(19) Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2005 049 153 A1** 2007.04.19

(12) # Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2005 049 153.7**
(22) Anmeldetag: **14.10.2005**
(43) Offenlegungstag: **19.04.2007**

(51) Int Cl.[8]: ***G01C 9/06*** (2006.01)

(71) Anmelder:
Universität Bremen, 28359 Bremen, DE

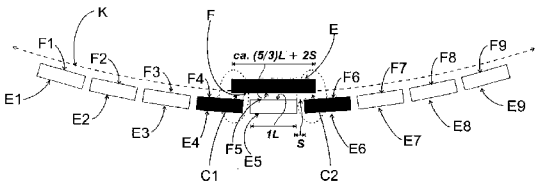
(74) Vertreter:
Meissner, Bolte & Partner Anwaltssozietät GbR, 28209 Bremen

(72) Erfinder:
Fabian, Marcus, Dr., 28205 Bremen, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Kapazitiver Positionssensor, insbesondere Neigungssensor, sowie Verfahren zum Betreiben des Positionssensors**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft einen kapazitiven Positionssensor mit einer bewegbaren Elektrode, insbesondere einen Neigungssensor mit Pendelelektrode E, und in Messrichtung der bewegbaren Elektrode aufeinanderfolgenden feststehenden Elektroden sowie mit einer Schaltung zum Auswerten von an den Elektroden abgenommenen elektrischen Größen. Daneben betrifft die Erfindung ein Verfahren zum Betreiben des Positionssensors. Erfindungsgemäß sind mehr als zwei in Messrichtung der bewegbaren Elektrode aufeinanderfolgende feststehende Elektroden vorgesehen, die kreissegmentförmig und zum Aufhänge- und Drehpunkt der bewegbaren Elektrode konzentrisch ausgebildet und angeordnet sind.



Beschreibung

Technisches Gebiet

[0001] Die Erfindung betrifft das technische Gebiet der Differentialweg- bzw. winkelaufnehmer mit kapazitivem Abgriff, nämlich einen kapazitiven Positionssensor mit einer bewegbaren Elektrode, insbesondere Neigungssensor mit Pendelelektrode E, und in Messrichtung der bewegbaren Elektrode aufeinanderfolgenden, feststehenden Elektroden, sowie mit einer Schaltung zum Auswerten von an den Elektroden abgenommenen elektrischen Größen. Entsprechende Sensoren werden für Präzisions-Langzeitneigungsmessungen, vorrangig in der Geodäsie und Geophysik aber auch in der Bautechnik eingesetzt. Hier sind speziell Neigungssensoren betroffen, die einen Pendelkörper mit kapazitivem Abgriff zur Winkelbestimmung (Bestimmung der Position des Pendelkörpers) verwenden. Zudem sind allgemein Sensoren betroffen, die durch kapazitiven Abgriff die Position des Sensorelementes bestimmen. Es gibt zahlreiche Varianten dieser Sensoren. Weiterhin betrifft die Erfindung ein Verfahren zum Betreiben des Positionssensors, insbesondere wenn der Sensor zwei Neigungssensoren mit Pendelelektrode besitzt, die so angeordnet sind, dass ihre Messrichtungen orthogonal zueinander sind.

[0002] Der Neigungswinkel eines Neigungssensors wird in Bezug auf das Schwerefeld der Erde gemessen. Der Neigungssensor liefert ein Ausgangssignal, das abhängt vom Winkel zwischen Neigungssensor bzw. dessen Gehäuse, dem Neigungsmesser, einerseits und der Lotrichtung (Schwerefeld) andererseits. Das Ausgangssignal kann kontinuierlich über eine Messelektronik in einen Datensammler geleitet und dort gespeichert werden.

Stand der Technik

[0003] Der Stand der Technik wird anhand von Abbildungen erläutert. Es zeigen:

[0004] **Abb.** 1a) bis 1c) Neigungssensor mit vertikal stehenden Elektroden (Stand der Technik),

[0005] **Abb.** 1d) bis 1f) Neigungssensor mit horizontal gerichteten Elektroden (Stand der Technik),

[0006] **Abb.** 2 Ersatzschaltbild (Stand der Technik).

[0007] Gängige Sensortypen basieren auf dem Prinzip des kapazitiven Differentialwegaufnehmers, siehe Schiessle, Edmund (1992), "Sensortechnik und Messwertaufnahme", 1. Auflage, Vogelverlag & Druck KG, Würzburg. Im Bereich der hochauflösenden Neigungssensoren werden hauptsächlich zwei Grundtypen dieser Sensoren eingesetzt. **Abb.** 1a)-f) zeigen beide Grundtypen schematisch. Die **Abb.** 1a), b), c) zeigen einen Sensor mit vertikal stehenden Elektroden, E1, E2, E3, die **Abb.** 1d), e), f) einen Sensor, bei dem die Elektroden E1, E2, E3 horizontal angeordnet sind. Ein Sensor besitzt im Wesentlichen drei Elektroden, die eine Elektrodenkonfiguration bilden. Die beiden äußeren Elektroden E1 und E3 sind fest mit dem Sensorgehäuse verbunden, die mittlere Elektrode E2 ist an einem dünnen Metallfaden als Pendelkörper ausgeführt. Jede der Elektroden besitzt je einen elektrischen Anschluss, A1, A2, A3 (nur in **Abb.** 1a) und d) gezeichnet). Wenn der Neigungssensor justiert ist (Nullposition, **Abb.** 1a) und d)), d.h. seine Gehäuseachse G ist lotrecht, befindet sich die Elektrode E2 mittig zwischen den Elektroden E1 und E3 bzw. mittig oberhalb der Elektroden E1 und E3. Die den Elektroden E1 und E3 zugewandte Außenfläche der pendelnden Elektrode E2 bildet hierbei mit den ihr zugewandten Oberflächen der Elektroden E1 und E3 zwei Kondensatoren C1 und C2. Die gesamte Elektrodenkonfiguration E1, E2, E3 bildet somit einen Differentialkondensator. Dieser lässt sich mit einem Ersatzschaltbild, mit zwei in Reihe geschalteten Einzelkondensatoren C1 und C2 mit Mittelabgriff, beschreiben (**Abb.** 2). Die Kapazität eines dieser Kondensatoren (Plattenkondensator) bestimmt sich allgemein nach der Formel

$$C = e0 \cdot eR \cdot A/d,$$

wobei C die Kapazität des Kondensators, e0 die Dielektrizitätskonstante des Vakuums, eR die Dielektrizitätskonstante des Materials zwischen den Elektroden, A die Überdeckungsfläche zwischen der bewegten und einer festen Elektrode, mit der die bewegte Elektrode den betrachteten Kondensator bildet, und d der Abstand zwischen den einander zugewandten Oberflächen der Elektroden ist. In der Nullposition eines Neigungssensors sind die Kapazitäten C1 und C2 auf Grund der Symmetrie der Anordnung der Elektroden gleich. Wird der Neigungssensor geneigt (**Abb.** 1b) und e)) verändert sich die Geometrie und somit die Abstände bzw. Überdeckungsflächen zwischen den Elektroden. Die Kapazitäten C1 und C2 unterscheiden sich voneinander, je nach Neigungswinkel. Das Vorzeichen des entsprechenden Kapazitätsunterschiedes bestimmt die Neigungsrichtung. Zwischen den Anschlüssen A1, A2, A3 in **Abb.** 2 lässt sich die Kapazitätsdifferenz zwischen C1 und C2, und somit der Neigungswinkel des Sensors, mit gängigen Messverfahren hochgenau bestimmen und der Sensor entsprechend kalibrieren.

[0008] Präzisionsneigungssensoren nach dem beschriebenen Prinzip werden vielfach eingesetzt und sind in der Praxis erprobt. Sie lassen sich vergleichsweise einfach fertigen. Im Langzeitbetrieb zeigen sie zudem eine sehr hohe, den Anforderungen entsprechende Genauigkeit. Die Winkelauflösung dieser Sensoren ist dabei mit wenigen nrad (10^{-7} Grad) ausgesprochen hoch.

