

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
20. Mai 2010 (20.05.2010)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2010/055055 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:
G01C 19/56 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2009/064984

(22) Internationales Anmeldedatum:
11. November 2009 (11.11.2009)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
08168846.7 11. November 2008 (11.11.2008) EP

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG E.V.** [DE/DE]; Hansastrasse 27c, 80686 München (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **MERZ, Peter** [CH/DE]; Dorfstrasse 44, 25557 Beldorf (DE). **WEISS, Manfred** [DE/DE]; Henning-Storm-Str. 2, Itzehoe 25524 (DE).

(74) Anwälte: **OLGEMOELLER, Luitgard** et al.; Leonhard Olgemoeller Fricke, Postfach 10 09 62, 80083 München (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Erklärungen gemäß Regel 4.17:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: MICROMECHANICAL CORIOLIS RATE OF ROTATION SENSOR

(54) Bezeichnung : MIKROMECHANISCHER CORIOLIS-DREHRATENSOR

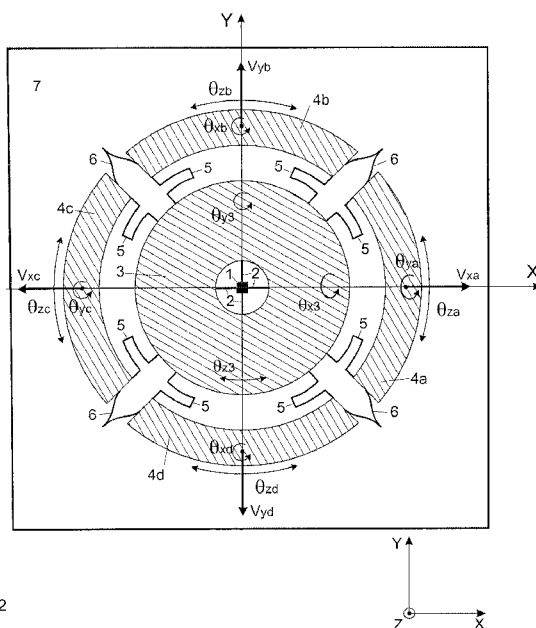


Fig. 2

(57) Abstract: The invention relates to a micromechanical Coriolis rate of rotation sensor for detecting rates of rotation $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$ with components around measuring axes in three spatial directions (X, Y and Z axis) which are orthogonal to one another: the Coriolis rate of rotation sensor has a substrate, a detection mass and at least two drive masses, wherein the drive masses can each be driven to perform a primary movement ($V_{xa}, V_{ya}, V_{xb}, V_{yb}, V_{xc}, V_{yc}, V_{xd}, V_{yd}$) relative to the substrate, the direction of the primary movement ($V_{xa}, V_{ya}, V_{xb}, V_{yb}, V_{xc}, V_{yc}, V_{xd}, V_{yd}$) of one of the at least two drive masses is perpendicular to the direction of the primary movement ($V_{xa}, V_{ya}, V_{xb}, V_{yb}, V_{xc}, V_{yc}, V_{xd}, V_{yd}$) of another of the at least two drive masses, and the detection mass is coupled to the drive masses. The invention also relates to an Inertial Measurement Unit (IMU) and to a method for detecting rates of rotation in three spatial directions which are orthogonal to one another.

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft einen mikromechanischen Coriolis-Drehratensensor zur Erfassung von Drehraten $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$ mit Komponenten um Messachsen in drei zueinander orthogonalen Raumrichtungen (X-, Y- und Z-Achse): Der Coriolis-Drehratensensor weist ein Substrat, eine Detektionsmasse und wenigstens zwei Antriebsmassen auf, wobei die Antriebsmassen jeweils relativ

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



— *Erfindererklärung (Regel 4.17 Ziffer iv)*

Veröffentlicht:

— *mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)*

zum Substrat zu einer Primärbewegung ($V_{\gamma a}, V_{\gamma b}, V_{\gamma c}, V_{\gamma d}$) antreibbar sind, die Richtung der Primärbewegung ($V_{\gamma a}, V_{\gamma b}, V_{\gamma c}, V_{\gamma d}$) einer der wenigstens zwei Antriebsmassen senkrecht zur Richtung der Primärbewegung ($V_{\gamma a}, V_{\gamma b}, V_{\gamma c}, V_{\gamma d}$) einer anderen der wenigstens zwei Antriebsmassen ist und die Detektionsmasse mit den Antriebsmassen gekoppelt ist. Die Erfindung betrifft des Weiteren eine Inertial Measurement Unit (IMU) sowie ein Verfahren zur Erfassung von Drehraten in drei zueinander orthogonalen Raumrichtungen.

