausgebildet ist, dass die ermittelte Ist-Eigenfrequenz des MEMS-Lautsprechers mit der hinterlegten Referenz-Eigenfrequenz abgleichbar ist.

[0029] Zusätzlich oder alternativ ist es ferner vorteilhaft, wenn bei einer Abweichung der Ist-Eigenfrequenz von der Referenz-Eigenfrequenz die ermittelte Ist-Eigenfrequenz als neue Referenz-Eigenfrequenz abspeicherbar ist.

[0030] Diesbezüglich ist es vorteilhaft, wenn die Steuereinheit zum Beschädigungsschutz und/oder zur Kompensation von Verhaltensänderungen derart ausgebildet ist, dass die Ansteuerung des Aktuators unter Berücksichtigung der neuen Referenz-Eigenfrequenz erfolgt. Demnach kann die neu ermittelte und abgespeicherte Referenz-Eigenfrequenz nunmehr berücksichtigt werden, um zur Vermeidung einer Überbelastung den MEMS-Lautsprecher im Bereich der neuen Eigenfrequenz zeitlich reduziert anzusteuern. Des Weiteren dient die neue abgespeicherte Referenz-Eigenfrequenz dazu, um im Laufe der Zeit weitere Verhaltensänderungen identifizieren zu können.

[0031] Vorgeschlagen wird ferner ein Arbeitsverfahren für einen MEMS-Lautsprecher gemäß der vorangegangenen Beschreibung wobei die vorstehend genannten Merkmale, insbesondere in Bezug auf die Arbeitsweise der Steuereinheit, einzeln oder in beliebiger Kombination vorhanden sein können. Des Weiteren wird insbesondere ein Arbeitsverfahren zum Funktionstest, zur Verzerrungsreduktion, zum Beschädigungsschutz und/oder zur Kompensation von Verhaltensänderungen vorgeschlagen, wobei zumindest eines dieser Verfahren gemäß der vorangegangenen Beschreibung ausgebildet ist. Hierbei können ebenfalls die genannten Verfahrensmerkmale einzeln oder in beliebiger Kombination vorhanden sein.

[0032] Weitere Vorteile der Erfindung sind in den nachfolgenden Ausführungsbeispielen beschrieben. Es zeigt:

Fig. 1 eine perspektivische Schnittansicht eines MEMS-Lautsprechers, gemäß einem Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung,

Fig. 2 eine schematische Draufsicht eines Ausführungsbeispiels eines piezoelektrischen Aktuators mit integriertem Positionssensor,

Fig. 3 eine schematische Draufsicht eines zweiten Ausführungsbeispiels eines piezoelektrischen Aktuators mit integriertem Positionssensor,

Fig. 4 eine schematische Seitenansicht des zweiten Ausführungsbeispiels eines piezoelektrischen Aktuators mit integriertem Positionssensor,

Fig. 5 eine schematische Draufsicht eines dritten Ausführungsbeispiels eines piezoelektrischen Aktuators mit piezoresistivem Positionssensor,

Fig. 6 eine schematische Draufsicht eines vierten Ausführungsbeispiels eines piezoelektrischen Aktuators mit kapazitivem Positionssensor und

Fig. 7 die Arbeitsweise des MEMS-Lautsprechers veranschaulichende schematische Darstellung des Informationsfußes zwischen Steuereinheit, Aktuator und Positionssensor.

[0033] Bei der nachfolgenden Figurenbeschreibung werden, um die Beziehungen zwischen den verschiedenen Elementen zu definieren, bezugnehmend auf die jeweils in den Figuren dargestellte Lage der Objekte relative Begriffe, wie beispielsweise oberhalb, unterhalb, oben, unten, drüber, drunter, links, rechts, vertikal und horizontal, verwendet. Es versteht sich von selbst, dass sich diese Begrifflichkeiten bei einer Abweichung von der in den Figuren dargestellten Lage der Vorrichtungen und/oder Elemente verändern können. Demnach würde beispielsweise bei einer in Bezug auf die Figuren dargestellten invertierten Orientierung der Vorrichtungen und/oder Elemente ein in der nachfolgenden Figurenbeschreibung als oberhalb spezifiziertes Merkmal nunmehr unterhalb angeordnet sein. Die verwendeten Relativbegriffe dienen somit lediglich zur einfacheren Beschreibung der relativen Beziehungen zwischen den einzelnen im nachfolgenden beschriebenen Vorrichtungen und/oder Elemente.

[0034] **Fig. 1** zeigt ein erstes Ausführungsbeispiel eines MEMS-Schallwandlers, der als MEMS-Lautsprecher 1 ausgebildet ist.

[0035] Der MEMS-Lautsprecher 1 ist zum Erzeugen von Schallwellen im hörbaren Wellenlängenspektrum ausgebildet. Hierzu besitzt der MEMS-Lautsprecher 1 eine Membran 2 und einen Membranträger 3. Die Membran 2 ist in ihrem Randbereich 4 mit dem Membranträger 3 verbunden und vermag gegenüber dem Membranträger 3 entlang einer z-Achse zu schwingen. Die z-Achse verläuft dabei im Wesentlichen senkrecht zur Membran 2. An der Unterseite

der Membran 2 ist ein Verstärkungselement 5 angeordnet.

[0036] Der MEMS-Lautsprecher 1 weist neben der Membran 2 eine Hubstruktur 6, die mit der Membran 2 gekoppelt ist, und zumindest einen piezoelektrischen Aktuator 7 auf. Der Aktuator 7 ist über eine Hubstruktur 6 mit der in z-Richtung bewegbaren Membran 2 verbunden. Der Membranträger 3 ist an einem Trägersubstrat 9 des piezoelektrischen Aktuators 7 angeordnet. Der piezoelektrische Aktuator 7 ist unterhalb der Membran 2 und/oder im Wesentlichen parallel zu dieser angeordnet. Der piezoelektrische Aktuator 7 ist ausgebildet, um eine uni- oder bidirektionale Hubbewegung der Hubstruktur 6 hervorzurufen, um die Membran 2 auszulenken. Er wirkt mit der Membran 2 zusammen, um elektrische Signale in akustisch wahrnehmbare Schallwellen zu wandeln. Der piezoelektrische Aktuator 7 bzw. die piezoelektrische Aktuatorstruktur ist an einer der Membran 2 abgewandten Seite des Trägersubstrates 9 angeordnet.

[0037] Des Weiteren umfasst der MEMS-Lautsprecher 1 eine Leiterplatte 10. In die Leiterplatte 10 ist eine elektronische Steuereinheit 11, insbesondere ein ASIC, vollständig eingebettet. Die Steuereinheit 11 ist somit vollständig gekapselt. Zusätzlich zu der Steuereinheit 11 können auch weitere passive Komponenten 12, wie elektrische Widerstände und/oder E/A-Kontakte, in die Leiterplatte 10 eingebettet und/oder an dieser angeordnet sein. Der MEMS-Lautsprecher 1 und insbesondere der piezoelektrische Aktuator 7 sind mit in den Figuren nicht weiter dargestellten elektrischen Kontakten mit der Steuereinheit 11 verbunden. Der MEMS-Lautsprecher 1 kann somit über die Steuereinheit 11 angesteuert bzw. betrieben werden, so dass durch den piezoelektrischen Aktuator 7 die Membran 2 zur Erzeugung von Schallenergie gegenüber dem Membranträger 3 in Schwingung versetzt wird. Der piezoelektrische Aktuator 7 ist dabei als Kragarm 13 ausgebildet. Er hat demnach ein fest eingespanntes und ein frei schwingendes Ende.