Technische Probleme und Nachteile

[0009] In den **Abb.** 1c) und f) ist das für Präzisionsneigungsmessungen in Geodäsie und Geophysik wahrscheinlich größte grundsätzliche Problem gängiger Sensoren aufgezeigt. Wird der Sensor etwas stärker geneigt (**Abb.** 1c)), berührt die pendelnde Elektrode E2 eine der feststehenden Elektroden E1, E3. Die Grenze des Messbereichs ist erreicht. Bei horizontaler Anordnung der Elektroden gestaltet sich die Situation etwas günstiger. Aber auch hier wird die Messbereichsgrenze erreicht, wenn die pendelnde Elektrode nicht mehr mit beiden feststehenden Elektroden eine hinreichend große Überdeckungsfläche aufweist. Das Problem ist, dass in der Praxis bereits ein Neigungswinkel von ±1 bis 2 Grad reicht, um den Messbereich gängiger Sensoren zu überschreiten. Das bedeutet, dass diese Sensoren auf wenigstens einige Bruchteile eines Grads genau justiert sein müssen. Diese Justierung ist zeit- und arbeitsaufwendig und an Objekten in ungünstiger Lage (Gebirge, Meeresboden, entfernte Gegend) oft nur schwer oder gar nicht möglich. Der kleine Messbereich ist zusätzlich ein Problem, wenn sich an einem Untersuchungsobjekt viele kleine, spontan auftretende Neigungsereignisse, die Ziel der Untersuchung sind, in einer Kipprichtung summieren und so nach kürzerer Zeit der Messbereich verlassen wird. In diesem Fall muss der Sensor gelegentlich nachjustiert werden, was oft nicht in hinreichend kurzen Abständen möglich ist (z.B. bei großer Signaldynamik an Hangrutschungen). Grundsätzlich stellt jegliches Nachjustieren eines Neigungssensors ein Problem dar. Es entsteht zusätzlicher Arbeitsaufwand oder aber es muss eine automatische Nachstellvorrichtung mit weiteren mechanischen Komponenten verwendet werden. Beides verursacht Folgekosten und birgt Fehlerquellen für den Betrieb von Neigungsmessern. Ein Neigungssensor hoher Auflösung und Genauigkeit, der möglichst nicht nachjustiert werden muss, wäre daher wünschenswert.

Aufgabenstellung

Technische Aufgabe

[0010] Die vorliegende Erfindung soll ermöglichen, große Neigungssignale bei gleichzeitig hoher Auflösung des Sensors zu messen. Der dynamische Bereich des neuen Sensors soll gegenüber vorhandenen Sensoren entscheidend vergrößert sein. Durch den kapazitiven Abgriff ist der Stromverbrauch des Sensors gegenüber Sensoren, die auf dem Prinzip einer elektronischen Flüssigkeitslibelle basieren, gering. Dies hat Verbesserungen beim Messbetrieb zur Folge.

[0011] Ziel ist die hochpräzise und langzeitstabile kontinuierliche Messung des Neigungswinkels (Kippwinkel) von Objekten über einen großen Neigungswinkelmessbereich (hier ±10 Grad und mehr). Insbesondere langsam veränderliche Neigungen mit niederfrequenten Signalperioden, zwischen Jahren und 1 Sekunde, sollen erfasst werden. Über den gesamten Messbereich wird eine Auflösung von deutlich kleiner als 1 µrad (1 µrad = $5{,}73 \cdot 10^{-5}$ Grad) bei einer Genauigkeit im Bereich 1 µrad angestrebt. Solche Auflösungen und Genauigkeiten sind bei gängigen Neigungssensoren üblich, die aber die oben genannten Nachteile aufweisen.

Wesentliche Neuerungen:

[0012] Zur Lösung der Aufgabe ist der erfindungsgemäße Positionssensor durch mehr als zwei in Messrichtung der bewegbaren Elektrode aufeinanderfolgende, entlang einer gekrümmten Bahn angeordnete, feststehende Elektroden gekennzeichnet. Vorzugsweise ist der kürzeste Abstand zwischen zueinander benachbarten Flächen der bewegbaren Elektrode einerseits und den feststehenden Elektroden andererseits konstant.

[0013] In Fortbildung der Erfindung ist vorgesehen, dass zur Auswertung der elektrischen Größen zwei unmittelbar benachbarte feststehende Elektroden mit der benachbart positionierten bewegbaren Elektrode und/oder zwei feststehende Elektroden, zwischen denen mindestens eine feststehende Elektrode angeordnet ist, mit der benachbart positionierten bewegbaren Elektrode jeweils eine Elektrodenkonfiguration bilden. Durch diese Elektrodenkonfigurationen wird ein Differentialkondensator geformt.

[0014] Nach einem weiteren Gedanken der Erfindung ist vorgesehen, dass die bewegbare Elektrode in Messrichtung eine Länge von wenigstens etwa $(5/3) \cdot L + 2 \cdot S$ aufweist, wobei L die Länge einer feststehenden Elektrode in Messrichtung und S der Abstand zwischen zwei unmittelbar benachbarten feststehenden Elektroden in Messrichtung ist.

[0015] Vorteilhafter Weise ist vorgesehen, dass die feststehenden Elektroden in Messrichtung jeweils eine Länge L und quer zur Messrichtung eine Breite B aufweisen, und dass die Breite B größer ist als die Länge L.

[0016] Nach einem weiteren Gedanken der Erfindung ist vorgesehen, dass die aufeinanderfolgenden feststehenden Elektroden kreissegmentförmig und konzentrisch zum Aufhänge- und Drehpunkt P der Pendelelektrode ausgebildet und angeordnet sind, vorzugsweise bei Ansicht der Elektroden in Messrichtung und/oder bei Ansicht der Elektroden quer zur Messrichtung.

[0017] Nach einem weiteren Gedanken der Erfindung ist vorgesehen, dass die feststehenden Elektroden geometrisch einem Kugelschalensegment fol-

gend ausgebildet und entsprechend einer Kugelschale angeordnet sind.

[0018] Nach einem weiteren Gedanken der Erfindung weisen die feststehenden Elektroden in Messrichtung eine Länge l und quer zur Messrichtung eine Breite B auf, wobei die Länge l an verschiedenen Stellen der Breite B unterschiedlich ist, derart, dass sich die Länge l zu den Enden der feststehenden Elektroden hin verringert und in der Mitte der feststehenden Elektroden ihren Maximalbetrag l=L hat.

[0019] Vorteilhafter Weise haben die Abstände S zwischen den feststehenden Elektroden stets den gleichen Wert, auch nahe den Enden der feststehenden Elektroden.

[0020] Nach einem weiteren Gedanken der Erfindung kann der Raum im Inneren des Sensors, d.h. der Bereich, in dem sich die bewegbare Elektrode und die feststehenden Elektroden befinden, mit einer insbesondere nicht elektrisch leitfähigen Flüssigkeit gefüllt sein. Dadurch wird der Sensor in seinem Reaktionsverhalten träger und damit robuster gegenüber schockartigen Einwirkungen.

[0021] Die voranstehenden Ausführungen zur Abmessung der Elektroden quer zur Messrichtung, insbesondere mit Bezug zu den Ansprüchen 4 bis 8, sind grundsätzlich unabhängig von der Anzahl der feststehenden Elektroden gemäß Anspruch 1 und können auch Gegenstand von eigenständigen Ansprüchen sein.

[0022] Das wesentlich Neue am vorgeschlagenen Sensor ist erstens, dass dieser mehrere, um feste Abstände gegeneinander angebrachte, fest mit dem Sensorgehäuse verbundene Elektroden verwendet. Die bewegliche Pendelelektrode befindet sich durch diese Anordnung der festen Elektroden über einen, im Vergleich zu herkömmlichen Sensoren deutlich größeren Neigungswinkelbereich hinweg, stets gegenüber mindestens zwei der festen Elektroden und kann einen Differentialkondensator zur Bestimmung des Neigungswinkels bilden. Der Messbereich des neuen Sensors ist deutlich größer als der herkömmlicher Sensoren.

[0023] Zweitens ist neu und unabhängig vom Voranstehenden, dass die feststehenden Elektroden senkrecht zur Messrichtung des Neigungssensors kreissegmentförmig, konzentrisch zum Aufhängepunkt der Pendelelektrode ausgebildet sind.

[0024] Es ist zudem neu und unabhängig vom Voranstehenden, dass die kreissegmentförmigen Elektroden einer Kugelschale folgend angeordnet sind und sich senkrecht zur Messrichtung in ihrer Länge verkürzen. Durch diese spezielle Form (Kugelschalensegment) und Anordnung der Elektroden wird der Einfluss einer zur Messrichtung seitlichen Verkippung des Sensors minimiert, und dadurch der Messbereich noch weiter vergrößert.

[0025] Eine weitere Ausführung der Erfindung ist gekennzeichnet durch die Anordnung eines Neigungssensors zusammen mit einem weiteren kapazitiven Neigungssensor gleicher Art in einem gemeinsamen Gehäuse, wobei beide Neigungssensoren mehr als zwei aufeinanderfolgende feststehende Elektroden aufweisen und quer zueinander ausgerichtet sind, und zwar in zueinander senkrechten, horizontalen Richtungen. Hierbei dient einer der Neigungssensoren insbesondere auch dazu, die seitliche Verkippung des jeweils anderen Neigungssensors zu bestimmen.

[0026] Das erfindungsgemäße Verfahren zum Betreiben eines insbesondere erfindungsgemäßen Positionssensors ist dadurch gekennzeichnet, dass in einer ersten Messung elektrische Kapazitäten zwischen allen feststehenden Elektroden und der bewegbaren Pendel-Elektrode gemessen werden, derart, dass für jede der feststehenden Elektroden ein Kapazitätswert ermittelt wird, und dass für eine anschließende zweite Messung der Kapazitäten die feststehenden Elektroden ausgewählt werden, deren Kapazitätswerte einander am nächsten liegen und so eine aktive Elektrodenkonfiguration bilden, wobei die Kapazitätswerte dieser ausgewählten Elektroden nicht nahe Null sein dürfen (Ausschluss von feststehenden Elektroden, denen die Pendelelektrode nicht benachbart ist). Die erste Messung dient der Auswahl der zu berücksichtigenden Elektrodenkonfiguration (Differentialkondensator). Die jeweils nachfolgende zweite Messung der Kapazitäten betrifft dann nur die ausgewählte aktive Elektrodenkonfiguration. Während der ersten Messung können die elektrischen Kapazitäten der feststehenden Elektroden nacheinander oder zugleich bestimmt werden.

