



(10) **DE 10 2009 035 973 B4** 2011.07.07

(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2009 035 973.7**
(22) Anmeldetag: **04.08.2009**
(43) Offenlegungstag: **14.04.2011**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **07.07.2011**

(51) Int Cl.: **G01L 9/12 (2006.01)**

Innerhalb von drei 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:
Baumer Innotec AG, Frauenfeld, CH

(74) Vertreter:
Blumbach Zinggrebe, 65187, Wiesbaden, DE

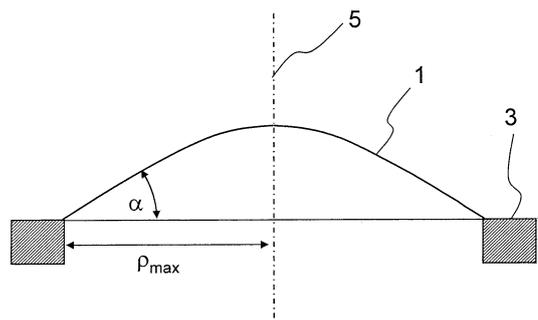
(72) Erfinder:
Ihlefeld, Joachim, Dr., 01067, Dresden, DE;
Züllig, Daniel, Frauenfeld, CH; Tarraf, Amer, Dr.,
Kreuzlingen, CH

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

| | | |
|-----------|-----------------------|-----------|
| DE | 198 24 778 | C2 |
| DE | 103 13 908 | B3 |
| DE | 101 00 321 | A1 |
| CH | 4 66 376 | A |
| US | 2008/00 41 164 | A1 |

(54) Bezeichnung: **Anordnung und Verfahren zur kapazitiven Druckmessung**

(57) Hauptanspruch: Drucksensor, umfassend eine elastisch deformierbare, an ihrem Rand fixierte und aufgrund einer Druckdifferenz auslenkbare Membran, sowie zumindest zwei Auslenkungssensoren, wobei die Auslenkungssensoren die Auslenkung von jeweils unterschiedlich zur Mitte der Membran beabstandeten Flächenbereichen der Membran erfassen, und wobei der Drucksensor eine Recheneinrichtung umfasst, welche aus den von den Auslenkungssensoren erfassten Auslenkungen eine Auslenkung in der Mitte der Membran und daraus einen Wert für die auf der Membran lastende Druckdifferenz errechnet.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung bezieht sich auf eine Anordnung und ein Verfahren zur kapazitiven Druckmessung. Insbesondere betrifft die Erfindung die Kalibrierung von Drucksensoren.

[0002] Sensoren zur kapazitiven Druckmessung sind bekannt. So zeigt die CH 466 376 eine Anordnung zur Umwandlung von Drücken in digitale elektrische Signale. Hierbei nimmt eine Membran den Druck auf. Diese Membran ist kapazitiv mit elektrischen Schaltelementen, die zweier Zustände fähig sind, gekoppelt. Die Anzahl der Schaltelemente, die sich in einem dieser Zustände befinden ist abhängig von der Auslenkung der Membran.

[0003] Die DE 198 24 778 C2 zeigt eine Druck- oder Kraftsensorstruktur sowie ein Verfahren zu dessen Herstellung. Hierbei befindet sich gegenüber einer Membran eine Gegenstruktur. Sowohl auf der Membran als auch auf der Gegenstruktur befinden sich Elektroden, mittels derer Kondensatoren festgelegt werden. Von diesen Kondensatoren sind mindestens zwei in Reihe oder parallel geschaltet. Jeder dieser mindestens zwei Kondensatoren werden aus drei Elektrodenflächen gebildet, von denen sich zwei auf der Membran oder der Gegenstruktur befinden und die dritte auf der Struktur, auf der sich die zwei anderen nicht befinden. Wird die Membran unter Druck gesetzt, so ändert sich die Kapazität der Kondensatoren.

[0004] Die DE 101 00 321 A1 zeigt einen Drucksensor mit einer Membran, die einen dielektrischen Abschnitt aufweist, der sich in einem Hohlraum in der Nähe von Kondensatorplatten bewegt. Wirkt ein Druck auf die Membran und damit den dielektrischen Abschnitt, so erfassen die Kondensatorplatten diese Bewegung und erzeugen aufgrund der Veränderung der Kapazität ein elektrisches Ausgangssignal, das den von außen wirkenden Druck darstellt.

[0005] Die DE 103 13 908 B3 zeigt einen Drucksensor mit einer leitfähigen ersten Elektrode und beabstandet von dieser eine gegenüberliegende Membran. Diese Membran umfasst eine zweite Elektrode oder wirkt selbst als zweite Elektrode. Wenn ein äußerer Druck die Membran verformt, so wird die von den beiden Elektroden gebildete Kapazität verändert. Es wird ein die Kapazitätsänderung darstellendes Messsignal abgegriffen. Die Kapazitätsänderung stellt den äußeren Druck dar.

[0006] Um Drucksensoren, wie sie etwa aus den vorgenannten beiden Druckschriften bekannt sind, zu kalibrieren, kann eine Druck-Spannungs-Kennlinie durchgeföhren werden. Dieses Verfahren ist aufwändig. Möglich wäre auch, eine vorgegebene Kennlinie zu verwenden. Hierbei besteht allerdings das Problem, dass es aufgrund von Fertigungstoleranzen bei den Drucksensoren zu Abweichungen von der Kennlinie kommen kann, so daß die Messgenauigkeit des Drucksensors beeinträchtigt wird.

[0007] Es ist daher Aufgabe der Erfindung, einen Drucksensor bereitzustellen, der einerseits einfach zu kalibrieren ist und andererseits eine hohe Messgenauigkeit aufweist. Diese Aufgabe wird durch den Gegenstand der unabhängigen Ansprüche gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen der Erfindung sind in den jeweiligen abhängigen Ansprüchen angegeben.

[0008] Der Erfindung liegt die Erkenntnis zugrunde, dass eine Kalibrierung der die Auslenkung einer Membran eines Drucksensors messenden Sensoranordnung vereinfacht werden kann, wenn mehrere in einem Abstand zur Mittenachse der Membran messende Sensoren vorgesehen werden, welche die Auslenkung der Membran an den jeweiligen Orten bestimmen, wobei die gemessenen Abstands-, beziehungsweise Auslenkungswerte auf die Auslenkung in der Mitte der Membran zurückgerechnet werden.

[0009] Demgemäß ist ein Drucksensor vorgesehen, welcher eine elastisch deformierbare, an ihrem Rand fixierte, aufgrund einer Druckdifferenz auslenkbare Membran, sowie zumindest zwei Auslenkungssensoren umfasst, wobei die Auslenkungssensoren die Auslenkung von jeweils zur Mitte der Membran beabstandeten, insbesondere jeweils unterschiedlich zur Mitte der Membran beabstandeten Flächenbereichen der Membran erfassen, und wobei der Drucksensor eine Recheneinrichtung umfasst, welche aus den von den Auslenkungssensoren erfassten Auslenkungen eine Auslenkung in der Mitte der Membran und daraus einen Wert für die auf der Membran lastende Druckdifferenz errechnet.

[0010] Ein entsprechendes Verfahren zur Messung eines Drucks mittels des Drucksensors basiert darauf, die Auslenkung von jeweils unterschiedlich zur Mitte der Membran beabstandeten Flächenbereichen der Membran mittels der Auslenkungssensoren zu erfassen und mittels der Recheneinrichtung aus den von den Auslenkungssensoren erfassten Auslenkungen eine Auslenkung in der Mitte der Membran und daraus einen Wert für die auf der Membran lastende Druckdifferenz zu errechnen.

[0011] Gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung kann eine Messung der Auslenkung alternativ oder zusätzlich in der Mitte der Membran vorgenommen werden.