[0038] Der MEMS-Lautsprecher 1 ist gemäß **Fig. 1** in einem Gehäuse 14 angeordnet. Das Gehäuse 14 umfasst einen oberen Gehäuseteil 15 und einen unteren Gehäuseteil 16. Der obere Gehäuseteil 15 bildet einen Schalleitkanal 17 mit einer akustischen Ein-/Austrittsöffnung 18 aus. Diese ist seitlich an einer Außenfläche des MEMS-Lautsprechers 1 angeordnet. Das Gehäuse 14 bietet insbesondere einen zusätzlichen Schutz für die Membran 2, da es diese gegenüber der Umgebung abdeckt.

[0039] Der MEMS-Lautsprecher 1 weist zumindest einen Positionssensor 19 auf. Der Positionssensor 19 ist ausgebildet, um der elektronischen Steuereinheit 11 ein von der Membranauslenkung abhängiges

Sensorsignal bereitzustellen. Die Steuereinheit 11 ist ausgebildet, um den Aktuator 7 basierend auf dem Sensorsignal geregelt anzusteuern. Der Positionssensor 19 kann zu diesem Zweck ein piezoelektrischer, ein piezoresistiver und/oder ein kapazitiver Sensor sein. Der Positionssensor 19 ist zumindest teilweise in dem Aktuator 7, insbesondere in dem Kragarm 13, integriert.

[0040] Bei dem in **Fig. 1** dargestellten Ausführungsbeispiel kann der Positionssensor 19 gemäß der in den Figuren gezeigten nachfolgenden Ausführungsbeispiele ausgebildet sein. Demnach ist der Positionssensor 19 und der piezoelektrische Aktuator 7 gemäß dem in **Fig. 2** dargestellten Ausführungsbeispiel durch eine gemeinsame piezoelektrische Schicht 41 gebildet (vgl. **Fig. 2**). Die piezoelektrische Schicht 41 ist aus Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) ausgebildet. Zumindest ein Bereich ist ein Sensorbereich 20, durch welchen zwei Aktuatorbereiche 21 voneinander beabstandet angeordnet sind. Die Sensor- und Aktuatorbereiche 20, 21 sind elektrisch voneinander isoliert. Da sich die Anforderungen für Sensorik und Aktuatorik unterscheiden können, ist auch eine Kombination verschiedener piezoelektrischer Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften denkbar. Dabei kann der Sensorbereich 20 aus PZT und der Aktuatorbereich 21 aus Aluminiumnitrid (AlN) ausgebildet sein.

[0041] Der Sensorbereich 20 ist gemäß **Fig. 2** zwischen den beiden Aktuatorbereichen 21 angeordnet und erstreckt sich symmetrisch in Kragarm längsrichtung. Die Aktuatorbereiche 21 sind durch den Sensorbereich 20 vollständig voneinander getrennt. Der Sensorbereich 20 und der Aktuatorbereich 21 weisen in Kragarm längsrichtung die gleiche Länge auf. Die beiden Aktuatorbereiche 21 sind flächenmäßig größer als der Sensorbereich 20.

[0042] Bei einer Auslenkung der Membran 1 über den Aktuator 7 wird nun deren Position bzw. Auslenkung in z-Richtung mittels des Positionssensors 19 erfasst. Dabei wird die über den piezoelektrischen Effekt generierte Spannung, welche näherungsweise proportional zur Auslenkung der Hubstruktur 6 ist, über die Aktuator-Elektroden abgegriffen und entsprechend ausgewertet. Die Steuereinheit 11 bestimmt anhand dieses erfassten Eingangssignals die Ist-Position bzw. Ist-Auslenkung der Membran 2. Dabei werden die elastischen Schwingungseigenschaften eines Verbindungselements 22 berücksichtigt. Das Verbindungselement 22 verbindet ein freies Ende des Positionssensors 19 mit der Hubstruktur 6. In Abhängigkeit dieser erfassten Ist-Position der Membran 2 bestimmt die Steuereinheit 11 eine gewünschte Soll-Position der Membran und/oder ein davon abhängiges elektronisches Ausgangssignal. Das Ausgangssignal wird an den Aktuator 7 übermittelt, der die Membran 2 entsprechend aus-

lenkt. Während und/oder am Ende der Auslenkbewegung wird über den Positionssensor 19 erneut die tatsächliche Ist-Position der Membran 2 erfasst und gegebenenfalls gemäß der vorangegangenen Beschreibung erneut an die Umgebungsbedingungen angepasst.

[0043] Fig. 2 zeigt, wie bereits vorstehend erwähnt, eine schematische Draufsicht eines ersten Ausführungsbeispiels eines piezoelektrischen Aktuators 7 mit integriertem Positionssensor 19. Der piezoelektrische Aktuator 7 weist dabei zwei Aktuatorbereiche 21 auf, die durch den Sensorbereich 20 voneinander getrennt sind. Beide Bereiche 20, 21 sind aus PZT ausgebildet. Es sind jedoch auch andere piezoelektrische Materialien denkbar. Dabei wäre es auch denkbar, dass ein großer Teil für die Aktorik und nur ein kleiner Bereich für den Sensor verwendet wird. Der Sensorbereich 20 ist dabei elektrisch von den Aktuatorbereichen 21 isoliert. Um einer ungewollten Verkipfung der Hubstruktur 6 aufgrund eines asymmetrischen Antriebs vorzubeugen, sollten die Aktuator- und Sensorbereiche 21, 20 jeweils paarweise gegenüber angeordnet sein.

[0044] Die Fig. 3 und 4 zeigen jeweils eine schematische Ansicht eines zweiten Ausführungsbeispiels des piezoelektrischen Aktuators 7 mit Positionssensor 19. Der piezoelektrische Positionssensor 19 ist dabei gemäß Fig. 4 durch eine erste piezoelektrische Schicht 23, insbesondere aus AlN, ausgebildet. Der piezoelektrische Aktuator 7 ist durch eine zweite piezoelektrische Schicht 24, insbesondere aus PZT, ausgebildet. Die beiden Schichten sind voneinander elektrisch isoliert und in Bezug zur z-Achse übereinander angeordnet.