Mikromechanischer Coriolis-Drehratensensor

Die vorliegende Erfindung betrifft einen mikromechanischen Coriolis-Drehratensensor zur Erfassung von Drehraten mit Komponenten um Messachsen in drei zueinander orthogonalen Raumrichtungen (X-, Y- und Z-Achse), wobei der Sensor ein Substrat, eine Detektionsmasse und wenigstens zwei Antriebsmassen aufweist, wobei die Antriebsmassen jeweils relativ zum Substrat zu einer Primärbewegung antreibbar sind und die Detektionsmasse mit den Antriebsmassen mechanisch so gekoppelt ist, dass die Detektionsmasse durch eine Sekundärbewegung der Antriebsmassen, bewirkt durch Corioliskraft bei Wirkung einer zu erfassenden äußeren Drehrate, zu einer Erfassungsbewegung anregbar ist.

Coriolis-Drehratensensoren sind aus dem Stand der Technik allgemein bekannt. Sie dienen der Messung einer äußeren Drehrate eines Körpers oder Systems um eine oder zwei Achsen. Die Achse oder die Achsen sind relativ zum zu vermessenden Körper oder System definiert und mittels eines Koordinatenbezugssystems beschrieben, also im Falle zweier Achsen orthogonal zueinander ausgerichtet. Die Achsen werden im Allgemeinen auch als Messachsen bezeichnet. Coriolis-Drehratensensoren nutzen die bei einer Rotation um eine Messachse auftretenden Corioliskräfte auf ein bewegtes Feder-Masse-System.

Aufgrund Miniaturisierung und geringer Herstellungskosten finden mit MEMS-Technologie gefertigte Beschleunigungssensoren (zur Erfassung linearer Beschleunigungen) ein immer breiter werdendes Anwendungsfeld. Während MEMS-Beschleunigungssensoren schon in hohen Stückzahlen gefertigt werden und leistungsmäßig den mit herkömmlichen Technologien gefertigten Bauteilen gleichwertig sind, müssen bei Drehratensensoren aufgrund der sehr geringen Kräfteverhältnisse die Systemkonstruktion sowie die entsprechende Prozesstechnologie weit ausgeklügelter sein. Dadurch erklärt sich, dass für Beschleunigungssensoren schon zahlreiche MEMS-Designs bekannt sind, welche nicht nur Inertialbewegungen in Richtung einer Raumachse erfassen können, sondern zwei- oder auch dreidimensional, d.h. in Richtung aller Raumachsen, sensitiv sind. Für Drehratensensoren ist die Implementierung einer 3D-Sensitivität in einem MEMS-Bauelement aufwendig, da verschiedene Antriebs- und Sense-Moden kontrolliert angeregt und ausgelesen werden müssen. Dabei ist das mechanische und elektrische Übersprechen des Antriebs in den Sense-Mode einerseits sowie das Übersprechen der einzelnen Sense-Moden untereinander zu unterdrücken.

5 Aus der **DE 10 2007 012 163 A1** sind ein Drehratensensor sowie ein Verfahren zu dessen Herstellung bekannt. Der Drehratensensor umfasst ein in XY-Ebene eines Bezugskoordinatensystems ausgerichtetes Substrat, mindestens zwei Basiselemente und Ausleseeinrichtungen. Die Basiselemente umfassen ihrerseits jeweils einen Rahmen, eine Aufhängung des Rahmens am Substrat, zumindest eine seismische
0 Masse, eine Aufhängung der seismischen Masse am Rahmen sowie Antriebsmittel zum Antreiben der Basiselemente. Die Basiselemente sind durch wenigstens einen am Substrat angeordneten Kopplungsbalken miteinander gekoppelt. Durch die Anordnung des Kopplungsbalkens am Substrat werden dessen Bewegungsmöglichkeiten relativ zum Substrat definiert, wie beispielsweise Freiheitsgrade seiner Bewegung verringert, so
5 dass Störauslenkungen oder Störschwingungen der seismischen Massen über die Kopplung mit dem Kopplungsbalken vermindert oder unterdrückt werden. Der offenbarte Drehratensensor ist zur Erfassung von Drehraten um eine oder zwei Raumachsen geeignet. Eine Erfassung von Drehraten in alle drei Raumrichtungen ist mit diesem Drehratensensor nach dem Stand der Technik nicht möglich.