[0012] Der Erfindung liegt außerdem die Erkenntnis zugrunde, dass sich Parameter, welche die Kennlinie des Sensors beeinflussen, in überraschender Weise durch eine einfache Vermessung der Resonanzschwingung der Membran des Drucksensors ermitteln lassen. Eine solche Messung ist wiederum wesentlich schneller und einfacher zu realisieren, als eine aufwändige Vermessung einer Kennlinie bei verschiedenen Drücken.

[0013] Dazu ist ein Verfahren zur Kalibrierung eines Drucksensors vorgesehen, wobei ein Drucksensor verwendet wird, welcher eine deformierbare, an ihrem Rand fixierte Membran, auf welche infolge eines zu messenden Drucks eine Druckdifferenz wirkt und zumindest einen Abstandssensor umfasst, welcher ein dem Abstand der Membran an einem Bereich innerhalb des Randes zu einer der Membran gegenüberliegenden Position entsprechendes Signal erzeugt, wobei die Membran in eine Resonanzschwingung versetzt und die Resonanzfrequenz dieser Resonanzschwingung gemessen wird, und wobei anhand dieser Resonanzfrequenz die mechanische Spannung bestimmt wird, welche den Proportionalitätsfaktor zwischen einer Auslenkung der Membran und einer auf die Membran wirkenden Kraft bestimmt oder beeinflusst, und wobei anhand des Proportionalitätsfaktors eine Umrechnungsvorschrift erstellt wird, welche vom Abstandssensor gemessene Signale in eine auf die Membran wirkende Druckdifferenz transformiert. Bei der Messung der Resonanzschwingung wird ein bekannter Druck vorausgesetzt. Es bietet sich im Allgemeinen dabei an, die Kalibrierung in drucklosem Zustand, bei welchem auf die Membran beiderseits gleiche Kräfte, beziehungsweise Drücke wirken, durchzuführen.

[0014] Für die Analyse der Funktionalität eines Drucksensors kann das Wellenmodell einer schwingenden Kreismembran verwendet werden. Diese Membran wird auf einem feststehenden Ring mit dem Innenradius ρ_{\max} fixiert. Das physikalische Problem wird für den vereinfachten Fall kleiner Auslenkung gewöhnlich mit der partiellen Differentialgleichung

$$(1) \quad \frac{\partial^2 A(\rho, \varphi)}{\partial \rho^2} + \frac{\partial A(\rho, \varphi)}{\rho \partial \rho} + \frac{\partial^2 A(\rho, \varphi)}{\partial \varphi^2} = \frac{\partial^2 A(\rho, \varphi)}{v \partial t^2}$$

beschrieben, wobei

ρ , φ den Radius gemessen von der Mitte der Membran und den Azimutwinkel bezeichnen, mithin also Polarkoordinaten darstellen. t bezeichnet die Zeit und v die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle.

[0015] Für die Geschwindigkeit der Welle in der Membran gilt ausserdem:

$$(2) \quad v^2 = \frac{T}{\rho_{\text{material}}}$$

[0016] T bezeichnet hierbei die mechanische Spannung in Kraft pro Fläche (N/m^2) und ρ_{Material} den Massebelag oder die Dichte (kg/m^3).

[0017] Die Membran ist am Rande gehalten und/oder fixiert, beispielsweise auf einem festen Ring. Sowohl bei einer Schwingung in Resonanz, als auch bei einer Deformation aufgrund einer Druckbeaufschlagung ist daher die Auslenkung $A(\rho = \rho_{\max}, \varphi)$ beim Maximalradius ρ_{\max} , welcher den Ort am fixierten Rand der Membran gemessen von der Mitte der Membran darstellt, immer gleich null. Unter Berücksichtigung der Dirichletschen Randbedingung erhält man folgende allgemeine Lösung:

$$A(\rho, t) = A_{\max} \sin(\beta v t + \beta_0) J_0(\beta, \rho) \quad (3)$$

[0018] Dabei bezeichnet $J_0(\beta, \rho)$ eine Besselfunktion erster Gattung. β , β_0 sind Konstanten, die sich aus den Nullstellen der Besselfunktion, beziehungsweise aus der Gleichung

$$J_0(\beta \rho_{\max}) = 0 \quad (4)$$

ergeben.

[0019] Die Besselfunktion weist mehrere Nullstellen auf, und die partielle Differentialgleichung besitzt somit auch mehrere Lösungen. Für einen messenden Drucksensor mit annähernd konstanter Flächenverteilung des Drucks $p(\rho, \varphi)$ über der Membran kann die erste Nullstelle der Besselfunktion erster Gattung angesetzt werden. Es gilt dann:

$$\beta \rho_{\max} = 2.4048 \quad (5)$$

[0020] Die Membran hat mehrere Eigenresonanzfrequenzen (Moden). Für den oben geschilderten Fall genügt die Betrachtung der untersten Frequenz:

$$\omega_{\text{res}} = \beta v \quad (6)$$

[0021] Nach Einsetzen in (2) folgt für die Spannung im Resonanzfall:

$$(7) \quad T = \rho_{\text{material}} \left(\frac{\omega_{\text{res}} \rho_{\max}}{2.4048} \right)^2$$

[0022] Dies bedeutet, dass aus der gemessenen Resonanzfrequenz sowie den mit hinreichender Genauigkeit vorbekannten Konstanten die Spannung T und damit die rücktreibende Kraft der Membran bei gegebener Auslenkung mit einfachen Mitteln bestimmt werden kann. Die Spannung T setzt sich im Sinne der Erfindung dabei aus einer mechanischen Spannung einerseits und dem Elastizitätsmodul zusammen. Ist die Membran beispielsweise vollständig spannungslos fixiert, so ist die Spannung T dem Elastizitätsmodul gleichzusetzen. Wird umgekehrt eine sehr dünne, leicht deformierbare Membran verwendet, wird der Parameter T maßgeblich durch die anliegende mechanische Spannung bestimmt.

[0023] Demgemäß ist in bevorzugter Ausgestaltung der Erfindung vorgesehen, einen Drucksensor mit einer kreisförmigen Membran zu verwenden und die Proportionalitätskonstante T anhand der Beziehung (7) zu ermitteln.

[0024] Allgemein liegt diesem Aspekt der Erfindung somit das Prinzip zugrunde, eine Eichung der Membraneigenschaften, beziehungsweise des Drucksensors anhand einer oder mehrerer Resonanzfrequenzen der Membran zu ermitteln.

[0025] Die Erfindung wird nachfolgend genauer anhand der beigeschlossenen Figuren erläutert. Dabei bezeichnen gleiche Bezugszeichen gleiche oder ähnliche Elemente.

[0026] Es zeigen:

[0027] [Fig. 1](#) die ausgelenkte Membran eines Drucksensors.

[0028] [Fig. 2](#) einen Drucksensor mit kapazitiver Auslenkungsmessung,

[0029] [Fig. 3](#) eine Anordnung zur Kalibrierung eines Drucksensors,

[0030] [Fig. 4](#) einen selbstkalibrierenden Sensor.

[0031] [Fig. 1](#) zeigt die Membran **1** eines Drucksensors, welche an ihrem Rand, also an der Position mit dem Radius ρ_{\max} gemessen von der Mittenachse **5** der Membran **1** festgehalten ist. Beispielsweise kann die Membran auf einem Ring **3** fixiert sein. Die Membran **1** ist aufgrund eines einwirkenden Drucks, beziehungsweise genauer einer Druckdifferenz zwischen den beiden Seiten entlang der Mittenachse ausgelenkt. Die Auslenkung führt dazu, dass die Oberfläche der Membran am Rand gegenüber einer nicht ausgelenkten Position unter einem Winkel α verläuft. Aufgrund der elastischen Deformation wirkt der Druckdifferenz im Gleichgewicht eine Kraft F entgegen.