[0045] Die erste piezoelektrische Schicht 23 ist gemäß Fig. 3 in mehrere Sensorbereiche 20 unterteilt. Die Sensorbereiche 20 sind voneinander getrennt und/oder elektrisch isoliert. In dem in Fig. 3 dargestellten Ausführungsbeispiel sind drei Sensorbereiche 20 ausgebildet, die in Kragarmquerrichtung voneinander beabstandet angeordnet sind. Dies erfolgt insbesondere äquidistant. Die zweite piezoelektrische Schicht 24 weist einen sich über den Kragarm 13 erstreckenden Aktuatorbereich 21 auf. Dieser Aktuatorbereich 21 erstreckt sich zumindest in einer Draufsicht vollflächig über den Kragarm 13. Die beiden Aktuatorbereiche 21 weisen in Kragarm längsrichtung die gleiche Länge auf. Es ist jedoch auch denkbar, dass sich der Sensorbereich 20 nicht über die gesamte Kragarm längsrichtung erstreckt, sondern nur über einen Teil davon. In diesem Fall würde die Differenz zur Kragarmlänge durch einen weiteren nicht dargestellten Aktuatorbereich ausgebildet sein.

[0046] Wie in Fig. 4 dargestellt, bilden beide piezoelektrischen Schichten 23, 24 einen Stapel aus, der

von einer Tragschicht 25 getragen wird. Die Tragschicht 25 ist mit der Leiterplatte 10 verbunden. Im dargestellten Ausführungsbeispiel ist die erste piezoelektrische Schicht 23, welche den Positionssensor 19 ausbildet über der zweiten piezoelektrischen Schicht 24, insbesondere dem Aktuator 7, angeordnet. Die erste piezoelektrische Schicht 23 könnte jedoch auch unter dem piezoelektrischen Aktuator 7 angeordnet sein.

[0047] Fig. 5 zeigt eine schematische Draufsicht eines dritten Ausführungsbeispiels eines piezoelektrischen Aktuators 7 mit integriertem Positionssensor 19. Der Positionssensor 19 ist dabei piezoresistiv, insbesondere durch eine Stromleitung 26, ausgebildet. Die Stromleitung 26 ist durch ein Ionenimplantationsverfahren in der Tragschicht 25 des piezoelektrischen Aktuators 7 ausgebildet. Die Stromleitung 26 erstreckt sich von einem ersten elektrischen Kontakt 27 zu einem zweiten elektrischen Kontakt 28. Die beiden elektrischen Kontakte 27, 28 sind vorzugsweise im Bereich des fest eingespannten Endes 29 des Aktuators 7 angeordnet. Die Stromleitung 26 ist u-förmig ausgebildet und weist einen ersten Längsteil 30 und einen zweiten Längsteil 31 auf. Der erste Längsteil 30 erstreckt sich vom ersten elektrischen Kontakt 27 ausgehend in Kragarm längsrichtung in den Kragarm 13 hinein. Der zweite Längsteil 31 erstreckt sich von einem Querteil 32 ausgehend in Kragarm längsrichtung aus dem Kragarm 13 hinaus zum zweiten elektrischen Kontakt 28, wobei sich das Querteil 32 in Kragarmquerrichtung erstreckt. Auf die soeben beschriebene Weise sind vorliegend vier derartige elektrische Widerstände 33 ausgebildet. Die Widerstände 33 sind zueinander unterschiedlich und derart mit der Steuereinheit 11 verbunden, dass eine Wheatstonesche Messbrücke ausgebildet ist.

[0048] Die Stromleitungen 26, insbesondere die Widerstände 33, reagieren dabei auf Verformungen, die infolge der Druckveränderung, welche aus der Membranauslenkung resultiert, entstehen. Die Widerstände 33 reagieren darauf mit einer Widerstandsänderung, die von der Steuereinheit 11 erfasst und ausgewertet wird.

[0049] Die Fig. 6 zeigt eine schematische Draufsicht eines vierten Ausführungsbeispiels des piezoelektrischen Aktuators 7 mit integriertem kapazitivem Positionssensor 19. Der kapazitive Positionssensor 19 weist hier nicht weiter im Detail dargestellt Aussparungen auf, in welchen jeweils ein Fortsatz angeordnet ist. Jeder Fortsatz ist in z-Richtung bewegbar. Im dargestellten Ausführungsbeispiel sind die Aussparungen an einem Rahmen 36 und die Fortsätze am Kragarm 13 angeordnet. Der Kragarm 13 ist ebenso in z-Richtung auslenkbar. Der Rahmen 36 hingegen ist ortsfest und wird vorzugsweise durch das Trägersubstrat 9 ausgebildet. Es ist jedoch auch denkbar,

dass die Aussparungen im Kragarm 13 und die Fortsätze am Rahmen 36 ausgebildet sind. Die Aussparung weist zwei Innenflächen auf, wobei zumindest eine der Innenflächen als erste Messelektrode ausgebildet ist. Der Fortsatz ist entweder als zweite Messelektrode oder als Dielektrikum ausgebildet. Auf diese Weise wird ein elektrischer Kondensator ausgebildet.

[0050] Infolge einer Anregung der Membran 2 durch den Aktuator 7, werden die Fortsätze am Kragarm 13 ebenso ausgelenkt. Der Abstand der einzelnen Fortsätze zur jeweilig korrespondierenden Aussparung vergrößert sich daraufhin. Folglich vergrößert sich auch der Abstand der beiden Messelektroden bzw. der Abstand der ersten Messelektrode zum Dielektrikum. Da die Kapazität durch eben diesen Abstand bestimmt wird, erfasst die Steuereinheit 11 infolge der Auslenkung eine Kapazitätsänderung. In Abhängigkeit dieses kapazitiven Sensorsignals kann der Aktuator 7 geregelt angesteuert werden, um die Membran 2 geregelt anzusteuern (vgl. hierzu auch Fig. 1).

[0051] Fig. 7 zeigt schematisch die Arbeitsweise des MEMS-Schallwandlers, der gemäß der vorangehenden Beschreibung als MEMS-Lautsprecher 1 ausgebildet ist. Der MEMS-Lautsprecher umfasst hierbei die Membran 2, welche in dem Tragelement bzw. Membranträger 3 in z-Richtung auslenkbar gelagert ist. Des Weiteren umfasst der MEMS-Lautsprecher den piezoelektrischen Aktuator 7 sowie den Positionssensor 19. Diese sind wiederum mit der Steuereinheit 11 elektrisch verbunden.

[0052] Die Steuereinheit 11 ist ausgebildet, um einen Funktionstest durchzuführen, um Verzerrungen zu reduzieren, um Beschädigungen des MEMS-Lautsprechers zu vermeiden und/oder um Verhaltensveränderungen des MEMS-Lautsprechers zu erkennen und zu kompensieren. Hierfür ist die Steuereinheit 11 derart ausgebildet, dass sie das Ist-Sensorsignal 37 zu analysieren vermag und/oder mit einem in der Steuereinheit 11 abgespeicherten Referenzsignal 8 abzugleichen vermag. Des Weiteren ist die Steuereinheit 11 derart ausgebildet, dass der Aktuator 7 unter Berücksichtigung eines Analyseergebnisses 35, das durch die Analyse des Ist-Sensorsignals 37 ermittelt werden kann, und/oder Vergleichsergebnisses geregelt ansteuerbar ist.