0 Die **EP 1 775 551 A1** offenbart einen Drehratensensor, der mittels MEMS-Technik in einem Siliziumwafer ausgebildet ist. Er besitzt einen Ringbereich, der über acht Balkenfederelemente an einem Zentralbereich aufgehängt ist. Der Ringbereich kann Primär- und Sekundär vibrationen um die zentrale Aufhängung ausführen. Die
5 Primär vibration wird durch Betätigungselektroden in einem $\cos 2\theta$ -mode angeregt. Bei Wirken einer äußeren Drehrate Ω um eine Achse senkrecht zum Ringbereich wird eine Corioliskraft erzeugt, die wiederum eine Sekundär vibration im $\sin 2\theta$ -mode erzeugt. Mit diesem Drehratensensor nach dem Stand der Technik ist lediglich die Erfassung einer äußeren Drehrate um eine Drehachse möglich.

0 Aus der **US 2007/0266785 A1** ist ein Drehratensensor zur Erfassung einer Rotation um eine Erfassungsachse (Y-Achse) bekannt. Er besitzt eine Stützstruktur und zwei Massen, die flexibel so mit der Stützstruktur verbunden sind, dass sie Bewegungen in zwei entgegen gesetzte Richtungen entlang einer Antriebsachse senkrecht zur
5 Erfassungsachse ausführen können. Auf die bewegten Massen wirkt in Abhängigkeit von der Drehrichtung der zu erfassenden äußeren Drehrate eine Corioliskraft, die zu einer Auslenkung oder Erfassungsbewegung um die Erfassungsachse führt. Der offenbarte Drehratensensor erfasst eine äußere Drehrate in einer Richtung senkrecht zur Antriebsachse. Die Erfassung von äußeren Drehraten mit Komponenten in drei
0 Raumrichtungen (3D-Sensor) ist mit diesem Drehratensensor nicht möglich.

- 5 Um Drehraten in allen drei Raumrichtungen oder solche mit Komponenten in allen drei Raumrichtungen erfassen zu können, ist aus dem Stand der Technik bekannt, mehrere ein- oder zweidimensionale Einzelsensoren zu einer inertialen Messeinheit (Inertial Measurement Unit, IMU) zu kombinieren. Dabei werden Drehratensensoren zur Erfassung von Drehraten in einer Richtung, d.h. eindimensionale Einzelsensorelemente (Sensorchips), oder in zwei Richtungen (zweidimensionale Einzelsensorelemente) auf 0 Chip- oder Leiterplattebene oder in einem entsprechenden Sensorgehäuse kombiniert aufgebaut, was auch als Hybridaufbau oder Sensor-Cluster bezeichnet wird. Nachteilig bei inertialen Messeinheiten im Hybridaufbau oder bei einer Kombination mehrerer unterschiedlicher Einzelsensordesigns auf Chipebene ist die relativ aufwendige Fertigung sowie der verhältnismäßig hohe Raumbedarf, da für die Erfassung von 5 Drehraten in den unterschiedlichen Raumrichtung jeweils eine eigene entsprechende Sensorstruktur mit Antriebsmassen, Detektionseinheiten, Antrieben und Erfassungssystemen vorgesehen werden muss.
- 0 Ein Verfahren zur Herstellung eines solchen Hybridaufbaus ist beispielsweise aus der DE 10 2006 016 260 A1 bekannt. Dabei wird ein Wafer mit entsprechenden aktiven Strukturen, z.B. in sich eigenständig funktionalen Ein- oder Zwei-Achs-Einzelsensoren, bereitgestellt und mit einem Kappenwafer, der Kavitäten oder Vertiefungen für die Einzelsensoren aufweist, gehäust. Ein Coriolis-Drehratensensor, der zur Erfassung von 5 Drehraten in drei Raumrichtungen geeignet ist, sowie ein Verfahren zu dessen Herstellung ist in "Novel 3-Axis Gyroscope on a Single Chip using SOI-Technology" von M-Traechter, T. Link, J. Dehnert, J. Auber, P. Nommensen und Y. Manoli, Inertial Sensors & Systems, HSG-IMIT, Villingen-Schwenningen, Germany, offenbart. Die Veröffentlichung beschreibt einen Sensor-Cluster, bei dem zur Herstellung eines zur Erfassung von Drehraten in drei Raumrichtungen geeigneten Sensoreinheit ein üblicher 0 "Out of plane"-Sensor (Sensor, bei dem die Erfassungsachse aus der Substratebene herausragt) mit zwei "In-plane"-Sensoren (Sensor, bei dem die Erfassungsachse in der Substratebene liegt) kombiniert wird. Die beschriebene Sensoreinheit weist im Ergebnis drei in sich jeweils selbstständig funktionsfähige Einzelsensorelemente auf, die jeweils 5 eine Drehrate in einer bestimmten zugewiesenen Raumrichtung (X, Y oder Z) erfassen. In sich selbst funktionsfähig bedeutet, dass jedes Einzelsensorelement alle zur Erfassung der jeweiligen zugewiesenen Drehrate notwendigen Funktionseinheiten wie Antriebsmassen, Detektionsmassen, Antriebseinheiten oder -elektroden sowie Detektionseinheiten oder -elektroden aufweisen. Die demnach hohe Anzahl der 0 Funktionseinheiten beinhaltet bestimmte Nachteile, wie hohe Produktionskosten, hoher Produktionsaufwand, insbesondere aufwendige Montage, oftmals nicht unproblematischer Abstimmung der Einzelsensorelemente zueinander, komplexer