[0032] Für den Druck p und den Winkel α gilt folgende Beziehung:

$$p = \text{const} T \tan(\alpha) \approx \text{const} T \alpha \quad (8)$$

[0033] Die Konstante const ergibt sich aus der Geometrie der Membran. Bei kleinen Auslenkungen ist der Tangens vernachlässigbar, ebenso ist die Auslenkung $A(\rho, \varphi)$ auf der Symmetrieachse proportional zum Winkel.

[0034] Die Membran wird durch den anliegenden Druck p gedehnt. Für die relative Längenausdehnung $\Delta L/L$ gilt:

$$(9) \quad \frac{\Delta L}{L} = \sqrt{\frac{1}{\cos^2 \alpha} - 1} \approx \frac{\partial A(\rho, \varphi)}{\partial \rho}$$

[0035] Die Federkraft innerhalb der Membran ergibt sich dann zu:

$$F = 2\pi\rho h \frac{\partial A(\rho, \varphi)}{\partial \rho} T \quad (10a)$$

[0036] Dabei bezeichnet h die Dicke der Membran und ρ den Radius.

[0037] Für die Änderung der Auslenkung mit dem Radius gilt für den Randbereich außerdem

$$\frac{\partial A(\rho, \varphi)}{\partial \rho} / A(0, \varphi) = +/ - 0.519, \rho +/ - \rho_{\max} \quad (10b)$$

[0038] Nach Beziehung (10b) kann die erste Ableitung der Auslenkung nach dem Radius in Gleichung (10a) mittels der Auslenkung $A(0, \varphi)$ im Zentrum bestimmt werden.

[0039] Kombiniert man Gleichung (10b) mit Gleichung (10a) unter Verwendung der Beziehung $F = p \cdot A_m$ zwischen Druck p , Membranfläche A_m und Federkraft F , erhält man als Beziehung zwischen dem auf der Membran lastenden Druck p , dem Membranradius ρ_{\max} , der Auslenkung $A(0, \varphi)$ im Zentrum der Membran und der durch Messung der Resonanzfrequenz bestimmten Spannung T :

$$(10c) \quad p = \frac{0.519}{\rho_{\max}} \cdot h \cdot T \cdot A(0, \varphi)$$

[0040] Um jetzt einen auf die Membran einwirkenden Druck mit hoher Präzision als absolute Grösse zuverlässig zu messen, können zwei Schritte durchgeführt werden:

Erstens wird die Auslenkung $A(\rho, \varphi)$ im Zentrum der Membran am Ort der Mittenachse gemessen oder bestimmt und zweitens wird $A(\rho, \varphi)$ mithilfe der Spannung T in einen Druck p unter Beachtung der Membrankonstanten umgerechnet. Die Konstanten können berechnet oder experimentell einmalig bestimmt werden. Da von einer kreisförmigen Membran ausgegangen wird, wird im Folgenden das Argument des Azimutwinkels φ weggelassen.

[0041] Die Konstante K auf der rechten Seite der Beziehung (10c) vor dem Produkt aus Spannung T und Auslenkung $A(0, \varphi)$,

$$K = 0.519 \frac{h}{\rho_{\max}},$$

stellt einen Vorfaktor dar, welcher gegebenenfalls von den entsprechend errechneten Werten abweichen kann, aber charakteristisch für einen bestimmten Membrantyp hinsichtlich des Membranmaterials, dessen Dicke und Durchmessers ist. Der Vorfaktor kann daher auch für einen bestimmten Membrantyp einmalig bestimmt und im folgenden der Kalibrierung mittels der Resonanzfrequenz zugrundegelegt werden. Gemäß einer bevorzugten Weiterbildung der Erfindung erfolgt daher die Ermittlung des Drucks durch Multiplikation der ermittelten Spannung oder Proportionalitätskonstante T mit der gemessenen Auslenkung in der Mitte der Membran und einem zuvor ermittelten oder festgelegten Vorfaktor.

[0042] Das Verfahren zur Kalibrierung des Sensors und der nachfolgenden Messung wird nachfolgend anhand eines Drucksensors mit kapazitiven Auslenkungssensoren erläutert. Eine kapazitive Abstandsmessung wird bevorzugt, da diese sehr einfach zu realisieren ist. Prinzipiell können aber auch andere Meßverfahren zur Messung der Auslenkung der Membran implementiert werden. Beispielsweise sind optische, magnetische,

piezoelektrische oder induktive Abstandsmessungen denkbar. Bei den bevorzugten kapazitiven Auslenkungssensoren werden Spannungsänderungen anhand einer sich durch eine Auslenkung der Membran verursachten Änderung der Kapazität eines Kondensators, dessen eine Elektrode mit der Membran verbunden ist oder durch die Membran gebildet wird, erfasst. Um eine Spannungsänderung aufgrund einer Auslenkung der Membran zu erfassen, ist es dabei günstig, eine Brückenschaltung zu verwenden und hierzu eine weitere, konstante Kapazität in Serie zu schalten.

[0043] Es ist allgemein außerdem bevorzugt, ringförmige Meßbereiche zu verwenden, bei welchem die Auslenkungen von jeweils in Form sich ringförmig um die Mitte der Membran herum erstreckender Flächenbereiche der Membran erfasst werden. Im Falle kapazitiver Auslenkungssensoren können dazu in einfacher Weise von der Membran beabstandete, ringförmige Elektroden verwendet werden.

[0044] [Fig. 2](#) zeigt eine Ausführungsform eines Drucksensors mit kapazitiven Auslenkungssensoren, welche Spannungsänderungen anhand einer sich durch eine Auslenkung der Membran verursachten Änderung der Kapazität eines Kondensators, dessen eine Elektrode mit der Membran verbunden ist oder durch die Membran gebildet wird, erfassen.

[0045] Die Membran ist spannungsarm wie in [Fig. 1](#) gezeigt mit einem in [Fig. 2](#) nicht dargestellten starren Ring **3** verbunden und erfüllt damit exakt die Dirichletsche Randbedingung. Die Membran **1** kann ein dielektrisches Material mit einer innen liegenden isolierten metallischen Schicht **11** umfassen oder selbst metallisch leitend sein.

[0046] Parallel und beabstandet zur Membran **1** ist ein Träger **13** (z. B. ein Keramikträger oder eine Leiterplatte) angeordnet. Auf diesem befinden sich mehrere konzentrisch zur Mittenachse **5** angeordnete ringförmige Elektroden **6, 7, 8**. Es ist eine ebene Gegenelektrode **15** vorgesehen, welche zu den ringförmigen Elektroden **6, 7, 8** beabstandet und auf der gegenüberliegenden Seite der zur Membran weisenden Seite der ringförmigen Elektroden **6, 7, 8** angeordnet ist.

[0047] Zusätzlich kann eine Abschirmelektrode **17** vorgesehen werden, um die Störfestigkeit gegenüber elektrischen Feldern zu verbessern.

[0048] Bei dem in [Fig. 2](#) dargestellten Ausführungsbeispiel sind alle Elektroden **6, 7, 9, 15** und **17** auf, beziehungsweise im Träger **13** angeordnet. Es ist aber beispielsweise auch denkbar, eine Reihenschaltung von Kondensatoren anstelle mit einer Gegenelektrode **15** mit separaten, an die ringförmigen Elektroden angeschlossenen Kondensatoren durchzuführen, oder die Gegenelektrode **15** in Form einzelner, den jeweiligen ringförmigen Elektroden zugeordneter Elektroden aufzubauen.

[0049] Zwischen der metallischen Schicht **11** der Membran **1** und der Gegenelektrode **15** kann nun eine Wechselspannung U_0 angelegt werden. Durch die Wechselspannung werden in den ringförmigen Elektroden **6, 7, 8** mit den Radien r_i Spannungen U_i induziert.