[0053] Zum Funktionsselbsttest kann der MEMS-Lautsprecher demnach den Aktuator 7 mit einem Referenz-Aktuatorsignal 48 ansteuern. In der Speichereinheit der Steuereinheit 11 ist als Referenzsignal 8 ein Soll-Sensorsignal 42 hinterlegt, dass eine vom Referenz-Aktuatorsignal 48 abhängige Soll-Auslenkung der Membran 2 repräsentiert. Durch die Ansteuerung der Membran 2 mittels des Aktuators 7 mit dem Referenz-Aktuatorsignal 48 wird diese aus-

gelenkt. Die Auslenkung wird über den Positionssensor 19 erfasst, der an die Steuereinheit 11 ein Ist-Sensorsignal 37 übermittelt. Das Ist-Sensorsignals repräsentiert das Ist-Standardverhalten 38 und/oder dient dazu das Ist-Standardverhalten 38 des MEMS-Lautsprechers zu ermitteln. Im Rahmen eines Ist-/Sollwertabgleichs vergleicht die Steuereinheit 11 das Ist-Sensorsignal 37 mit dem abgespeicherten Soll-Sensorsignal 42. Sofern das Vergleichsergebnis 34 keinen Unterschied zwischen den beiden Signalen ergibt, arbeitet der MEMS-Lautsprecher ordnungsgemäß. Andernfalls erkennt die Steuereinheit 11 eine fehlerhafte Arbeitsweise. Einen vorstehend beschriebenen Funktionsselbsttest kann die Steuereinheit 11 automatisch, insbesondere beim Systemstart oder nach äußeren Störeinflüssen, durchführen.

[0054] Des Weiteren ist die Steuereinheit 11 derart ausgebildet, dass sie das eingehende Ist-Sensorsignal 37 zu analysieren vermag. Als Analyseergebnisse 35 kann die Steuereinheit 11 insbesondere einen Maximalausschlag 44, eine Ist-Eigenfrequenz 46 und/oder eine nichtlineare Oszillation 43 des MEMS-Lautsprechers ermitteln. Des Weiteren hat die Steuereinheit 11, insbesondere in einem Speicher, einen Schwellwert 45 und/oder eine Referenz-Eigenfrequenz 47 abgespeichert.

[0055] Im Rahmen einer Verzerrungsreduktion kann die Steuereinheit 11 demnach durch eine Analyse des Ist-Sensorsignals 37 eine nichtlineare Oszillation 43 der Membran 2 erkennen. Derartige nichtlineare Oszillationen sind ein Indiz für eine Verzerrung des ausgegebenen Klangs. Bei der Analyse und/oder beim Abgleich des Ist-Sensorsignals 37 verwendet die Steuereinheit 11 insbesondere zumindest einen einzelnen Signalwert und/oder den zeitlichen Signalverlauf, insbesondere innerhalb eines Frequenzbereiches, des Sensorsignals.

[0056] Um diese identifizierte Verzerrung kompensieren zu können, ist die Steuereinheit 11 ferner derart ausgebildet, dass sie den Aktuator 7 mit einem - die ermittelte nichtlineare Oszillation 43 zumindest teilweise reduzierenden - Kompensation-Aktuator-signal 49 anzusteuern vermag. Hierdurch kann die Membran 2 wieder in einen nicht verzerrenden Auslenkungsbereich zurückgeführt werden.

[0057] Um eine Beschädigung der Membran 2, des Aktuators 7 und oder des Positionssensors 19 aufgrund einer Überbelastung vermeiden zu können, ist die Steuereinheit 11 ferner derart ausgebildet, dass diese zunächst durch eine Analyse des Ist-Sensorsignals 37 und durch einen Abgleich mit einem Schwellwert 45 eine entsprechende Überbelastung identifizieren kann. Demnach definiert der Schwellwert 45 eine maximal zulässige Schwellwerthöhe,

bis zu der der MEMS-Lautsprecher mindestens beschädigungsfrei betrieben werden kann.

[0058] Durch den Abgleich von Maximalausschlag 44 und Schwellwert 45 kann die Steuereinheit 11 feststellen, ob eine Überbelastung unmittelbar bevorsteht oder bereits eingetreten ist. Kurz bevor der Maximalausschlag 44 den Schwellwert 45 überschreitet oder unmittelbar nachdem er diesen überschritten hat, steuert die Steuereinheit 11 den Aktuator 7 mit einem reduzierten Aktuator signal 39 an. Dieses im Vergleich zum vorherigen Aktuator signal reduzierte Aktuator signal 39 bewirkt demnach eine zur ersten Auslenkung der Membran 2 reduzierte zweite Auslenkung. Hierdurch kann vorteilhafterweise eine Überbelastung der bewegten MEMS-Komponenten vermieden werden.

[0059] Des Weiteren ist zum Beschädigungsschutz die Kenntnis über die Ist-Eigenfrequenz 46 des MEMS-Lautsprechers vorteilhaft. Gleiches gilt für die Kompensation von Verhaltensänderungen des MEMS-Lautsprechers.

[0060] Um die Ist-Eigenfrequenz 46 analytisch ermitteln zu können, ist ein vorliegend nicht im Detail dargestelltes Analysesignal in der Speichereinheit der Steuereinheit 11 abgespeichert. Hierbei handelt es sich vorzugsweise um ein Rauschsignal, das sich in einem Frequenzbereich unterhalb der Resonanzfrequenz des MEMS-Lautsprechers erstreckt. Mit diesem Analysesignal wird der Aktuator 7 angesteuert. Das vom Positionssensor 19 rückgemeldete Ist-Sensorsignal 37 wird von der Steuereinheit 11 analysiert, um ein Maximum innerhalb des Frequenzbereiches ermitteln zu können. Dieses Maximum identifiziert nunmehr die Ist-Eigenfrequenz 46 des MEMS-Lautsprechers. Die Steuereinheit 11 ist nunmehr derart ausgebildet, dass sie durch einen Abgleich der analytisch ermittelten Ist-Eigenfrequenz 46 mit der abgespeicherten Referenz-Eigenfrequenz 47 eine Änderung der Eigenfrequenz festzustellen vermag.

[0061] Im Falle einer erkannten Abweichung ist es zum Beschädigungsschutz vorteilhaft, wenn die neue Eigenfrequenz, d.h. die Ist-Eigenfrequenz 46, als neue Referenz-Eigenfrequenz 47 im Speicher der Steuereinheit 11 abgespeichert wird. Um eine Beschädigung des MEMS-Lautsprechers vermeiden zu können, darf dieser nämlich nur über einen begrenzten Zeitraum im Bereich der Eigenfrequenz angeregt werden. Bei der weiteren Ansteuerung der Membran 2 berücksichtigt die Steuereinheit 11 nunmehr die neue Referenz-Eigenfrequenz 47 und steuert die Membran 2 demnach in diesem Frequenzbereich zeitlich geregelt an.