- 5 Gehäusung sowie große Abmessungen. Diese Nachteile und die Implementierung mehrerer Einzelsensorelemente, die jeweils eine zugewiesene Drehrate in einer bestimmten Raumrichtung erfassen, soll mit der vorliegenden Erfindung gerade vermieden werden.
- 0 Die WO 92/21000 offenbart einen mikromechanischen Coriolis-Drehratensensor mit einer um eine Z-Achse drehbar aufgehängten Stützstruktur, an der wiederum vier seismische Massen mittels flexibler Balken um 90° um die Z-Achse herum versetzt angeordnet sind. Der Sensor kann Drehschwingungen um alle drei Raumachsen erfassen. Drehungen um die X- und Y-Achse werden durch einen Versatz der
- 5 seismischen Achsen selbst, Drehungen um die Z-Achse durch eine von den seismischen Massen auf die Stützstruktur übertragene Drehung desselben erfasst.

Ausgehend von dem zuvor beschriebenen Stand der Technik liegt der vorliegenden Erfindung die **Aufgabe** zugrunde, einen mikromechanischen Coriolis-Drehratensensor und ein Verfahren zu schaffen, der bzw. das zur Erfassung, insbesondere zeitgleichen Erfassung, von beliebig relativ zum Sensor im dreidimensionalen Raum orientierten Drehraten oder Drehratenkomponenten geeignet ist, wobei die hierzu notwendigen Funktionseinheiten auf Sensorebene in den Sensor integriert sind, der gegenüber

0 Sensorsystemen nach dem Stand der Technik benötigte Bauraum möglichst gering ist, die Anzahl der zur Erfassung von Drehraten in allen drei Raumrichtungen notwendigen Funktionseinheiten wie Anregungsmassen, Antriebseinheiten, Detektionseinheiten, Kopplungssystemen, verringert ist, und die Entkoppelung zwischen Antriebsmoden und Detektionsmoden verbessert ist. Der Sensor soll insbesondere mit möglichst wenigen Ätzschritten vorzugsweise aus einem Substrat hergestellt werden können.

0 Die **Lösung** der oben beschriebenen Aufgabe besteht in einem mikromechanischen Coriolis-Drehratensensor zur Erfassung von Drehraten mit Komponenten um Messachsen in drei zueinander orthogonalen Raumrichtungen (X-, Y- und Z-Achse), aufweisend: ein Substrat, eine Detektionsmasse und wenigstens zwei Antriebsmassen,

5 wobei die Antriebsmassen jeweils relativ zum Substrat zu einer Primärbewegung antreibbar sind, wobei die Richtung der Primärbewegung einer der wenigstens zwei Antriebsmassen senkrecht zur Richtung der Primärbewegung einer anderen der wenigstens zwei Antriebsmassen ist, die Detektionsmasse mit den Antriebsmassen gekoppelt ist, derart, dass die Detektionsmasse durch eine Sekundärbewegung der

0 Antriebsmassen, bewirkt durch Corioliskraft bei Wirkung einer zu erfassenden äußeren Drehrate, zu einer Erfassungsbewegung anregbar ist, und die Detektionsmasse relativ

- 5 zum Substrat als Erfassungsbewegung Drehschwingungen um Drehachsen in den drei zueinander orthogonalen Raumrichtungen (Raumachsen X,Y,Z) ausführen kann.