[0050] Die ringförmigen Elektroden **6, 7, 8** bilden jeweils zusammen mit der metallischen Schicht **11** einerseits und der Gegenelektrode **15** Kapazitäten, beziehungsweise Kondensatoren. Für jede der ringförmigen Elektroden **6, 7, 8** ergibt sich eine Reihenschaltung der Kondensatoren, die aus Gegenelektrode und ringförmiger Elektrode und metallischer Schicht **11** und ringförmiger Elektrode gebildet werden.

[0051] Die Feldlinien verlaufen weitgehend parallel, deshalb kann für die das Modell eines Plattenkondensators angewendet werden. Die betreffenden Kondensatoren werden mit C_{1i} bzw. C_{2i} bezeichnet. Die Kapazität der Kondensatoren C_{2i} ist hierbei konstant, wohingegen die Kapazität der Kondensatoren C_{1i} aufgrund des sich bei einer Auslenkung der Membran ändernden Abstands zwischen Ringelektrode und metallischer Schicht **11** veränderlich ist. Durch diese Anordnung können parasitäre Effekte bei der Messung berücksichtigt werden.

[0052] In der Notation wird im Folgenden das Argument ϕ weggelassen, da diese Abhängigkeit für die betrachteten Fälle nicht benötigt wird.

[0053] Die Spannung U_i über den Kondensatoren C_{1i} berechnet sich nach der sich aus der Reihenschaltung der Kondensatoren C_{1i} und C_{2i} folgenden Spannungsteilerregel zu:

$$(11) \quad \frac{U_i(j\omega)}{U_0} = \frac{C_{2,i}}{C_{1,i} + C_{2,i}}$$

[0054] Dabei bezeichnen ω die Kreisfrequenz der Wechselfspannung, $C_{1,i}$, $C_{2,i}$ die Kapazitäten der Anordnung aus der Ringelektrode mit dem Index i und der metallischen Schicht **11**, bzw. der Gegenelektrode **15**.

[0055] Setzt man die Beziehungen der Kapazitäten für Plattenkondensatoren ein, ergibt sich aus Gleichung (11):

$$(12) \quad \frac{U_i(j\omega)}{U_0} = \frac{d_1}{d_1 + d_2 / \epsilon_r}$$

[0056] Dabei bezeichnet ϵ_r die relative Dielektrizitätskonstante des Substrats, welche als Multiplikator in Kapazität der jeweils aus den Ringelektroden **6**, **7**, **8** und der Gegenelektrode **15** gebildeten Kondensatoren eingeht. Die Plattenabstände der Kondensatoren $C_{1,i}$ bzw. $C_{2,i}$ sind mit d_1 , beziehungsweise d_2 bezeichnet.

[0057] Weiterhin gilt für die Abstände:

$$d_i = A(\rho_i) + A_{\text{off}_i} \quad (13)$$

[0058] Dabei bezeichnet A_{off_i} die Offsetverschiebung des i -ten Rings zur Ebene der Membran. Mit anderen Worten bezeichnet A_{off_i} den Abstand des Kreisrings zur nicht ausgelenkten Membran.

[0059] Einsetzen der Gleichung (12) in Gleichung (13) und Auflösen nach $A(\rho_i)$ ergibt:

$$(14) \quad A(\rho_i) = \frac{d_2}{\epsilon} \frac{U_i(j\omega)}{(U_0 - U_i(j\omega))} - A_{\text{off}_i}$$

[0060] Die Gleichung (14) kann für eine präzise Kalibrierung eingesetzt werden. Hierzu wird die Membran z. B. durch eine externe Schallwelle, oder magnetisch in harmonische Schwingungen versetzt, und es werden die über den Kondensatoren $C_{1,i}$ auftretenden Spannungs- Zeitverläufe aufgezeichnet. Aus diesen Spannungs- Zeitverläufen werden getrennt für jeden Kondensator die Spannungsminima und Maxima bestimmt, vorteilhaft können diese auch gemittelt werden. Die Differenz der minimalen und maximalen Auslenkung ergibt die doppelte Amplitude, die Summe den doppelten Offset:

$$(15a) \quad 2A(\rho_i) = \frac{d_2}{\epsilon} \frac{U_i(j\omega)_{\max}}{(U_0 - U_i(j\omega)_{\max})} - \frac{d_2}{\epsilon} \frac{U_i(j\omega)_{\min}}{(U_0 - U_i(j\omega)_{\min})}$$

$$(15b) \quad -2A_{\text{off}_i} = \frac{d_2}{\epsilon} \frac{U_i(j\omega)_{\max}}{(U_0 - U_i(j\omega)_{\max})} + \frac{d_2}{\epsilon} \frac{U_i(j\omega)_{\min}}{(U_0 - U_i(j\omega)_{\min})}$$

[0061] Die nach (15) bestimmten Offsets können in (14) eingesetzt werden, das Verhältnis $\frac{d_2}{\epsilon}$ stellt eine Substratkonstante dar und kann in guter Näherung als konstant angesehen werden. Die Substratkonstante steht sämtlichen Termen vor, so dass diese bei Bedarf auch nach der Kalibrierung der Empfindlichkeit eingesetzt werden kann.

[0062] Nun soll ein aus drei Ringen bestehendes System betrachtet werden. Durch Differenzbildung aus den Signalen von jeweils zwei benachbarten Ringen erhält man aus (14):

$$(15c) \quad A(\rho_2) - A(\rho_1) = \frac{d_2 U_0 (U_2(j\omega) - U_1(j\omega))}{\varepsilon (U_0 - U_2(j\omega)) (U_0 - U_1(j\omega))}$$

$$(15d) \quad A(\rho_3) - A(\rho_2) = - \frac{d_2 U_0 (U_3(j\omega) - U_2(j\omega))}{\varepsilon (-U_0 + U_3(j\omega)) (U_0 - U_2(j\omega))}$$

[0063] Die aus (15b) für jeden Ring bestimmten Offsets A_{off_i} sind für eine ideale Ausführung des Druckmesskopfs, d. h. bei Parallelität von Membran und Elektroden Träger gleich. Wenn die Parallelität verletzt ist, wird die Kennlinie des Sensors nichtlinear. Deshalb ist die Varianz der gemessenen Offsets A_{off_i} ein Maß für die Nichtlinearität des Sensors.

[0064] Ein besonders effizientes Maß für die Nichtlinearität kann aus dem Verhältnis der Amplitudendifferenzen gebildet werden:

$$(15e) \quad \frac{A(\rho_2) - A(\rho_1)}{A(\rho_3) - A(\rho_2)} = - \frac{(U_2(j\omega) - U_1(j\omega)) (-U_0 + U_3(j\omega))}{(U_0 - U_1(j\omega)) (U_3(j\omega) - U_2(j\omega))}$$

[0065] Dieses Verhältnis hängt nur von den mittleren Durchmessern ρ_1, ρ_2, ρ_3 der Ringe ab. Wenn eine Winkelabweichung vorliegt, dann entsteht eine im Wesentlichen reproduzierbare nichtlineare Kennlinie.

$$(15f) \quad \kappa := - \frac{(U_2(j\omega) - U_1(j\omega)) (-U_0 + U_3(j\omega))}{(U_0 - U_1(j\omega)) (U_3(j\omega) - U_2(j\omega))}$$

[0066] Nach Messung des Verhältnisses κ kann deshalb eine vordefinierte Kennlinie ausgewählt und der Sensor korrigiert werden.