[0027] Erfindungsgemäß werden erste und zweite Messung ständig, in festen Zeitabständen zueinander und automatisiert an beiden in einem gemeinsamen Gehäuse zueinander senkrecht angeordneten Neigungssensoren durchgeführt.

[0028] Nach einem weiteren Gedanken der Erfindung werden die in den ersten und zweiten Messungen an beiden Sensoren ermittelten Kapazitätswerte der jeweils aktiven Elektrodenkonfigurationen mit abgespeicherten Kalibrationsfaktoren bearbeitet/verrechnet, wobei die derart erzielten Ergebnisse die jeweiligen Neigungswinkel des Positionssensors in beide orthogonale Richtungen repräsentieren.

Vorteile gegenüber dem Stand der Technik:

[0029] Es kann ein Sensor zur Verfügung gestellt werden, der entscheidende Probleme bei hochauflö-

senden Langzeitneigungsmessungen überwindet, und zwar (a) aufwendiges Justieren bzw. Nachjustieren und (b) Signaldynamikeinschränkungen wegen eines zu kleinen Messbereichs. Durch Verwendung eines kapazitiven Abgriffs ist der Stromverbrauch des Sensors gegenüber Sensoren mit elektrolytgefüllten Flüssigkeitslibellen deutlich reduziert. Dabei besitzt der neue Sensor, da er auf dem Prinzip des vielfach erprobten Differentialwegaufnehmers aufsetzt, ähnlich gute Eigenschaften, wie gängige Sensoren nach dem selben Prinzip. Der neue Sensor kann mit den selben Fertigungsmethoden, wie die vorhandenen Sensoren, fein- oder mikromechanisch hergestellt werden, so dass hohe Produktionskosten entfallen.

Anwendungen:

[0030] Anwendungen für den neuen Sensor sind z.B. die Überwachung der Stabilität des Erdbodens in tektonisch aktiven Gebieten, von Hängen, von Baugrund oder von Bauwerken (Brücken, Dämme, Kraftwerke) besonders auch in unzugängigen Gebieten (z.B. offshore), bei erhöhter Signaldynamik oder bei langen Messintervallen ohne Gerätewartung. Der Neigungsmesser wird am Untersuchungsobjekt, z.B. einem Bauwerksfundament, im Erdreich an einer Böschung/Hang (z.B. bei Hangrutschung) oder am Meeresboden z.B. in der Nähe von Tiefseevulkanen (an Mittelozeanischen Gebirgsketten) angebracht. Auf Grund der hohen Winkelauflösung der hier betrachteten Sensoren sind sehr kleine Signale messbar. Mit dem vorgeschlagenen Sensor sind aber insbesondere auch sehr große Signale, die z.B. zu Schäden am Untersuchungsobjekt führen, erfassbar. Hier ist ein wesentlicher Aspekt des neuen Sensors, dass erstens ein schädigendes (sehr großes) Signal frühzeitig, wenn es noch sehr klein ist, erkannt wird, um Schutzmassnahmen frühzeitig einzuleiten, und zweitens das schädigende Signal zum Zweck einer Analyse vollständig nachvollzogen werden kann.

Ausführungsbeispiel

[0031] Weitere Merkmale der Erfindung ergeben sich aus der Beschreibung im Übrigen und aus den Ansprüchen. Vorteilhafte Ausführungsformen der Erfindung werden nachfolgend anhand von Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen:

[0032] Abb. 3 einen erfindungsgemäßen Neigungssensor in der Ansicht (Seitenansicht) senkrecht zur Messrichtung,

[0033] **Abb.** 4a) bis 4d) den Sensor gemäß Abb. 3 unter verschiedenen Neigungen,

[0034] **Abb.** 5a) bis 5c) Ansichten (Vorderansicht) einer festen Elektrode in Messrichtung unter verschiedenen Neigungen,

[0035] **Abb.** 6a) bis 6b) dreidimensionale Darstellungen des erfindungsgemäßen Neigungssensors,

[0036] **Abb.** 7a) bis 7d) dreidimensionale Darstellungen des erfindungsgemäßen Neigungssensors,

[0037] Abb. 8 zwei Neigungssensoren in einem Gehäuse,

[0038] Abb. 9 einen schematisierten Schaltplan für die Neigungssensoren gem. Abb. 8.

[0039] Im vorgeschlagenen kapazitiven Weitwinkelneigungssensor werden mehrere, z.B. acht oder neun feststehende, mit dem Sensorgehäuse verbundene, um feste Winkel versetzte Elektroden benutzt (Abb. 3, Elektroden E1 bis E9). Zwei der feststehenden Elektroden (E4 und E6 in Abb. 3) bilden mit der Pendelelektrode E eine aktive Elektrodenkonfiguration (schwarz hervorgehoben). Die Elektroden E1 bis E9 sind konzentrisch zum Aufhänge- und Drehpunkt der Pendelelektrode E angeordnet. Die der Elektrode E zugewandten Flächen F1 bis F9 der Elektroden E1 bis E9 sollen vorzugsweise zum selben Punkt konzentrisch geformt sein. Zum selben Punkt konzentrisch geformt soll auch die Außenfläche F der Pendelelektrode E sein, die sich auf der gekrümmten Bahn (Kreisbahn) K bewegt. Jede der feststehenden Elektroden soll eine von der letztendlichen Baugröße des Sensors abhängige Länge L (z.B. 1cm) haben. Die Luftspalte zwischen den feststehenden Elektroden sollen die Breite S (z.B. 0,5mm) besitzen. Damit die Pendelelektrode E eine hinreichend große Überdeckungsfläche mit je zwei festen Elektroden der aktiven Elektrodenkonfiguration (E4 und E6 in Abb. 3) hat, soll diese eine Länge von wenigstens etwa $(5/3)\cdot L + 2S$ haben. Pendelelektrode und jeweils zwei der feststehenden Elektroden bilden wie beim herkömmlichen Sensorprinzip einen Differentialkondensator aus den Teilkondensatoren C1 und C2. Wird der Sensor geneigt, ändern sich letztlich die Kapazitäten des Differentialkondensators. Die Position des Pendelkörpers, und somit die Neigung des Sensors, kann präzise bestimmt werden. Bei kapazitiven Sensoren entsprechend einem Differentialkondensator sind Auflösungen deutlich kleiner 0,1 µm möglich. Bei einer Pendellänge von ca. 10 cm entspricht diese Auflösung der hier angestrebten Neigungswinkelauflösung von <1 µrad.

[0040] Der Erfindung entsprechend besitzt der Sensor mehrere feststehende Elektroden. Abb. 4a) gibt einen Seitenanblick des Bauprinzips des Sensors, wenn dieser justiert ist (Nullposition). Die Elektroden E4 und E6 bilden mit der Pendelelektrode E die aktive Elektrodenkonfiguration. An den Anschlüssen A1, A2, A3 lassen sich die Kapazitäten des entsprechenden Differentialkondensators messen. Wird der Sensor weiter geneigt, als der Messbereich der aktiven Elektrodenkonfiguration mit E4 und E6, gelangt die

Pendelelektrode in eine Position, in der sie mit den festen Elektroden E5 und E6 eine neue aktive Elektrodenkonfiguration bildet (Abb. 4b)). Die Pendelelektrode E und die Elektroden E5 und E6 bilden wieder einen Differentialkondensator. Die Kapazitäten lassen sich an A1, A2, A3 messen. Auch bei einer noch stärkeren Neigung des Sensors ist sein Messbereich (im Gegensatz zu gängigen Sensoren) noch nicht überschritten. Verlässt die Pendelelektrode E den Messbereich mit den festen Elektroden E5 und E6 gelangt sie unmittelbar in den sich nahtlos anschließenden Messbereich, den die dann aktive Elektrodenkonfiguration mit den festen Elektroden E5 und E7 hat (Abb. 4c)). Bei weiterer Neigung bildet die Pendelelektrode E mit den festen Elektroden E6 und E7 eine weitere aktive Elektrodenkonfiguration (Abb. 4d)). Der Messbereich gängigen Sensoren wird durch den kapazitiven Weitwinkelneigungssensor vervielfacht. Da hier der Neigungswinkelmessung das selbe Grundprinzip des Differentialwegaufnehmers zugrunde liegt wie bei gängigen Sensoren, hat der neue Sensor die gleichen guten Eigenschaften wie jene, also hohe Messauflösung bei hoher Genauigkeit und geringem Stromverbrauch.