[0062] Des Weiteren kann aber eine derartige Veränderung der Eigenfrequenz des MEMS-Lautspre-

chers auch eine Folge von äußeren Einflüssen, insbesondere Druck- oder Temperaturänderungen, oder aber auch von Alterungseffekten sein. Zur Kompensation von derartigen Verhaltensänderungen des MEMS-Lautsprechers ist es demnach ebenso vorteilhaft, wenn bei einer analytisch festgestellten Eigenfrequenzänderung die Ist-Eigenfrequenz 46 als neue Referenz-Eigenfrequenz 47 abgespeichert und fortan bei der Ansteuerung des Aktuators 7 berücksichtigt wird. Hierfür steuert die Steuereinheit 11 den Aktuator 7 mit einem entsprechenden Kompensations-Aktuator signal 49 an.

[0063] Die vorliegende Erfindung ist nicht auf die dargestellten und beschriebenen Ausführungsbeispiele beschränkt. Abwandlungen im Rahmen der Patentansprüche sind ebenso möglich wie eine Kombination der Merkmale, auch wenn diese in unterschiedlichen Ausführungsbeispielen dargestellt und beschrieben sind.

Bezugszeichenliste

1	MEMS-Lautsprecher
2	Membran
3	Membranträger
4	Randbereich
5	Verstärkungselement
6	Hubstruktur
7	Aktuator
8	abgespeicherte Referenzsignale
9	Trägersubstrat
10	Leiterplatte
11	Steuereinheit
12	passive Zusatzkomponenten
13	Kragarm
14	Gehäuse
15	oberer Gehäuseteil
16	unterer Gehäuseteil
17	Schalleitkanal
18	akustische Ein-/Austrittsöffnung
19	Positionssensor
20	Sensorbereich
21	Aktuatorbereich
22	Verbindungselement
23	erste piezoelektrische Schicht
24	zweite piezoelektrische Schicht
25	Tragschicht

26	Stromleitung
27	erster elektrischer Kontakt
29	fest eingespanntes Ende
30	erster Längsteil
31	zweiter Längsteil
32	Querteil
33	Widerstände
34	Vergleichsergebnis
35	Analyseergebnis
36	Rahmen
37	Ist-Sensorsignal
38	Ist-Standardverhalten
39	reduziertes Aktuatorsignal
40	ASIC
41	gemeinsame piezoelektrische Schicht
42	Soll-Sensorsignal
43	nichtlineare Oszillation
44	Maximalausschlag
45	Schwellwert
46	Ist-Eigenfrequenz
47	Referenz-Eigenfrequenz
48	Referenz-Aktuatorsignal
49	Kompensations-Aktuatorsignal

Patentansprüche

1. MEMS-Lautsprecher (1) zum Erzeugen von Schallwellen im hörbaren Wellenlängenspektrum mit einem Tragelement (9), einer gegenüber dem Tragelement (9) entlang einer z-Achse auslenkbaren Membran (2), zumindest einem sich am Tragelement (9) abstützenden piezoelektrischen Aktuator (7) zum Auslenken der Membran (2), der über eine Hubstruktur (6) mit der Membran (2) verbunden ist, und einer elektronischen Steuereinheit (11) zum Ansteuern des Aktuators (7), **dadurch gekennzeichnet**, dass der MEMS-Lautsprecher (1) zumindest einen Positionssensor (19) umfasst, mittels dem der Steuereinheit (11) ein von der Membranauslenkung abhängiges Sensorsignal (37) bereitstellbar ist, dass der Positionssensor (19) zumindest teilweise in den Aktuator (7) integriert ist, so dass mit diesem mittelbar die Position der Membran (2) entlang der z-Achse erfassbar ist, dass ein Verbindungselement (22) ein freies Ende des Positionssensors (19) mit der Hubstruktur (6) verbindet und

dass die Steuereinheit (11) derart ausgebildet ist, dass sie elastische Schwingungseigenschaften des Verbindungselements (22) berücksichtigt und dass sie ein Funktionsselbsttest-Verfahren, ein Verzerrungsreduktions-Verfahren, ein Beschädigungsschutz-Verfahren und/oder ein Kompensations-Verfahren von Verhaltensänderungen durchführt, wobei sie das Sensorsignal (37) analysiert und/oder mit einem in der Steuereinheit (11) abgespeicherten Referenzsignal (8) abgleicht und den Aktuator (7) unter Berücksichtigung des Analyseergebnisses (35) und/oder Vergleichsergebnisses (34) geregelt ansteuert.

2. MEMS-Lautsprecher nach dem vorherigen Anspruch, **dadurch gekennzeichnet**, dass zumindest ein Signalwert und/oder der zeitliche Signalverlauf des Sensorsignals (37), insbesondere innerhalb eines Frequenzbereichs, analysierbar und/oder abgleichbar ist.

3. MEMS-Lautsprecher nach einem oder mehreren der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Steuereinheit zum Funktionsselbsttest derart ausgebildet ist, dass durch die Analyse des Ist-Sensorsignals (37) ein Ist-Standardverhalten (38) des MEMS-Lautsprechers ermittelbar ist.

4. MEMS-Lautsprecher nach einem oder mehreren der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass in der Steuereinheit (11) zum Funktionsselbsttest ein von einem Referenz-Aktuatorsignal (48) abhängiges Soll-Sensorsignal (42) abgespeichert ist, das das Soll-Standardverhalten des MEMS-Lautsprechers wiedergibt.

5. MEMS-Lautsprecher nach einem oder mehreren der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Steuereinheit (11) zum Funktionsselbsttest des MEMS-Lautsprechers derart ausgebildet ist, dass der Aktuator (7) mit dem eine Soll-Auslenkung erzeugenden Referenz-Aktuatorsignal (48) ansteuerbar ist, das von der Ist-Auslenkung abhängige Ist-Sensorsignal (37) mit dem Soll-Sensorsignal (42) abgleichbar ist, eine Abweichung des Ist-Sensorsignals (37) vom Soll-Sensorsignal (42) ermittelbar ist und/oder bei einer festgestellten Abweichung eine Fehlermeldung ausgebenbar ist.

6. MEMS-Lautsprecher nach einem oder mehreren der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Steuereinheit (11) zur Verzerrungsreduktion derart ausgebildet ist, dass durch die Analyse des Ist-Sensorsignals (37) eine nichtlineare Oszillation (43) des MEMS-Lautsprechers ermittelbar ist.

7. MEMS-Lautsprecher nach dem vorherigen Anspruch, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Steuereinheit (11) zur Verzerrungsreduktion des MEMS-Lautsprechers derart ausgebildet ist, dass der Aktuator (7) mit einem die ermittelte nichtlineare Oszillation (43) zumindest teilweise reduzierenden Kompensations-Aktuatorsignal (49) ansteuerbar ist.