Die obige Aufgabe wird des Weiteren durch eine inertielle Messeinheit nach Anspruch 14 sowie durch ein Verfahren nach Anspruch 15 gelöst.

- 0 Der erfindungsgemäße Coriolis-Drehratensensor wird bevorzugt mit einem oberflächenmikromechanischen Prozess oder einem ähnlichen Verfahren hergestellt, wie er in P. Merz, W. Reinert, K. Reimer, B. Wagner, 'PSM-X2: Polysilicon surface micromachining process platform for vacuum-packaged sensors, Konferenzband
5 Mikrosystemtechnik-Kongress 2005, D/Freiburg, VDE Verlag, Seiten 467-470, beschrieben ist, insbesondere aus einem vorzugsweise einteiligen Substrat.

- Bei der Beschreibung des erfindungsgemäßen Coriolis-Drehratensensors wird zum Zwecke einer besseren Verständlichkeit das in der Figur 1 dargestellte Karthesische
0 Koordinatensystem mit folgenden in die Figur 1 eingezeichneten Begriffsdefinitionen verwendet:

- | | |
|------------------------------------|--|
| X, Y, Z: | Raumachsen |
| V_x, V_y, V_z : | Geschwindigkeitsvektoren in positiver Richtung der X-, Y- bzw. Z-Achse |
| 5 $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$: | äußere Drehrate um die X-, Y- bzw. Z-Achse |
| $\theta_x, \theta_y, \theta_z$: | Drehwinkel um die X-, Y- bzw. Z-Achse |

- Der Ursprung des Koordinatensystems liegt im Drehpunkt der relativ zum Substrat bewegten Einheiten des Sensors, beispielsweise von Detektionsmasse oder
0 Antriebsmasse. In der vorliegenden Beschreibung der Erfindung ist das Koordinatensystem beispielhaft so ausgerichtet, seine X- und Y-Achse parallel zur und in der Substratebene angeordnet sind, während sich die Z-Achse orthogonal zur Substratebene erstreckt. Eine andere Orientierung des Koordinatensystems zum Sensor sowie den Drehraten etc. ist selbstverständlich möglich, weshalb sich aus der gewählten
5 Orientierung keine Beschränkungen für die Erfindung ergeben.

- Mit dem erfindungsgemäßen Coriolis-Drehratensensor können in vorteilhafter Weise äußere Drehraten unabhängig von ihrer Orientierung relativ zum Sensor in allen Richtungen des Raums erfasst werden. Dies ist allein mit dem erfindungsgemäßen
0 Einzelsensorelement möglich, ohne dass zusätzliche Sensoreinheiten zur Erfassung von Drehraten in bestimmten Raumrichtungen notwendig wären. Insbesondere sind – anders als bei den zum Stand der Technik beschriebenen Sensoreinheiten, bei denen ein Drei-

5 Achs-Sensor durch Implementierung von Ein- und Zwei-Achs-Sensoren auf Chip- oder
Leiterplattebene als Sensorcluster gebildet wird – die Funktionseinheiten des Sensors,
wie Antriebs- und Detektionsmassen sowie ggf. Kopplungselemente zwischen diesen
und zum Substrat, auf Sensorebene in den Sensor integriert. Der Sensor ist als
Einzelsensorelement ausgebildet, was bedeutet, dass alle für die Erfassung von beliebig
0 in den drei Raumrichtungen orientierten Drehraten notwendigen Detektions- und
Antriebsmassen an einem, vorzugsweise einteiligen, Substrat angeordnet sind. Der
Sensor nach der Erfindung ist ein echter Drei-Achs-Coriolis-Drehratensensor, der sich
gegenüber Sensorclustern nach dem Stand der Technik durch einen geringen Bauraum,
günstige Herstellungskosten sowie einfache Herstellung auszeichnet.

5 Nach Anspruch 1 weist der erfindungsgemäße Drehratensensor ein Substrat, eine
Detektionsmasse und wenigstens zwei Antriebsmassen auf. Vorzugsweise weist der
Sensor eine einzige Detektionsmasse auf, mit der jede beliebig orientierte äußere
Drehrate erfassbar ist. Das Substrat des Drehratensensors ist bei dessen
0 bestimmungsgemäßen Einsatz mittelbar oder unmittelbar mit dem zu vermessenden
System verbunden und bildet ein Bezugssystem aus, zu dem die zu erfassenden
äußeren Drehraten bestimmt werden (zusammenfallend mit dem zur Beschreibung
verwendeten Koordinatensystem).