[0041] Einem weiteren Gedanken der Erfindung entsprechend sind die Elektroden E1 bis E9 in der Vorderansicht (Bildebene quer zur Messrichtung) des kapazitiven Weitwinkelneigungssensors (**Abb.** 5a) bis c)) kreissegmentförmig, konzentrisch zum Aufhänge- und Drehpunkt P der Pendelelektrode E. Dies gilt vorzugsweise auch in Richtung quer zur Vorderansicht. In den **Abb.** 5a) bis c) ist in der Vorderansicht des Sensors nur die feste Elektrode E5 gezeichnet. Diese Kreissegmentform der festen Elektroden gewährleistet, dass der Sensor auch bei größeren Neigungen seitlich zur Messrichtung funktionsfähig bleibt. Wären die festen Elektroden in ihrer Seitenausdehnung ähnlich dimensioniert, wie in der Längsausdehnung, und nicht kreissegmentförmig, würde sich die Pendelelektrode bei größeren Neigungswinkeln seitlich neben und zu weit oberhalb der Elektroden befinden. Der Sensor würde bei größerer Seitenneigung nicht funktionieren. In den Abb. 5a) bis c) ist gezeigt, dass sich die Pendelelektrode E auch bei starker seitlicher Neigung des Sensors immer im gleichen Abstand gegenüber den festen Elektroden befindet.

[0042] Eine dreidimensionale Vorstellung des kapazitiven Weitwinkelneigungssensors geben die Abb. 6a) bis d) und 7a) bis d). Einige Strichzeichnungen von Aufnahmen eines Modells des Sensors, hier mit acht feststehenden Elektroden E1 bis E8 und Pendelelektrode E sind für verschiedene, teilweise große Neigungswinkel in unterschiedliche Richtungen gezeigt. Der Erfindung entsprechend sind die festen Elektroden geometrisch einer zum Aufhänge- und Drehpunkt der Pendelelektrode konzentrischen Schale entsprechend geformt und angeordnet. Um in zwei orthogonalen, horizontalen Richtungen einen hinreichend großen Messbereich von ca. ±10Grad und mehr zu erzielen, muss sich die Länge l der Elektroden (die Ausdehnung der Elektrode in Messrichtung, vergleiche Abb. 3 und 6b)) für größere seitliche Neigungen des Sensors auf einen Bruchteil (z.B. L/2) verschmälern. Abb. 6b) zeigt die Außenseite des dreidimensionalen Modells des Sensors. Hier ist zu erkennen, dass sich die Länge l der festen Elektroden, bei gleicher Spaltbreite S (vergleiche Abb. 3), von ihrem Maximalwert in der Mitte der Elektroden zu den Seiten hin verkleinert.

[0043] Nach einem weiteren Gedanken der Erfindung sind zwei kapazitive Weitwinkelneigungssensoren S1 und S2 gemeinsam mit einer Messelektronik M in einem Gehäuse H untergebracht (Abb. 8). Die Sensoren sind in zueinander senkrechten horizontalen Richtungen X, Y ausgerichtet und fest mit dem Gehäuse H verbunden. Über zwei Leitungsstränge L1 und L2 haben die Sensoren mit der Messelektronik M elektrischen Kontakt. In der Nullposition ist das Gehäuse H mit seiner Gehäuseachse G parallel zum Lot nivelliert. Beide Neigungssensoren werden gemeinsam mit der Messelektronik kalibriert. Hierzu dient der Eingang W des Gehäuses H, über den Kalibrationsfaktoren gehäuseintern abgespeichert werden können. Nach Kalibrierung kann der Sensor verwendet und am Anschluss O im Gehäuse H ein bereits digitalisiertes Signal entnommen und in einem Datensammler gespeichert werden.

[0044] Abb. 9 zeigt einen schematisierten Schaltplan für die Sensoren S1 und S2 (letzterer nicht eingezeichnet) und Messelektronik M. Die Messelektronik M besteht aus den Teilschaltungen ES (Elektrodenselektor), CM (Kapazitätsmesseinheit), ADC (Analog zu Digital Wandler), CR (Kalibrationsspeicher, nichtflüchtig) und PR (Kalibrationsspeicherprogrammierer). Vergleichbare Elektronikschaltungen sind als integrierte Bauteile erhältlich. Jeder der Sensoren S1 und S2 besitzt neun Anschlussleitungen a1 bis a9 zu den feststehenden Elektroden und eine Leitung a zu der Pendelelektrode eines Sensors. Diese Leitungen sind jeweils zu den Leitungssträngen L1 und L2 zusammengefasst. Beide Leitungsstränge enden im Elektrodenselektor ES.

[0045] Der Elektrodenselektor ES führt eine erste Messung durch und bestimmt für beide Sensoren gleichzeitig die aktive Elektrodenkonfiguration. Er misst nacheinander die Kapazitäten zwischen der Pendelelektrode mit Anschluss a und den neun Elektroden, die mit den Leitungen a1 bis a9 verbunden sind. Mit dieser Messung kann für jede der feststehenden Elektroden eindeutig ein Kapazitätswert ermittelt werden. Es werden die beiden feststehenden Elektroden zur anschließenden zweiten Messung ausgewählt, deren zugehörige Kapazitätswerte einander am nächsten liegen (ausgenommen die Elek-

troden mit Kapazitätswert nahe Null, weil sich die Pendelelektrode nicht ihnen gegenüber befindet). Die ausgewählten Elektroden bilden zusammen mit der Pendelelektrode die aktive Elektrodenkonfiguration. Dieser Auswahlvorgang des Elektrodenselektors (die sogenannte erste Messung) vollzieht sich kontinuierlich und automatisch in engen Zeitabständen und nach jeder sogenannten zweiten Messung. Die Zeitabstände sind vorzugsweise kürzer als das Messintervall der Neigungsmessung.

[0046] Durch den Elektrodenselektor ES ist der jeweils ausgewählten Elektrodenkonfiguration eine eindeutige Nummer fest zugeordnet. Jede mögliche aktive Elektrodenkonfiguration hat eine eindeutige Nummer. Diese Nummer sendet der Elektrodenselektor an den Kalibrationsspeicher CR. Der Kalibrationsspeicher adressiert mit dieser Nummer den Speicherplatz im CR, auf dem die Kalibrationsfaktoren der entsprechenden aktiven Elektrodenkonfigurationen beider Sensoren S1 und S2 abgespeichert sind. Gleichzeitig verbindet der Elektrodenselektor die elektrischen Anschlüsse der aktiven Elektrodenkonfiguration beider Sensoren S1 und S2 mit der Kapazitätsmesseinheit CM. Die Kapazitätsmesseinheit ermittelt hochgenau und präzise die Kapazitätswerte der Differentialkondensatoren, die von den aktiven Elektrodenkonfigurationen gebildet werden. Hier findet die sogenannte zweite Messung statt. Die Kapazitätsmesseinheit gibt die für beide Sensoren ermittelten Kapazitätswerte für die X und Y-Richtung des Sensors nach Abb. 8 als entsprechende Ausgangsspannungen aus. Die Ausgangsspannungen werden an den Analog zu Digital Wandler ADC weitergeleitet. Der ADC erhält gleichzeitig vom Kalibrationsspeicher CR die für die aktiven Elektrodenkonfigurationen (unter deren eindeutiger Nummer) zuvor abgespeicherten Kalibrationsfaktoren. Der ADC kann nun aus Kalibrationsfaktoren vom CR und Ausgangsspannungen der Kapazitätsmesseinheit CM die Neigungswinkel ermitteln und als digitalen Wert am Ausgang O der Messeinheit und des Gehäuses H (vergleiche Abb. 8) ausgeben. Die Kalibrationsfaktoren müssen zuvor separat ermittelt und im Kalibrationsspeicher CR am richtigen Speicherplatz abgelegt werden. Dies geschieht nach Herstellung des Sensors, während der Kalibrierung.

[0047] Die gesamte Einheit entsprechend Abb. 8 und Abb. 9, bestehend aus beiden Sensoren S1 und S2, sowie der Messelektronik M, wird nach der Fertigung und bei Bedarf kalibriert. Die Einheit wird auf einem Neigungstisch montiert. Zur Kalibrierung muss die Verbindung zwischen Elektrodenselektor ES und Kalibrationsspeicher CR unterbrochen und das Signal des Elektrodenselektors (die Elektrodenkonfigurationsnummer) aufgezeichnet werden. Die Spannungen beider Sensoren, die die Kapazitätsmesseinheit CM an den ADC liefert, werden zudem direkt gemessen.

[0048] Durch den Kalibrierprozess werden doppelte Winkel-Spannungs-Wertepaare, von beiden Sensoren S1 und S2, bzw. von allen möglichen, eindeutig nummerierten aktiven Elektrodenkonfigurationen ermittelt. Der Kalibrierprozess wird also gleichzeitig für beide Sensoren, d.h. deren mögliche aktive Elektrodenkonfigurationen, durchgeführt. Es müssen in jedem Kalibrierschritt zwei orthogonale Winkel, jeweils in Richtung der beiden Sensoren bestimmt, die dazu gelieferten Spannungen von CM gemessen und von ES die Nummer der gerade aktiven Elektrodenkonfigurationen beider Sensoren aufgezeichnet werden.