8. MEMS-Lautsprecher nach einem oder mehreren der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Steuereinheit (11) zum Beschädigungsschutz des MEMS-Lautsprechers derart ausgebildet ist, dass durch die Analyse des Ist-Sensorsignals (37) ein Maximalausschlag (44) des MEMS-Lautsprechers ermittelbar sind.

9. MEMS-Lautsprecher nach einem oder mehreren der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass in der Steuereinheit (11) zum Beschädigungsschutz ein Schwellwert (45), insbesondere mit einer maximal zulässigen Schwellwerthöhe, bis zu der der MEMS-Lautsprecher mindestens beschädigungsfrei betreibbar ist, abgespeichert ist.

10. MEMS-Lautsprecher nach dem vorherigen Anspruch, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Steuereinheit (11) zum Beschädigungsschutz des MEMS-Lautsprechers derart ausgebildet ist, dass zum Erkennen einer Überbelastung das von einer ersten Auslenkung abhängige Ist-Sensorsignal (37) mit dem maximal zulässigen Schwellwert (45) abgleichbar ist und/oder dass der Aktuator (7) beim Überschreiten des Schwellwertes (45) mit einem reduzierten Aktuatorsignal (39) ansteuerbar ist, das eine zur ersten Auslenkung reduzierte zweiten Auslenkung erzeugt.

11. MEMS-Lautsprecher nach einem oder mehreren der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Steuereinheit (11) zum Beschädigungsschutz und/oder zur Kompensation von Verhaltensänderungen des MEMS-Lautsprechers derart ausgebildet ist, dass durch die Analyse des Ist-Sensorsignals (37) eine Ist-Eigenfrequenz (46) des MEMS-Lautsprechers ermittelbar ist.

12. MEMS-Lautsprecher nach dem vorherigen Anspruch, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Steuereinheit (11) zur Ermittlung der Ist-Eigenfrequenz (46) derart ausgebildet ist, dass der Aktuator (7) mit einem Analyse-Aktuatorsignal (50) ansteuerbar ist und/oder ein die Ist-Eigenfrequenz (46) identifizierendes Maximum innerhalb des Frequenzbereiches ermittelbar ist.

13. MEMS-Lautsprecher nach einem oder mehreren der vorherigen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass in der Steuereinheit (11) zum Beschädigungsschutz und/oder zur Kompensation

von Verhaltensänderungen eine Referenz-Eigenfrequenz (47) abgespeichert ist.

14. MEMS-Lautsprecher nach einem oder mehreren der Ansprüche 11 bis 13, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Steuereinheit (11) zum Beschädigungsschutz und/oder zur Kompensation von Verhaltensänderungen derart ausgebildet ist, dass die ermittelte Ist-Eigenfrequenz (46) des MEMS-Lautsprechers mit der hinterlegten Referenz-Eigenfrequenz (47) abgleichbar ist und/oder bei einer Abweichung die ermittelte Ist-Eigenfrequenz (46) als neue Referenz-Eigenfrequenz (47) speicherbar ist.

15. MEMS-Lautsprecher nach dem vorherigen Anspruch, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Steuereinheit (11) zum Beschädigungsschutz und/oder zur Kompensation von Verhaltensänderungen derart ausgebildet ist, dass die Ansteuerung des Aktuators (7) unter Berücksichtigung der neuen Referenz-Eigenfrequenz (47) erfolgt, wobei dies zur Kompensation der festgestellten Verhaltensänderung mit einem Kompensations-Aktuatorsignal (49) erfolgt.