[0067] Deshalb ist es zweckmäßig, aus einer Menge mit Linearitätsfehlern behafteter Sensoren den für eine konkrete Konstruktion vorliegenden Zusammenhang zwischen der Spannungs/Druckkennlinie und dem Wert κ zu bestimmen und in einer Datenbank abzulegen. In der Fertigung wird dann nur κ berechnet. Im Speicher der Recheneinheit, beispielsweise eines angeschlossenen Mikrorechners wird dann die entsprechende oder einen Menge ähnlicher Kennlinien als Funktion des Parameters κ abgelegt, und anschließend die benötigte Kennlinie ausgewählt. Der Wert κ kann auch online durch Akkumulation von Messwerten und/oder das Fitten von Kenngrößen und dem Aufzeichnungsverhalten bestimmt werden. Wenn der Sensor z. B. durch Erwärmung mechanischen Spannungen ausgesetzt ist, kann sich der Wert κ verändern. In diesem Fall kann die Kennlinie umgeschaltet, beziehungsweise allgemein an den geänderten Wert κ angepasst werden. Hierzu ist es sinnvoll, κ über einen längeren Zeitraum zu akkumulieren.

[0068] Demgemäß ist in Weiterbildung der Erfindung der Drucksensor mit kapazitiven Auslenkungssensoren mit ringförmigen, konzentrisch und in einem Abstand zur Membran angeordneten ringförmigen Elektroden in welche durch eine zwischen der Membran und einer Gegenelektrode angelegte Wechselspannung U_0 der Frequenz $j\omega$ Wechselspannungen $U_1(j\omega), U_2(j\omega), U_3(j\omega)$ induziert werden, wobei als Messgröße die Amplitude der induzierten Wechselspannung von den Auslenkungssensoren erfasst wird, eingerichtet, den Wert des Parameters κ gemäß der oben angegebenen Gleichung (15f) zu bestimmen, eine Spannungs/Druckkennlinie anhand des Parameters κ zu bestimmen, und nachfolgend Druckwerte anhand der bestimmten Kennlinie zu ermitteln.

[0069] Anhand von Gleichung (15e) ist ferner ersichtlich, dass sich der vorstehend für kapazitive Auslenkungssensoren beschriebene Kalibrierungs- und Meßvorgang auch auf andere Auslenkungssensoren anwenden lässt, sofern mindestens drei zur Mitte der Membran beabstandete Auslenkungssensoren vorgesehen werden, von denen das Verhältnis der Differenzen der gemessenen Auslenkungen, beziehungsweise der die Auslenkung repräsentierenden Messwerte gebildet werden kann. Dieses Verhältnis, entsprechend dem Parameter κ

wird dann verwendet, um eine Kennlinie zu bestimmen, etwa durch Auswahl aus einer abgespeicherten Liste von Verhältnissen. Ebenso ist es möglich, Veränderungen des Offsets, beziehungsweise des Abstands eines Kreisrings zur nicht ausgelenkten Membran A_{off} online zu bestimmen. Diese treten z. B. durch Temperaturänderung auf, Folge wäre eine Änderung der Empfindlichkeit des Sensors. Zur Korrektur wird zunächst die Auslenkung des innersten und des nachfolgenden Rings betrachtet.

$$(15g) \quad A_0 J_0(\rho_1) = \frac{d_2 U_1(j\omega)}{\varepsilon (U_0 - U_1(j\omega))} - A_{off}$$

$$(15h) \quad A_0 J_0(\rho_2) = \frac{d_2 U_2(j\omega)}{\varepsilon (U_0 - U_2(j\omega))} - A_{off}$$

[0070] Dieses Gleichungssystem kann nach A_{off} aufgelöst werden.

[0071] Es ergibt sich:

$$\begin{aligned} A_{off} := & d_2(-J_0(\rho_2)U_1(j\omega)U_0 + J_0(\rho_2)U_1(j\omega)U_2(j\omega) + J_0(\rho_1)U_2(j\omega)U_0 \\ & - J_0(\rho_1)U_1(j\omega)U_2(j\omega))/(\varepsilon(-J_0(\rho_2)U_0^2 + J_0(\rho_2)U_0U_2(j\omega) \\ & + J_0(\rho_2)U_1(j\omega)U_0 - J_0(\rho_2)U_1(j\omega)U_2(j\omega) + J_0(\rho_1)U_0^2 - J_0(\rho_1)U_1(j\omega)U_0 \\ & - J_0(\rho_1)U_2(j\omega)U_0 + J_0(\rho_1)U_1(j\omega)U_2(j\omega)) \end{aligned} \quad (15i)$$

[0072] Zu beachten ist, daß die Besselfunktion $J_0(\rho_2)$ nicht zu klein werden sollte, weil dann die Messgenauigkeit sinkt. Deshalb wählt man, wie anhand der Gleichungen (15g) bis (15i) ersichtlich, zweckmäßig den innersten und den nachfolgenden Ring mit den Radien ρ_1 und ρ_2 . Dies bedeutet, dass auch während des Betriebes der A_{off} bestimmt werden kann. Dazu wird über einen längeren Zeitraum A_{off} akkumuliert. Anschließend wird A_{off} in der Recheneinheit, beispielsweise einem im Sensor integrierten Mikrorechner korrigiert. Eine weitere Möglichkeit, den Wert A_{off} online zu bestimmen, besteht darin, den Messwert, vorzugsweise über dem größten Ring mit dem Meßwert über einem kapazitiven Spannungsteiler zu vergleichen und aus der Spannungsdifferenz auf A_{off} zu schließen.

[0073] Gemäß noch einer Weiterbildung der Erfindung ist daher der Drucksensor mit Auslenkungssensoren mit ringförmigen, konzentrisch und in einem Abstand zur Membran angeordneten ringförmigen Elektroden ausgestattet, in welche durch eine zwischen der Membran und einer Gegenelektrode angelegte Wechselspannung U_0 der Frequenz $j\omega$ Wechselspannungen $U_1(j\omega)$, $U_2(j\omega)$, $U_3(j\omega)$ induziert werden, wobei als Messgröße die Amplitude der induzierten Wechselspannung von den Auslenkungssensoren erfasst wird, und wobei die Recheneinrichtung dazu eingerichtet ist, den Abstand A_{off} zwischen den ringförmigen Elektroden zur Membran anhand von Gleichung (15i), in welcher wieder J_0 eine Besselfunktion, ρ_1 und ρ_2 die mittleren Radien der kleineren der drei ringförmigen Elektroden, U_1 und U_2 die in diese ringförmigen Elektroden induzierten Wechselspannungen, ε die Dielektrizitätskonstante des Materials zwischen der Gegenelektrode und den ringförmigen Elektroden, und U_0 die angelegte Wechselspannung bezeichnen, und/oder durch Messung der Spannungsdifferenz der induzierten Wechselspannung an zumindest einer der ringförmigen Elektrode und einem kapazitiven Spannungsteiler zu ermitteln.

[0074] In der Ausführungsform der Erfindung mit kapazitiven Auslenkungssensoren mit ringförmigen, konzentrisch und in einem Abstand zur Membran angeordneten Elektroden werden im Speziellen durch die zwischen der Membran und einer Gegenelektrode angelegte Wechselspannung U_0 Wechselspannungen U_i induziert, wobei als Messgröße die Amplitude der induzierten Wechselspannung von den Auslenkungssensoren erfasst wird, und wobei die Auslenkung $A(\rho_i)$ und der Abstand $A_{off,i}$ des i -ten Kreisrings zur nicht ausgelenkten Membran anhand der Beziehungen (15a) und (15b) bestimmt werden, wobei ρ_i den Radius der i -ten ringförmigen Elektrode, d_2 den Abstand der i -ten ringförmigen Elektrode zur Gegenelektrode und ε die Dielektrizitätskonstante des Mediums zwischen der i -ten ringförmigen Elektrode und der Gegenelektrode bezeichnen.

[0075] Allgemein gesprochen wird mit der vorstehend beschriebenen Kalibrierung die tatsächliche Auslenkung als Funktion der von den Auslenkungssensoren erfassten Messgröße erhalten, wobei die Messgröße im Falle der kapazitiven Auslenkungssensoren durch die Amplitude der induzierten Wechselspannung gegeben ist. Es ist klar, dass sich diese Kalibrierung aber auch auf Auslenkungssensoren übertragen lässt, welche auf anderen Messprinzipien basieren.