[0049] Zunächst werden beide Neigungssensoren S1 und S2 bzw. deren aktive Elektrodenkonfigurationen für den Fall kalibriert, in dem immer einer der Sensoren keine seitliche Neigung erfährt (vergleiche Abb. 5a)). Danach verstellt man den Neigungstisch seitlich, in eine Richtung, um einen festen Winkel. Nun verkippt man den Neigungstisch erneut in die andere (orthogonale) Richtung über den gesamten Messbereich eines Sensors. In einem der Sensoren bewegt sich die Pendelelektrode über verschiedene Elektrodenkonfigurationen hinweg (vergleiche Abb. 4a) bis d)). In dem dazu orthogonalen Sensor bewegt sich die Pendelelektrode seitlich (vergleiche Abb. 5a) bis c)). Beide Sensoren liefern sich verändernde Ausgangssignale am Ausgang der Kapazitätsmesseinheit CM, die von der Neigung des Neigungstisches in beide orthogonale Richtungen abhängen. Die Nummer der gerade aktiven Elektrodenkonfigurationen erhält man vom Ausgang des Elektrodenselektor ES, der im normalen Messbetrieb zum Kalibrationsspeicher CR führt. Die Ausgangsspannungen der Kapazitätsmesseinheit CM für alle aktiven Elektrodenkonfigurationen beider Sensoren (alle Nummern von ES) werden mit den am Neigungstisch eingestellten Winkeln verglichen und hieraus die Kalibrationsfaktoren berechnet. Über den Eingang W werden die Kalibrationsfaktoren mit dem Kalibrationsspeicherprogrammierer PR für alle möglichen aktiven Elektrodenkonfigurationen im Kalibrationsspeicher CR unter ihrer Nummer von ES als Speicherplatz abgespeichert. Nach Wiederherstellung aller Anschlüsse können die Kalibrationsfaktoren nun über den Elektrodenselektor ES aufgerufen und vom Kalibrationsspeicher CR an den ADC geschaltet werden. Die Messung kann beginnen.

Patentansprüche

1. Kapazitiver Positionssensor mit einer bewegbaren Elektrode, insbesondere Neigungssensor mit Pendelelektrode E, und in Messrichtung der bewegbaren Elektrode aufeinanderfolgenden, feststehenden Elektroden, sowie mit einer Schaltung zum Auswerten von an den Elektroden abgenommenen elektrischen Größen, gekennzeichnet durch mehr als zwei in Messrichtung der bewegbaren Elektrode entlang eines gekrümmten Weges aufeinanderfolgende

feststehende Elektroden.

2. Positionssensor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass zur Auswertung der elektrischen Größen zwei unmittelbar benachbarte feststehende Elektroden mit der benachbart positionierten bewegbaren Elektrode und/oder zwei feststehende Elektroden, zwischen denen mindestens eine feststehende Elektrode angeordnet ist, mit der benachbart positionierten bewegbaren Elektrode jeweils eine Elektrodenkonfiguration bilden.

3. Positionssensor nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die bewegbare Elektrode in Messrichtung eine Länge von wenigstens $(5/3)\cdot L + 2\cdot S$ aufweist, wobei L die Länge einer feststehenden Elektrode in Messrichtung und S der Abstand zwischen zwei unmittelbar benachbarten feststehenden Elektroden in Messrichtung ist.

4. Positionssensor nach Anspruch 1 oder einem der weiteren Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die feststehenden Elektroden in Messrichtung eine Länge L und quer zur Messrichtung eine Breite B aufweisen, und dass die Breite B größer ist als die Länge L.

5. Positionssensor nach Anspruch 1 oder einem der weiteren Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die aufeinanderfolgenden feststehenden Elektroden kreissegmentförmig und konzentrisch zum Aufhänge- und Drehpunkt P der Pendelelektrode ausgebildet und angeordnet sind.

6. Positionssensor nach Anspruch 4 oder 5, dadurch gekennzeichnet, dass die feststehenden Elektroden geometrisch einem Kugelschalensegment entsprechend ausgebildet und einer Kugelschale folgend angeordnet sind.

7. Positionssensor nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die feststehenden Elektroden in Messrichtung eine Länge l und quer zur Messrichtung eine Breite B aufweisen, und dass die Länge l an verschiedenen Stellen der Breite B unterschiedlich ist, derart, dass sich die Länge l zu den Enden der feststehenden Elektroden hin verringert und in der Mitte der feststehenden Elektroden ihren Maximalbetrag l=L hat.

8. Positionssensor nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Abstände S zwischen den feststehenden Elektroden stets den gleichen Wert haben, auch nahe den Enden der feststehenden Elektroden.

9. Positionssensor nach Anspruch 1 oder einem der weiteren Ansprüche, gekennzeichnet durch die Anordnung zusammen mit einem weiteren kapazitiven Neigungssensor gleicher Art in einem gemeinsamen Gehäuse, wobei insbesondere beide Neigungssensoren mehr als zwei aufeinanderfolgende feststehende Elektroden aufweisen und quer zueinander ausgerichtet sind, insbesondere in zueinander senkrechten, horizontalen Richtungen.

10. Positionssensor nach Anspruch 1 oder einem der weiteren Ansprüche gekennzeichnet dadurch, dass das Sensorgehäuse, d.h. der Bereich in dem sich Pendelelektrode und feststehende Elektroden befinden, mit einer, insbesondere nicht elektrisch leitfähigen Flüssigkeit gefüllt ist.

11. Verfahren zum Betreiben eines Positionssensors gemäß Anspruch 1 oder einem der weiteren Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass in einer ersten Messung elektrische Kapazitäten zwischen allen feststehenden Elektroden und der bewegbaren Elektrode gemessen werden, derart, dass für jede der feststehenden Elektroden ein Kapazitätswert ermittelt wird, und dass für eine sich jeweils anschließende zweite Messung der Kapazitäten die feststehenden Elektroden ausgewählt werden, deren Kapazitätswerte einander am nächsten liegen und so eine aktive Elektrodenkonfiguration bilden, wobei die Kapazitätswerte dieser ausgewählten Elektroden nicht nahe Null sein dürfen.

12. Verfahren nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass die in der ersten und zweiten Messung fortlaufend ermittelten Kapazitätswerte der aktiven Elektrodenkonfigurationen mit abgespeicherten Kalibrationsfaktoren bearbeitet/verrechnet werden, und dass die derart erzielten Ergebnisse die jeweiligen Neigungswinkel des Positionssensors repräsentieren.

13. Verfahren nach Anspruch 11 zum Betreiben eines Positionssensors nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass die in der ersten und zweiten Messung fortlaufend ermittelten Kapazitätswerte der aktiven Elektrodenkonfigurationen beider, quer zueinander ausgerichteter Sensoren für jede Abfolge von erster und zweiter Messung mit abgespeicherten Kalibrationsfaktoren bearbeitet/verrechnet werden, und dass die derart erzielten Ergebnisse die jeweiligen Neigungswinkel des Positionssensors in die beiden Messrichtungen repräsentieren.