Es folgen 4 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

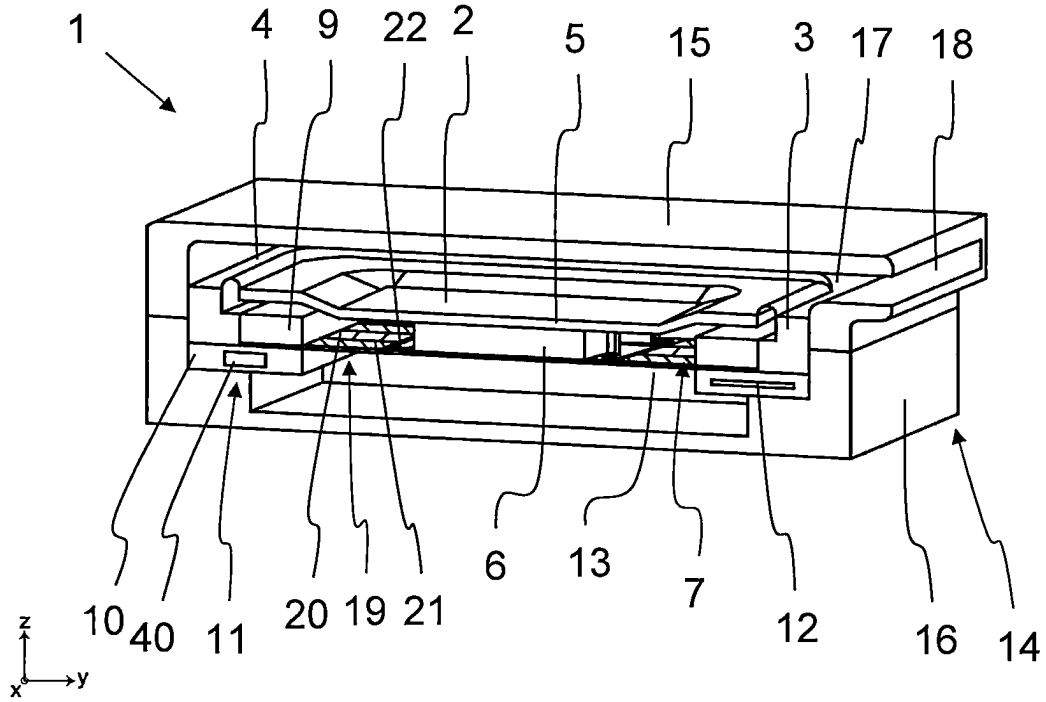


Fig. 1

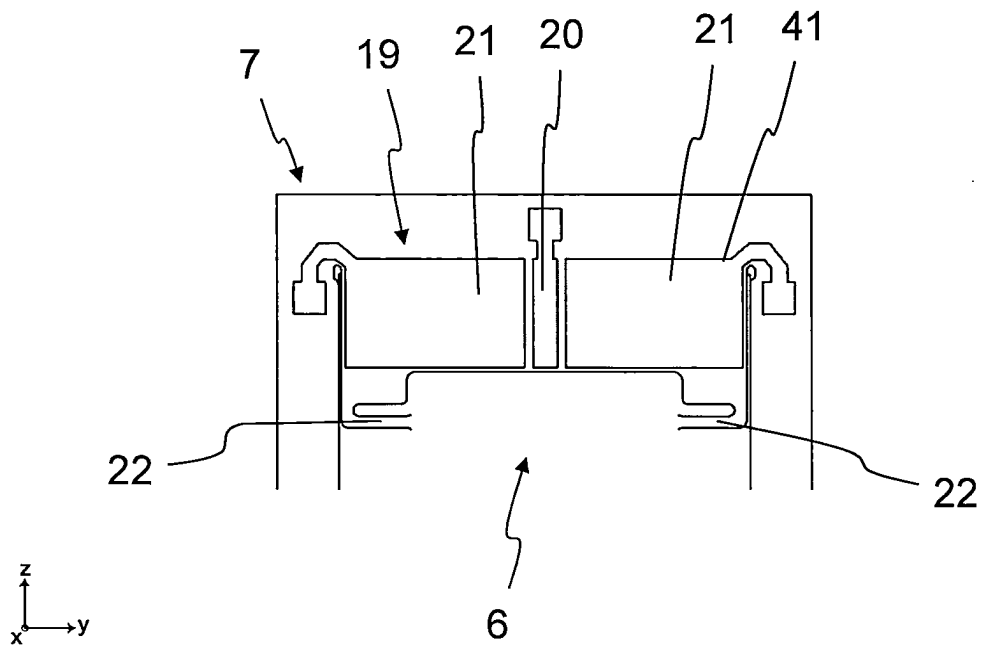


Fig. 2

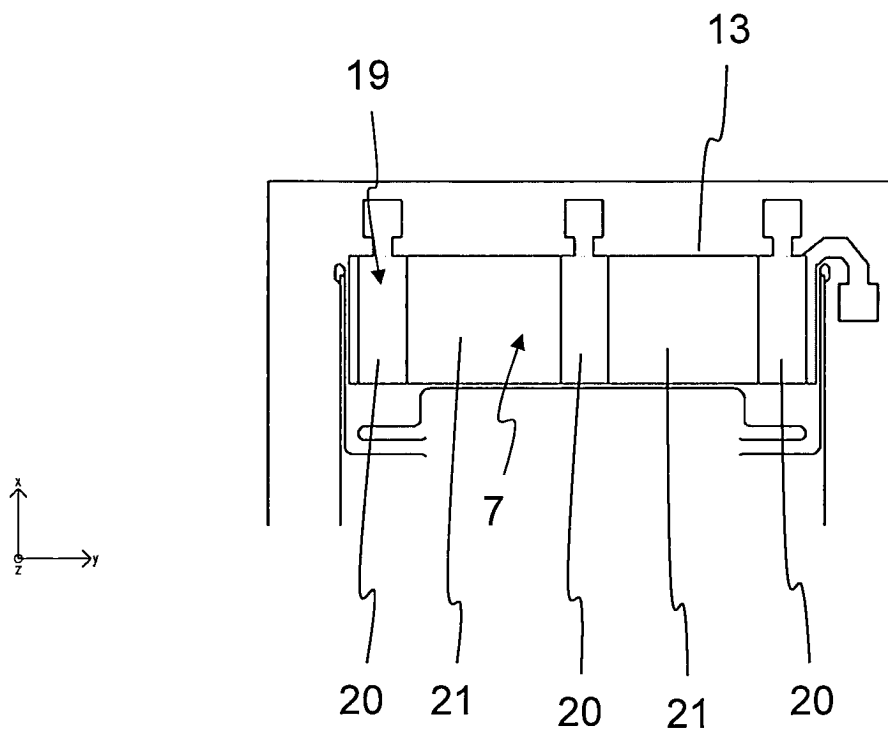