[0076] Demgemäß ist in allgemeinerer Weiterbildung der Erfindung ein Verfahren zur Druckmessung vorgesehen, bei welchem die Membran in harmonische Schwingungen versetzt, die Werte der Messgröße der Auslenkungssensoren an den Auslenkungsmaxima der Membran bestimmt und anhand dieser Werte der Messgröße eine Kalibrierung der Auslenkung der Membran in Abhängigkeit des Werts der Messgröße vorgenommen wird.

[0077] Insbesondere kann dabei eine Kalibrierung gemäß Gleichung (10c) wie oben beschrieben durchgeführt werden.

[0078] Die Anregung der Resonanzschwingung kann in einer externen Vorrichtung, wie etwa einem Kundtschen Rohr erfolgen. **Fig. 3** zeigt schematisch eine solche Anordnung zur Kalibrierung.

[0079] Wie in **Fig. 3** dargestellt, ist der Lautsprecher **19** in Längsrichtung verschiebbar in einem Kundtschen Rohr **18** angeordnet. Durch eine Verschiebung des Lautsprechers **19** im Kundtschen Rohr **18** wird erreicht, dass sich im Kundtschen Rohr eine stehende Welle ausbildet. Dies führt dazu, dass bei definiertem Abstand zwischen der Öffnung des Kundtschen Rohrs **18** und dem vor der Öffnung angeordneten Drucksensors **10** ein konstanter Schalldruck auf die Membran **1** des Drucksensors **10** wirkt. Ferner kann die Phase und über die Frequenz der abgestrahlten Schallwellen die Resonanzfrequenz der Anordnung **10** abgeglichen werden. Aus der Resonanzfrequenz, dem Durchmesser, der Dicke und dem Elastizitätsmodul der Membran kann deren Empfindlichkeit errechnet werden.

[0080] Gemäß noch einer weiteren Ausführungsform der Erfindung kann der Drucksensor **10** selbst mit einer Einrichtung zur Anregung von Schwingungen der Membran **1** versehen sein. **Fig. 4** zeigt schematisch einen Drucksensor **10** mit einer solchen Einrichtung zur Anregung von Schwingungen der Membran **1** in Gestalt einer Spule **21**. Die Spule **21** ist in diesem Beispiel mittig zur Membran auf dem Träger **13** angeordnet, auf dem sich auch die ringförmigen Elektroden **6, 7, 8** befinden.

[0081] Um über das von der Spule mittels eines Stroms erzeugten Magnetfeld eine Kraft auf die Membran ausüben zu können, ist die Membran hier mit einem magnetisierbaren Material zumindest im Bereich des Feldes der Spule ausgestattet.

[0082] Die Spule **21** kann nun mit einem Wechselstrom erregt werden, dessen Frequenz verändert wird, bis die auf diese Weise periodisch von der Spule **21** angezogene Membran **1** in Resonanzschwingung gerät.

[0083] Alternativ sind beispielsweise auch piezoelektrische Aktoren zur Schwingungserregung der Membran **1** möglich.

[0084] Durch die Einrichtung zur Anregung von Schwingungen der Membran kann der Drucksensor als selbstkalibrierender Sensor ausgestattet sein, der sich im Feldeinsatz beispielsweise in festgelegten Intervallen gesteuert durch die Recheneinrichtung **9** selbst kalibriert. Anders als in **Fig. 4** dargestellt, kann die Einrichtung zur Anregung von Schwingungen der Membran auch von aussen auf die Membran einwirken. Dies kann günstig sein, um Signaleinkopplungen auf die Auslenkungssensoren zu vermeiden oder zumindest zu verringern.

[0085] Weiterhin sind die Resonanzfrequenz und die Spannung T auch leicht von der Temperatur abhängig. Daher kann im Drucksensor in vorteilhafter Weise wie in **Fig. 2** gezeigt, ein Temperatursensor **24** vorgesehen werden. Mit den von diesem Temperatursensor gemessenen Werten können dann der zuvor ermittelte Wert für die Spannung T und/oder die ermittelten Drücke korrigiert, beziehungsweise die temperaturabhängige Änderung der Spannung T in die Berechnung des Druckes durch die Recheneinrichtung einbezogen werden. Dazu kann in der Recheneinrichtung beispielsweise eine entsprechende Kennlinie abgespeichert sein.

[0086] Im Echtzeitbetrieb können die Auslenkungen für jeden Radius ρ_i nach (14) berechnet und der Offset subtrahiert werden.

[0087] Unter anderem aus konstruktiven Gründen hat es sich als günstiger erwiesen, die Auslenkung auf der Achse $A(0, 0)$ nicht direkt zu messen, weshalb erfindungsgemäß die Auslenkung jeweils unterschiedlich zur Mitte der Membran beabstandeter Flächenbereichen der Membran erfasst wird.

[0088] Es ist hierbei günstig, die Messungen durch einen Bestfitalgorithmus zusammenzufassen. Es ist dabei die Auslenkung $A(0)$ gesucht, die den kleinsten mittleren quadratischen Fehler σ erzeugt:

$$(16) \quad \sigma^2 = \sum_{i=1}^3 [J_0(\beta \rho_i) A(0) - c_i A(\rho_i)]^2 \rightarrow \min$$

[0089] Nach Differentiation von (16) und Lösen der Gleichung erhält man folgende Auslenkung $A(0)$ für den kleinsten quadratischen Fehler:

$$(17) \quad A(0) = \frac{\sum J_0(\beta \rho_i) A(\rho_i)}{\sum J_0(\beta \rho_i)^2}$$

[0090] Mit anderen Worten ist also gemäß dieser Weiterbildung die Recheneinrichtung des Drucksensors dazu eingerichtet, die Errechnung der Auslenkung $A(0)$ in der Mitte der Membran entsprechend der Beziehung (17) durchzuführen, wobei in Gleichung (17) ρ_i allgemein den Abstand des i -ten Auslenkungssensors von der Mitte der Membran, $A(\rho_i)$ die Auslenkung der Membran am Messort des i -ten Auslenkungssensors, J_0 die Besselfunktion erster Gattung mit dem Index 0 und β eine Konstante, die aus der Randbedingung folgt, dass die Besselfunktion am Rand der Membran eine Nullstelle hat, bezeichnen.

[0091] Der Vorteil dieser Berechnungsmethode besteht darin, dass insbesondere durch Montagetoleranzen hervorgerufene Messfehler gemittelt werden. Man erhält eine gewichtete Summe der Messwerte.

Patentansprüche

1. Drucksensor, umfassend eine elastisch deformierbare, an ihrem Rand fixierte und aufgrund einer Druckdifferenz auslenkbare Membran, sowie zumindest zwei Auslenkungssensoren, wobei die Auslenkungssensoren die Auslenkung von jeweils unterschiedlich zur Mitte der Membran beabstandeten Flächenbereichen der Membran erfassen, und wobei der Drucksensor eine Recheneinrichtung umfasst, welche aus den von den Auslenkungssensoren erfassten Auslenkungen eine Auslenkung in der Mitte der Membran und daraus einen Wert für die auf der Membran lastende Druckdifferenz errechnet.

2. Drucksensor gemäß dem vorstehenden Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass die Recheneinrichtung dazu eingerichtet ist, die Auslenkung der Membran in der Mitte durch einen Bestfit-Algorithmus aus den von den Auslenkungssensoren erfassten Auslenkungen zu errechnen.