Es folgen 9 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

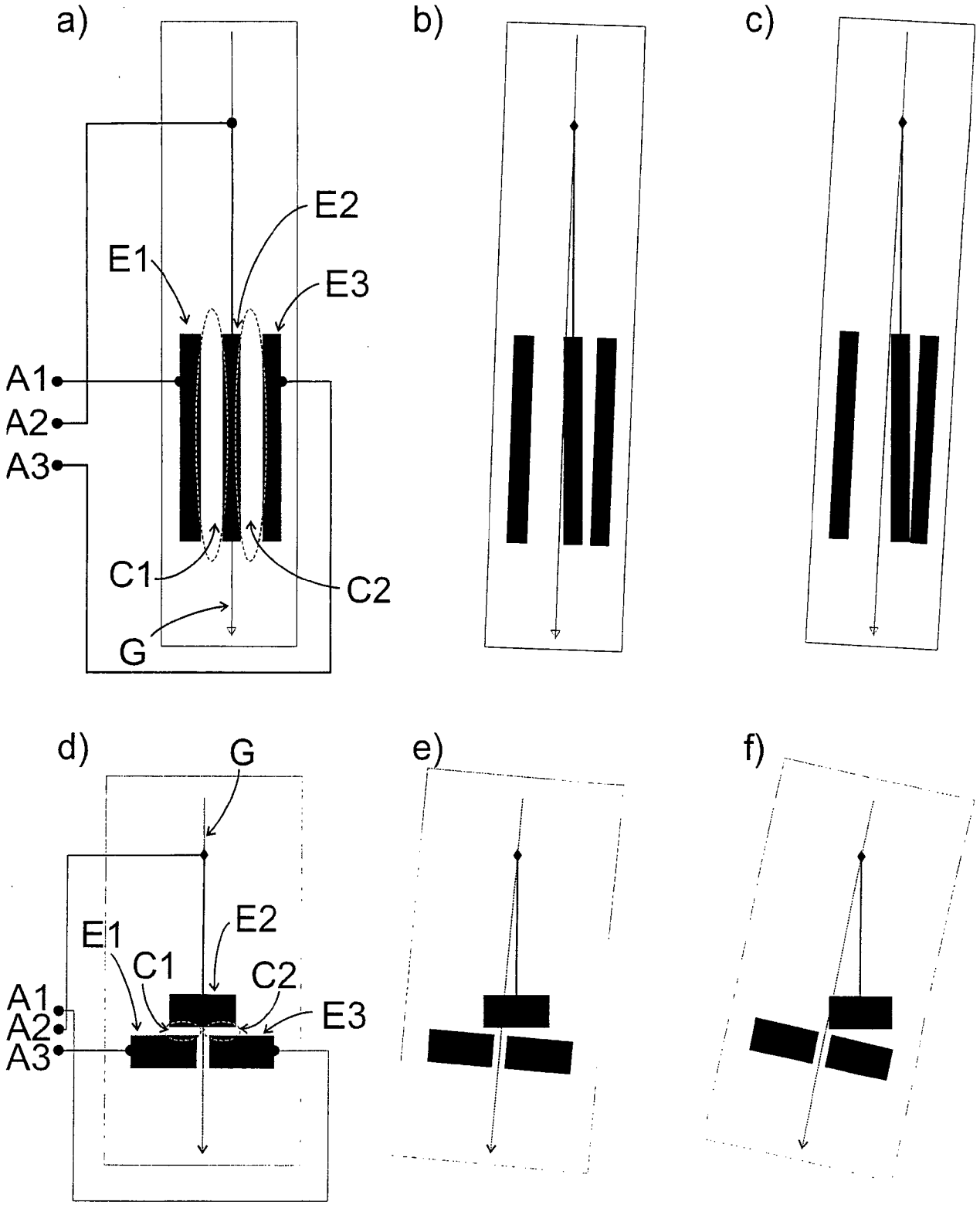


Abb.1

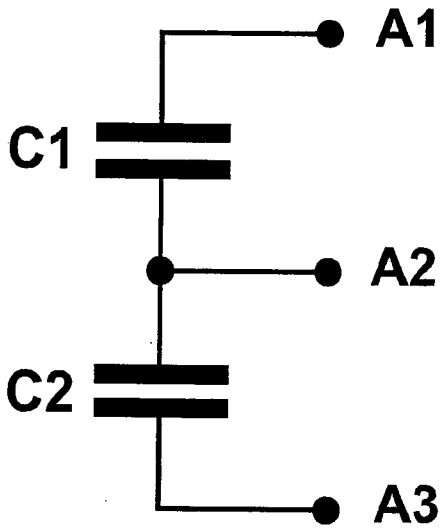


Abb.2

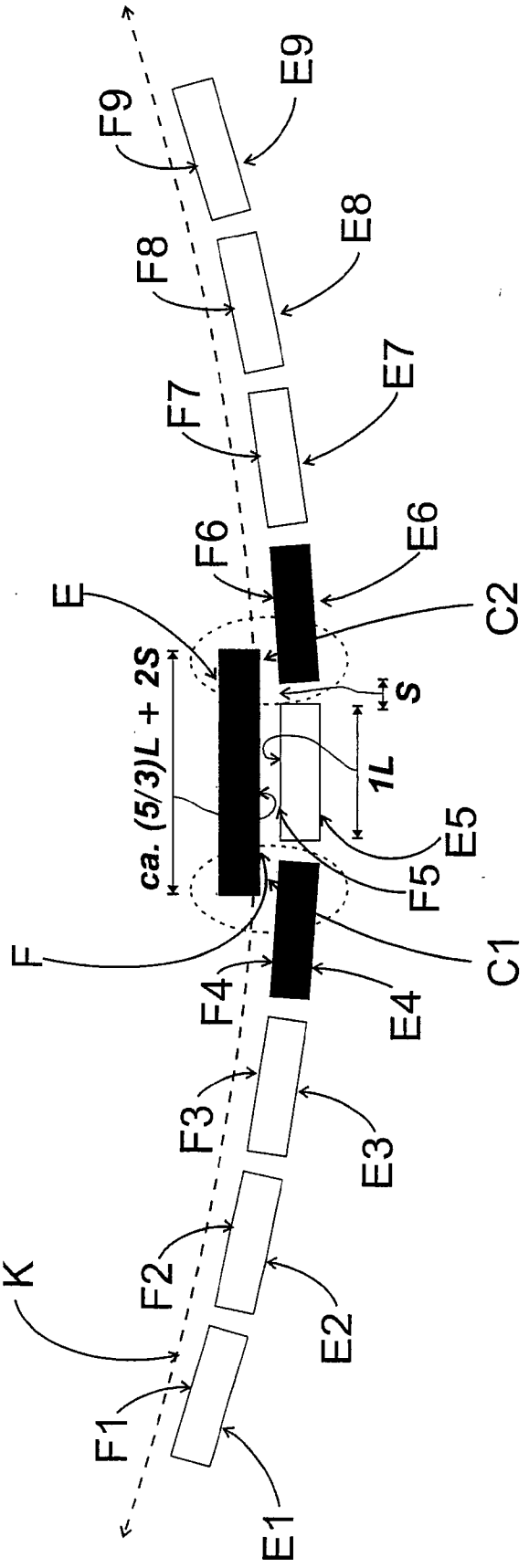

E9
F9
E8
F8
E7
F7
E6
F6
E
C2
S
1L
ca. (5/3)L + 2S
E5
F5