Fig. 3

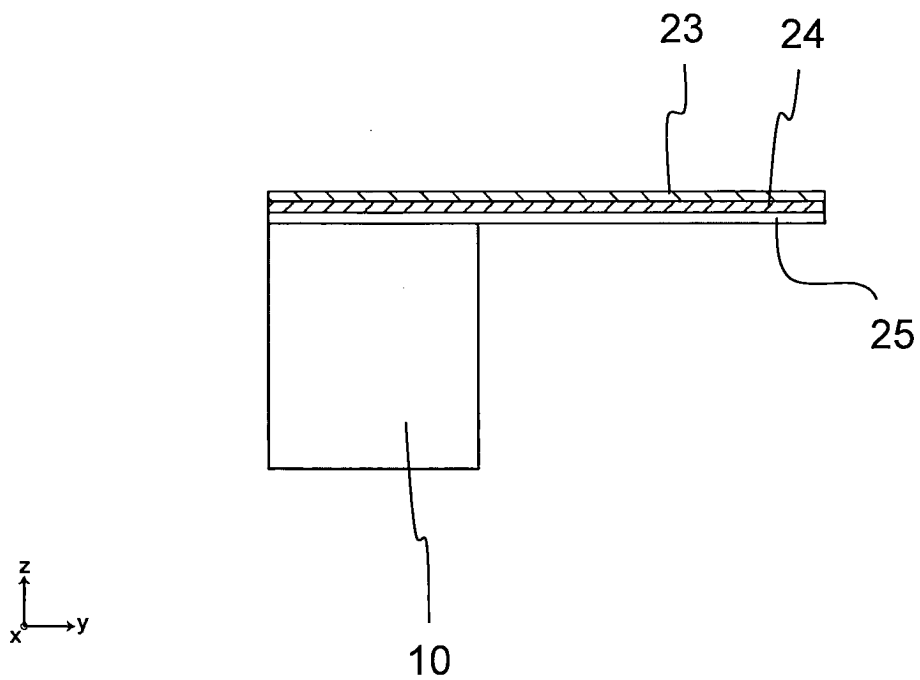


Fig. 4

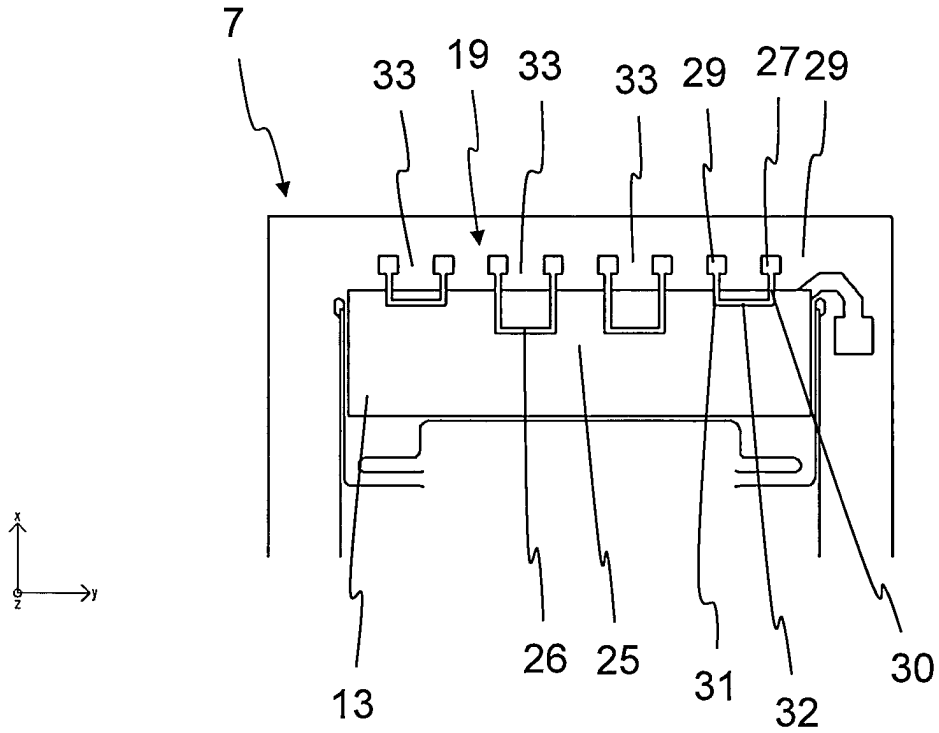


Fig. 5

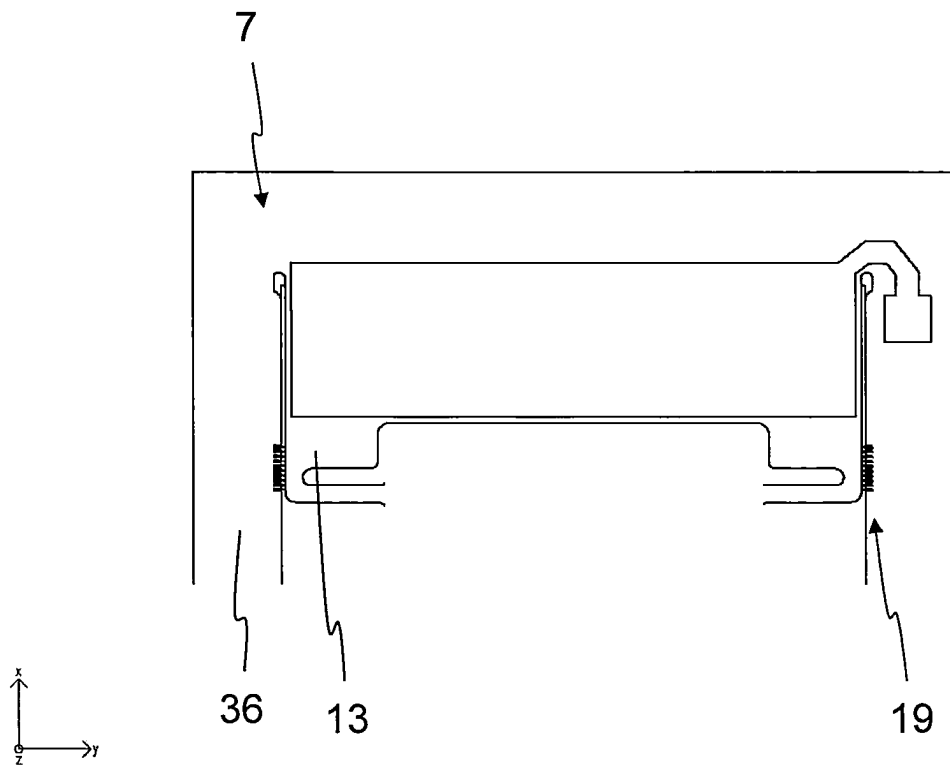


Fig. 6

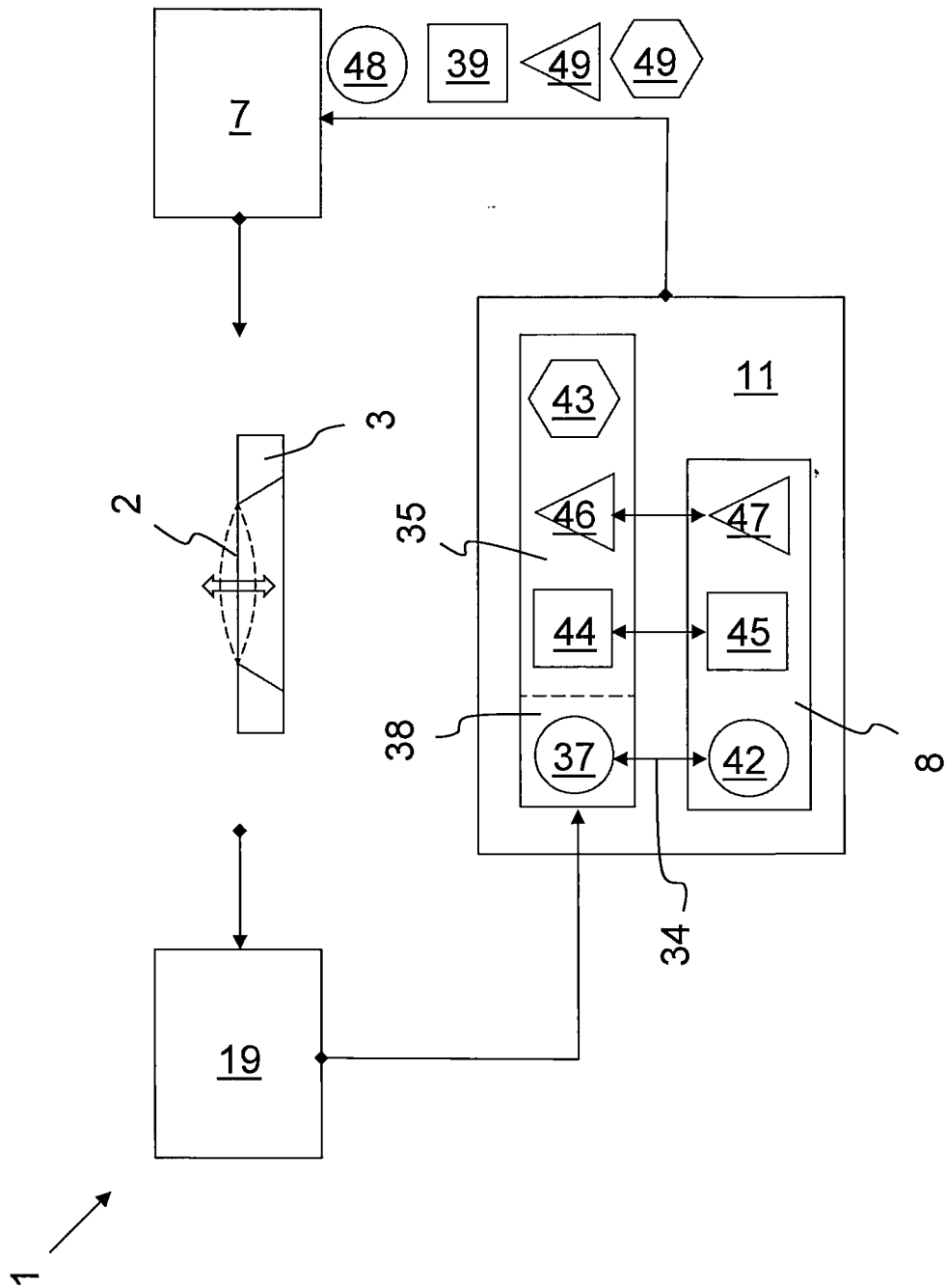


Fig. 7