3. Drucksensor gemäß dem vorstehenden Anspruch, wobei die Membran kreisförmig ist und wobei die Recheneinrichtung dazu eingerichtet ist, die Errechnung der Auslenkung $A(0)$ in der Mitte der Membran entsprechend folgender Beziehung durchzuführen:

$$A(0) = \frac{\sum J_0(\beta \rho_i) A(\rho_i)}{\sum J_0(\beta \rho_i)^2}$$

wobei ρ_i den Abstand des i -ten Auslenkungssensors von der Mitte der Membran, $A(\rho_i)$ die Auslenkung der Membran am Messort des i -ten Auslenkungssensors, J_0 die Besselfunktion erster Gattung mit dem Index 0 und β eine Konstante, die aus der Randbedingung folgt, dass die Besselfunktion am Rand der Membran eine Nullstelle hat, bezeichnen.

4. Drucksensor gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, gekennzeichnet durch kapazitive Auslenkungssensoren, welche Spannungsänderungen anhand einer sich durch eine Auslenkung der Membran verursachten Änderung der Kapazität eines Kondensators messen, dessen eine Elektrode mit der Membran verbunden ist, oder durch die Membran gebildet wird.

5. Drucksensor gemäß vorstehendem Anspruch, wobei die Auslenkung der Membran mit kapazitiven Auslenkungssensoren mit ringförmigen, konzentrisch und in einem Abstand zur Membran angeordneten Elektroden gemessen wird, in welche durch eine zwischen der Membran und einer Gegenelektrode angelegte Wechselspannung U_0 der Frequenz $j\omega$ Wechselspannungen $U_1(j\omega)$, $U_2(j\omega)$, $U_3(j\omega)$ induziert werden, wobei als Messgröße die Amplitude der induzierten Wechselspannung von den Auslenkungssensoren erfasst wird, und wobei die Recheneinrichtung dazu eingerichtet ist, den Wert eines Parameters κ gemäß der Gleichung

$$\kappa := - \frac{(U_2(j\omega) - U_1(j\omega))(-U_0 + U_3(j\omega))}{(U_0 - U_1(j\omega))(U_3(j\omega) - U_2(j\omega))}$$

zu bestimmen, eine Spannungs/Druckkennlinie anhand des Parameters κ zu bestimmen, und nachfolgend Druckwerte anhand der bestimmten Kennlinie zu ermitteln.

6. Drucksensor gemäß einem der beiden vorstehenden Ansprüche, wobei die Auslenkung der Membran mit kapazitiven Auslenkungssensoren mit ringförmigen, konzentrisch und in einem Abstand zur Membran angeordneten Elektroden gemessen wird, in welche durch eine zwischen der Membran und einer Gegenelektrode angelegte Wechselspannung U_0 der Frequenz $j\omega$ Wechselspannungen $U_1(j\omega)$, $U_2(j\omega)$, $U_3(j\omega)$ induziert werden, wobei als Messgröße die Amplitude der induzierten Wechselspannung von den Auslenkungssensoren erfasst wird.

7. Drucksensor gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, mit Auslenkungssensoren mit ringförmigen, konzentrisch und in einem Abstand zur Membran angeordneten Elektroden ausgestattet, in welche durch eine zwischen der Membran und einer Gegenelektrode angelegte Wechselspannung U_0 der Frequenz $j\omega$ Wechselspannungen $U_1(j\omega)$, $U_2(j\omega)$, $U_3(j\omega)$ induziert werden, wobei als Messgröße die Amplitude der induzierten Wechselspannung von den Auslenkungssensoren erfasst wird, und wobei die Recheneinrichtung dazu eingerichtet ist, den Abstand A_{off} zwischen den ringförmigen Elektroden zur Membran anhand der Gleichung

$$A_{\text{off}} := \frac{d_2(-J_0(\rho_2)U_1(j\omega)U_0 + J_0(\rho_2)U_1(j\omega)U_2(j\omega) + J_0(\rho_1)U_2(j\omega)U_0 - J_0(\rho_1)U_1(j\omega)U_2(j\omega))}{\epsilon(-J_0(\rho_2)U_0^2 + J_0(\rho_2)U_0U_2(j\omega) + J_0(\rho_2)U_1(j\omega)U_0 - J_0(\rho_2)U_1(j\omega)U_2(j\omega) + J_0(\rho_1)U_0^2 - J_0(\rho_1)U_1(j\omega)U_0 - J_0(\rho_1)U_2(j\omega)U_0 + J_0(\rho_1)U_1(j\omega)U_2(j\omega))}$$

in welcher J_0 eine Besselfunktion, ρ_1 und ρ_2 die mittleren Radien der kleineren der drei ringförmigen Elektroden, U_1 und U_2 die in diese ringförmigen Elektroden induzierten Wechselspannungen, ϵ die Dielektrizitätskonstante des Materials zwischen der Gegenelektrode und den ringförmigen Elektroden, und U_0 die angelegte Wechselspannung bezeichnen, und durch Messung der Spannungsdifferenz der induzierten Wechselspannung an zumindest einer der ringförmigen Elektroden und einem kapazitiven Spannungsteiler zu ermitteln.

8. Verfahren zur Messung eines Drucks mittels eines Drucksensors, welcher eine elastisch deformierbare, an ihrem Rand fixierte und aufgrund einer Druckdifferenz auslenkbare Membran, sowie zumindest zwei Auslenkungssensoren umfasst, wobei die Auslenkungssensoren die Auslenkung von jeweils unterschiedlich zur Mitte der Membran beabstandeten Flächenbereichen der Membran erfassen, und wobei der Drucksensor eine Recheneinrichtung umfasst, mit welcher aus den von den Auslenkungssensoren erfassten Auslenkungen eine Auslenkung in der Mitte der Membran und daraus ein Wert für die auf der Membran lastende Druckdifferenz errechnet wird.

9. Verfahren gemäß dem vorstehenden Anspruch, bei welchem die Membran in harmonische Schwingungen versetzt, die Werte der von den Auslenkungssensoren gemessenen Messgröße an den Auslenkungsmaxima der Membran bestimmt und anhand dieser Werte der Messgröße eine Kalibrierung der Auslenkung der Membran in Abhängigkeit des Werts der Messgröße vorgenommen wird.

10. Verfahren gemäß dem vorstehenden Anspruch, wobei die Auslenkung der Membran mit kapazitiven Auslenkungssensoren mit ringförmigen, konzentrisch und in einem Abstand zur Membran angeordneten Elektroden gemessen wird, in welche durch eine zwischen der Membran und einer Gegenelektrode angelegte Wechselspannung U_0 Wechselspannungen U_i induziert werden, wobei als Messgröße die Amplitude der induzierten Wechselspannung von den Auslenkungssensoren erfasst wird, und wobei die Auslenkung $A(\rho_i)$ und der Abstand A_{off_i} des i -ten Kreisrings zur nicht ausgelenkten Membran anhand der Beziehungen

$$2A(\rho_i) = \frac{d_2}{\epsilon} \frac{U_i(j\omega)_{\text{max}}}{(U_0 - U_i(j\omega)_{\text{max}})} - \frac{d_2}{\epsilon} \frac{U_i(j\omega)_{\text{min}}}{(U_0 - U_i(j\omega)_{\text{min}})}, \quad \text{und}$$

$$-2A_{\text{off}_i} = \frac{d_2}{\epsilon} \frac{U_i(j\omega)_{\text{max}}}{(U_0 - U_i(j\omega)_{\text{max}})} + \frac{d_2}{\epsilon} \frac{U_i(j\omega)_{\text{min}}}{(U_0 - U_i(j\omega)_{\text{min}})}$$

bestimmt wird,

wobei ρ_i den Radius der i-ten ringförmigen Elektrode, d_2 den Abstand der i-ten ringförmigen Elektrode zur Gegenelektrode und ϵ die Dielektrizitätskonstante des Mediums zwischen der i-ten ringförmigen Elektrode und der Gegenelektrode bezeichnen.