F
C1
F4
E4
F3
E3
K
F2
E2
F1
E1

Abb.3

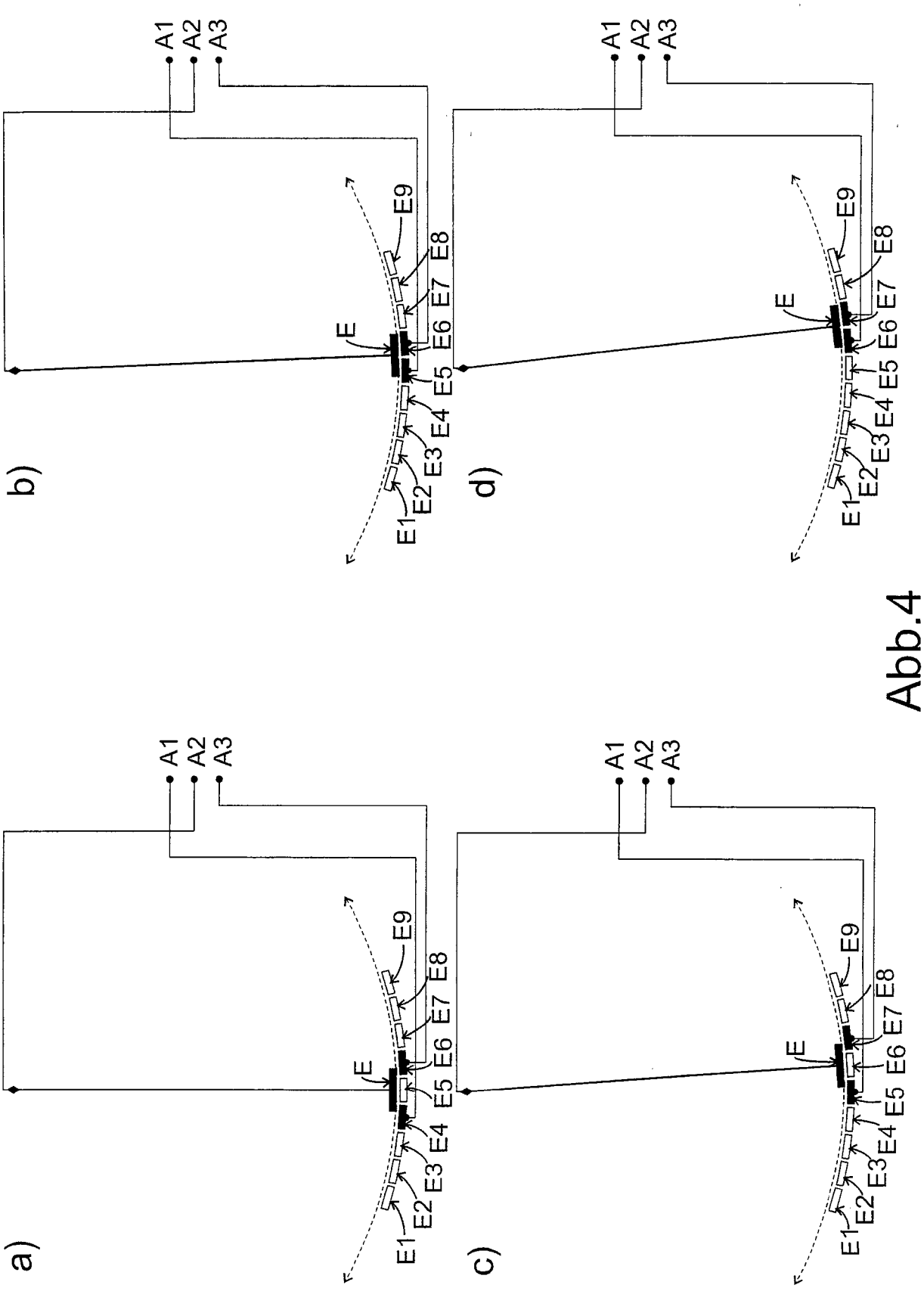


Abb.4

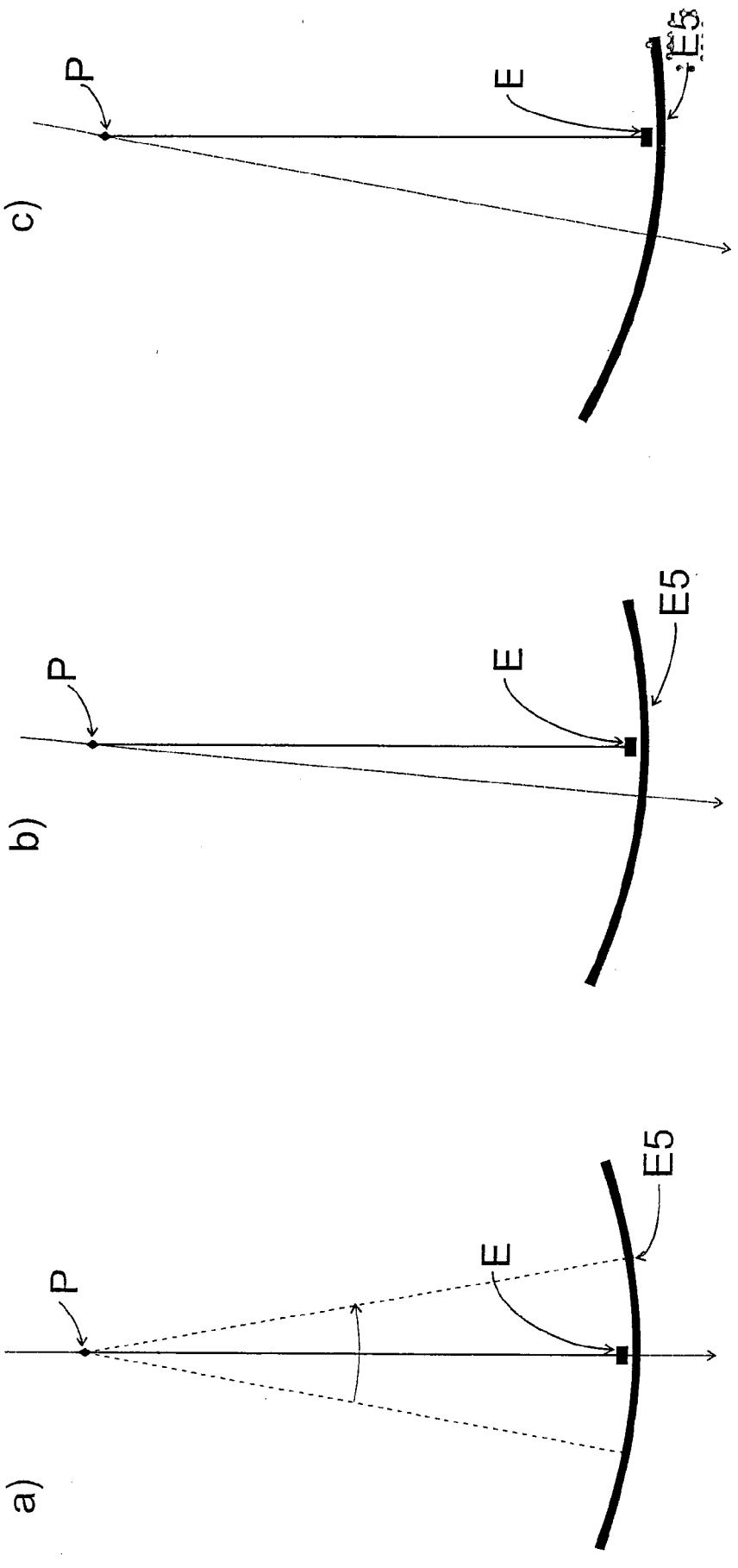


Abb.5

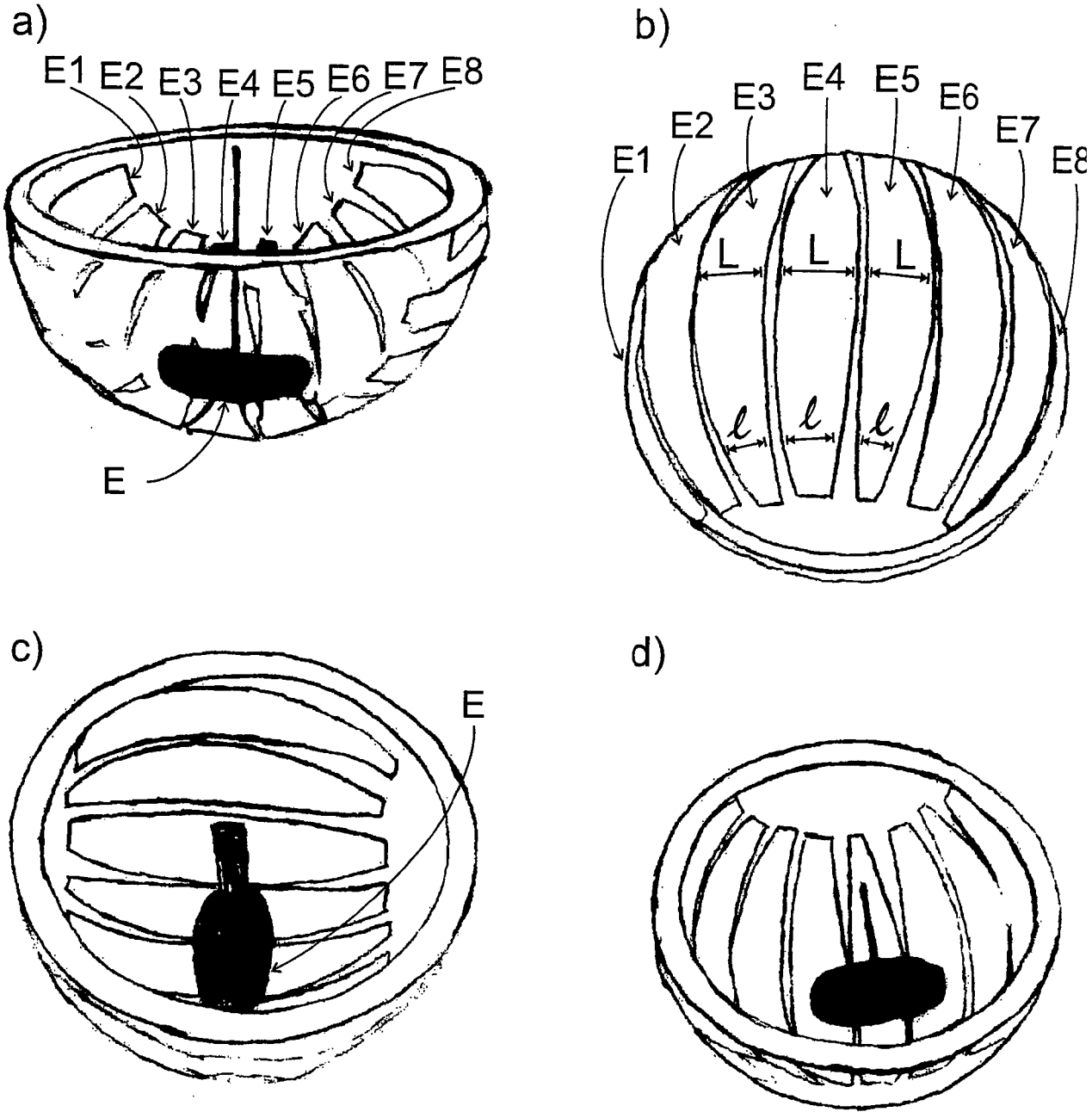
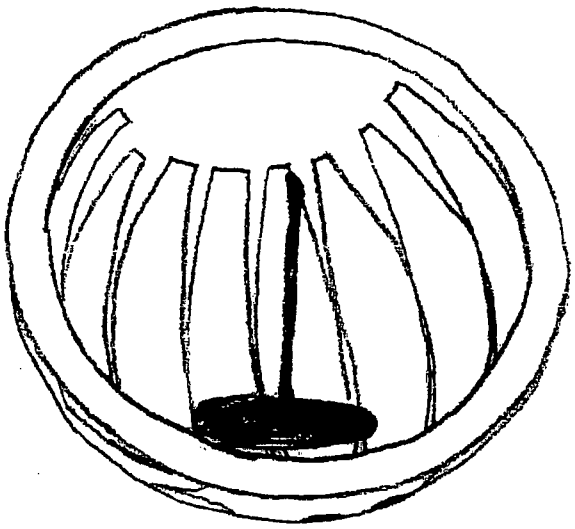
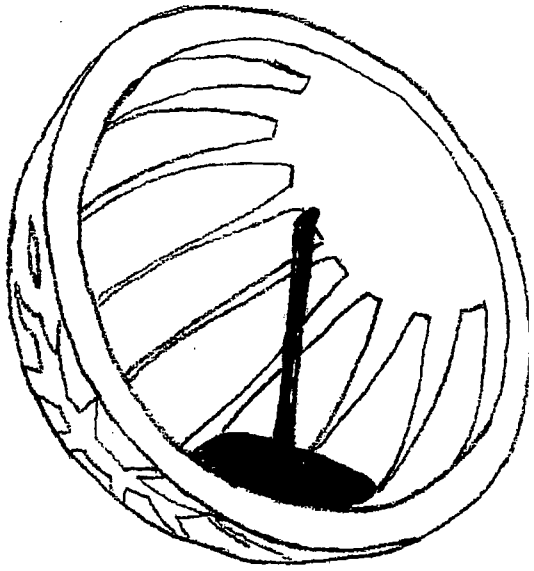