11. Verfahren gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, wobei zur Kalibrierung die Membran bei bekannter Druckdifferenz in eine Resonanzschwingung versetzt und die Resonanzfrequenz dieser Resonanzschwingung gemessen wird, und wobei anhand dieser Resonanzfrequenz die mechanische Spannung bestimmt wird, welche den Proportionalitätsfaktor zwischen einer Auslenkung der Membran und einer auf die Membran wirkenden Kraft bestimmt, und wobei anhand des Proportionalitätsfaktors eine Umrechnungsvorschrift erstellt wird, welche vom Abstandssensor gemessene Signale in eine auf die Membran wirkende Druckdifferenz transformiert.

12. Verfahren gemäß dem vorstehenden Anspruch, wobei die Proportionalitätskonstante T anhand der Beziehung

$$T = \rho_{material} \left(\frac{\omega_{res} \rho_{max}}{2.4048} \right)^2$$

bestimmt wird, wobei ρ_{max} den Ort am fixierten Rand der Membran gemessen von der Mitte der Membran darstellt, und ω_{res} die Resonanzfrequenz der Membran und $\rho_{material}$ den Massebelag der Membran bezeichnen.

13. Verfahren gemäß dem vorstehenden Anspruch, dadurch gekennzeichnet, dass die Ermittlung des Drucks durch Multiplikation der ermittelten Proportionalitätskonstante T mit der gemessenen Auslenkung in der Mitte der Membran und einem zuvor ermittelten Vorfaktor erfolgt.

14. Verfahren gemäß einem der beiden vorstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass mit einem Temperatursensor des Drucksensors Temperaturen gemessen und die temperaturabhängige Änderung der Proportionalitätskonstante T in die Berechnung des Druckes durch die Recheneinrichtung einbezogen wird.

Es folgen 2 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Fig. 1

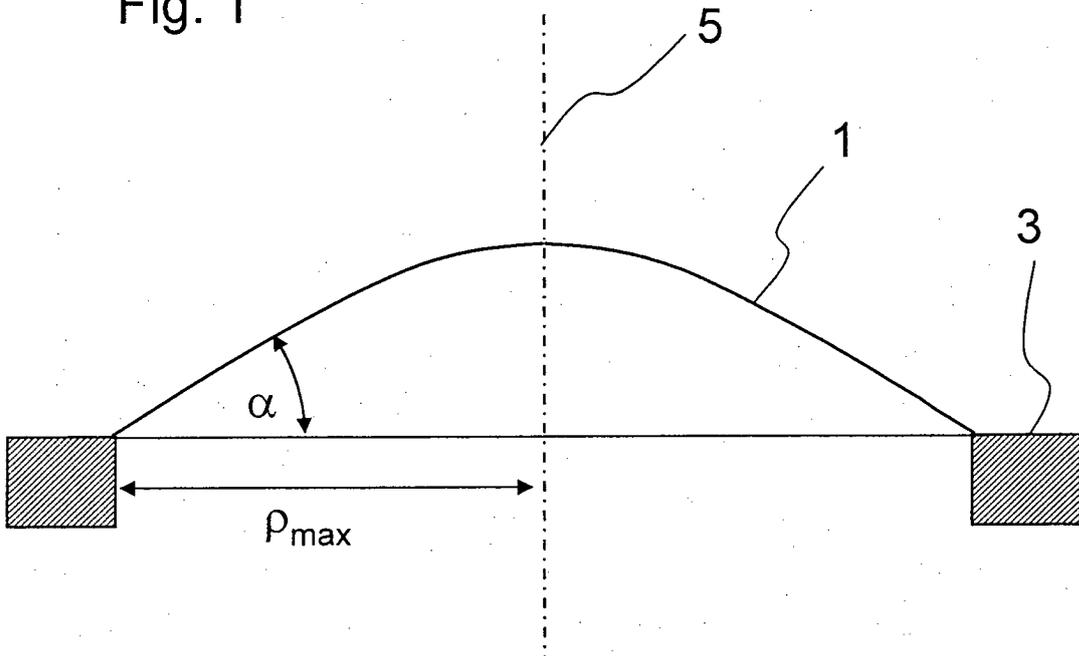


Fig. 2

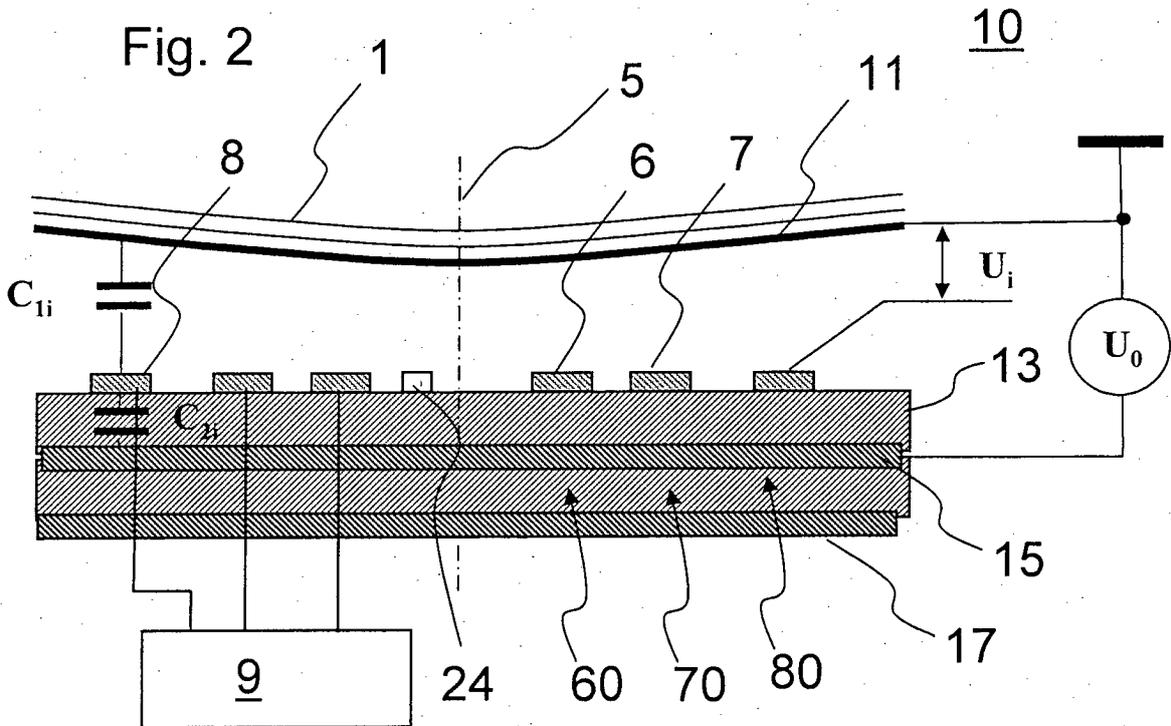


Fig. 3

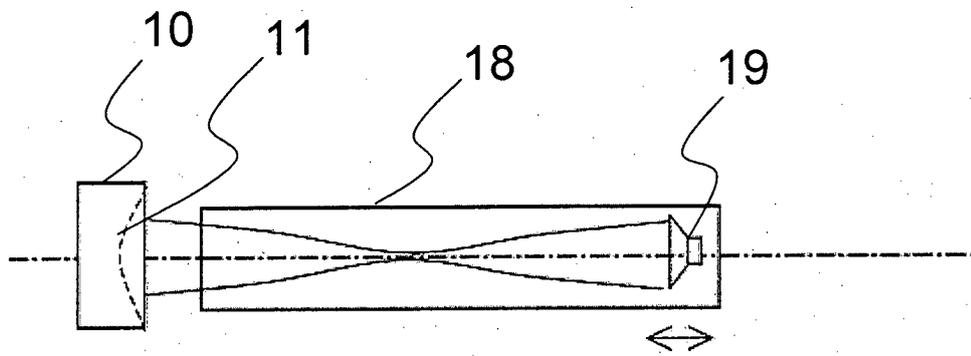


Fig. 4