Abb.6

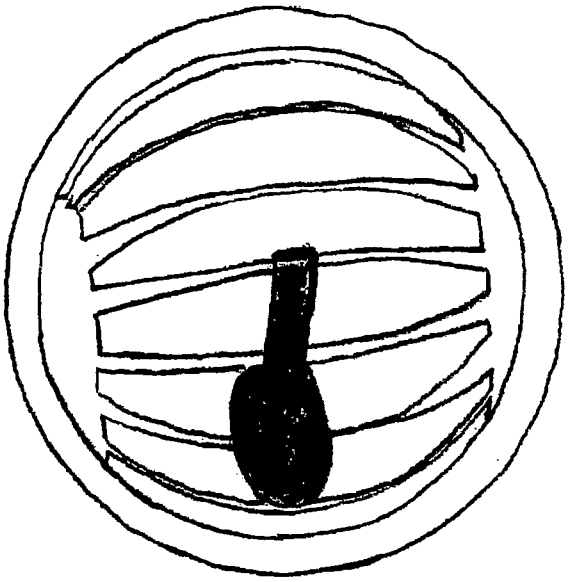
a)



b)



c)



d)

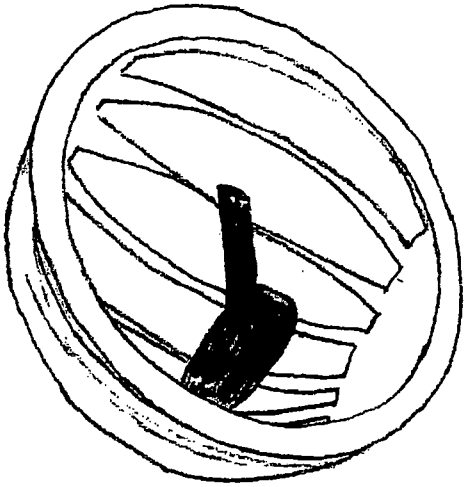


Abb.7

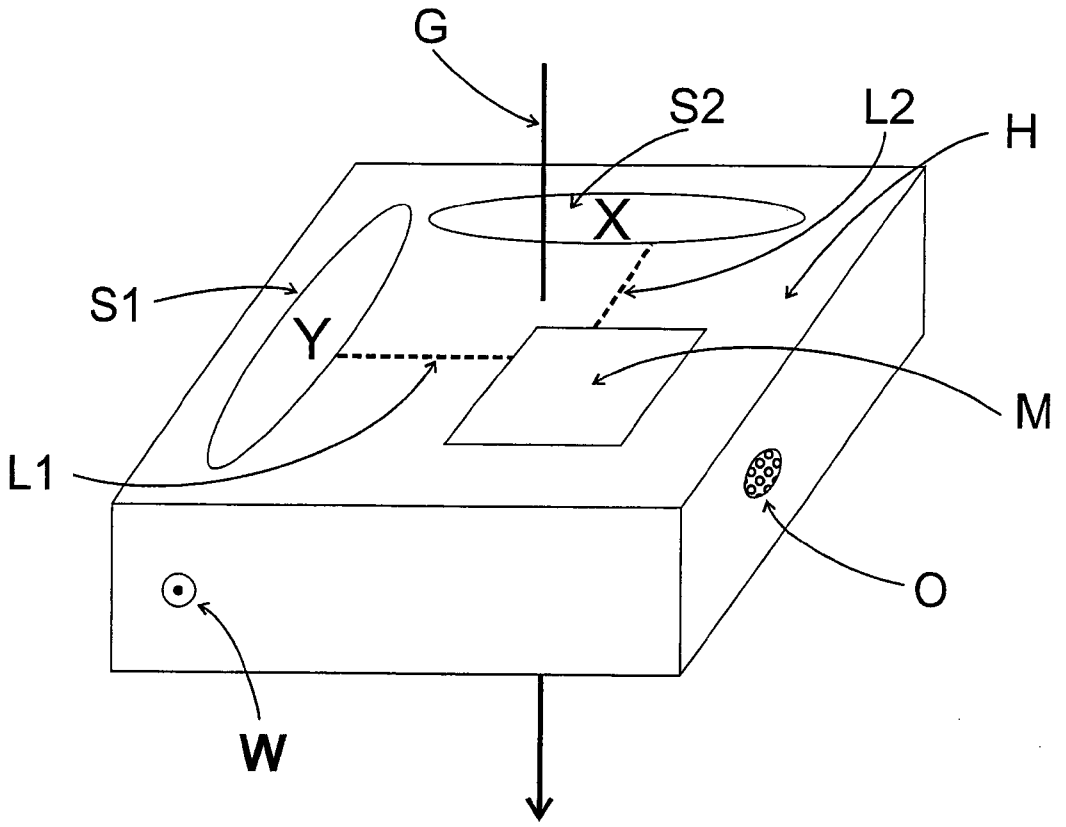
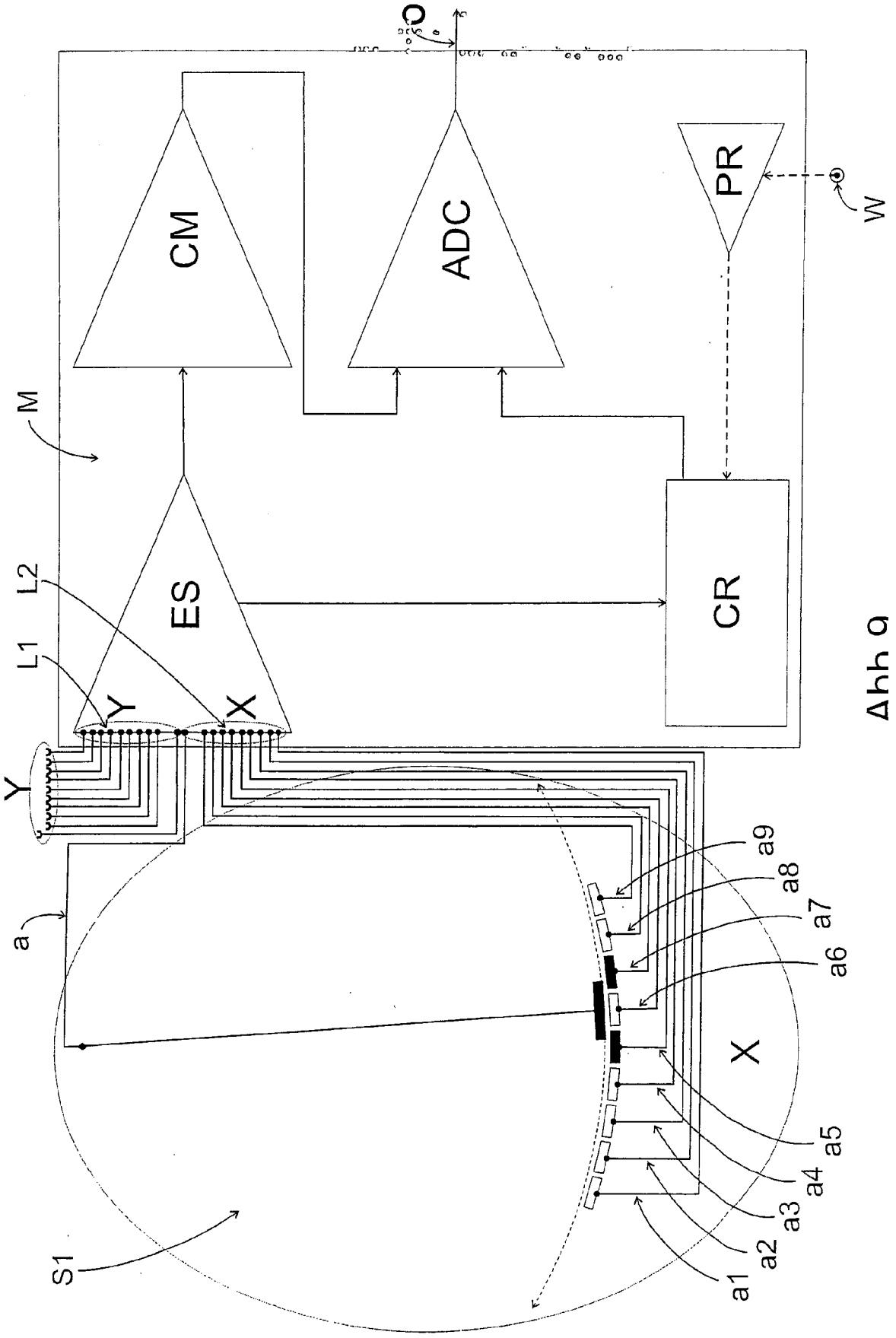


Abb.8



Δhh q