5 Die Antriebsmassen sind relativ zum Substrat zu einer Primärbewegung antreibbar und
führen diese wenigstens während eines Messvorganges oder permanent aus. Die
Primärbewegung ist vorzugsweise eine translatorische Schwingung, kann jedoch
ebenfalls eine kreisförmige Bewegung sein. Die Detektionsmasse ist mit den
Antriebsmassen gekoppelt, vorzugsweise mechanisch gekoppelt, z.B. mittels
0 mechanischer Koppelemente, insbesondere mittels Federelementen. Die Kopplung
dient grundsätzlich dazu, Bewegungen der Antriebsmassen relativ zum Substrat und
Bezugssystem oder Komponenten hiervon in gewünschter Weise auf die
Detektionsmasse zu übertragen. Durch die Primärbewegung der Antriebsmassen relativ
zum Substrat werden bei Einwirken einer äußeren Drehrate entsprechend deren
5 Ausrichtung zum Substrat und Bezugskoordinatensystem auf die Antriebsmassen
wirkende Corioliskräfte erzeugt. Diese Corioliskräfte bewirken eine Sekundärbewegung
der Antriebsmassen, die durch die Kopplung, also mittels der Federelemente, zwischen
Detektionsmasse und den Antriebsmassen auf die Detektionsmasse übertragen wird.
Durch die Übertragung der Sekundärbewegung der Antriebsmassen auf die
0 Detektionsmasse wird diese zum Ausführen einer Erfassungsbewegung angeregt, deren
Betrag und Richtung von Größe und Orientierung der äußeren Drehrate abhängig sind.
Der erfindungsgemäße Sensor ist so ausgebildet, dass die Primärbewegungen der

- 5 Antriebsmassen bei einer Drehung des gesamten Sensors um jede der drei Raumachsen Corioliskräfte hervorrufen, die wiederum Sekundär- sowie Erfassungsbewegungen erzeugen.

Der erfindungsgemäße Drehratensensor ist derart ausgebildet, dass die Richtung der
0 Primärbewegung einer der wenigstens zwei Antriebsmassen (auf im Folgenden als erste Antriebsmasse bezeichnet) senkrecht zur Richtung der Primärbewegung einer anderen der wenigstens zwei Antriebsmassen (im Folgenden als zweite Antriebsmasse bezeichnet) ist. Die erste Antriebsmasse kann beispielsweise eine Primärbewegung in X-Richtung ausführen, in welchem Fall die zweite Antriebsmasse eine Primärbewegung
5 senkrechte hierzu in Y-Richtung ausführt. Die Primärbewegungen beider Antriebsmassen liegen orthogonal zueinander in der XY-Ebene. Bei Vorliegen einer äußeren Drehrate wirken nun durch den Coriolis-Effekt bedingt Drehmomente auf die jeweiligen Antriebsmassen ein. So führt im obigen Fall eine äußere Drehrate um die X-Achse zu auf die zweite Antriebsmasse einwirkenden Corioliskräften, die
0 Sekundärbewegungen der zweiten Antriebsmassen bewirken. Eine äußere Drehrate um die X-Achse bewirkt hingegen keine Sekundärbewegung der ersten Antriebsmasse, da die Richtung deren Primärbewegung zur Richtung der äußeren Drehrate parallel ist und somit die Corioliskraft gemäß der Formel

5
$$F_{\text{cor}} = 2m(v \times \Omega)$$

F_{cor}	Corioliskraft
m	Masse der Antriebsmasse
Ω	äußere Drehrate
0 V	Geschwindigkeit der Antriebsmasse

als Kreuzprodukt der äußeren Drehrate mit der Primärgeschwindigkeit der ersten Antriebsmasse einen Wert von Null besitzt.

- 5 In ähnlicher Weise führt eine äußere Drehrate um die Y-Achse zu auf die erste Antriebsmasse wirkenden Corioliskräften, die wiederum Sekundärbewegungen der ersten Antriebsmasse bewirken. Eine äußere Drehrate um die Y-Achse bewirkt aufgrund der zuvor dargelegten Zusammenhänge (Kreuzprodukt) keine auf die zweite Antriebsmassen wirkenden Corioliskräfte, weshalb diese nicht zu Sekundärbewegungen
0 angeregt wird.

- 5 Eine äußere Drehrate in Z-Richtung schließlich ruft Corioliskräfte sowohl auf die erste als auch auf die zweite Antriebsmasse hervor. Sind die Primärbewegungen der Antriebsmassen nach Art und Richtung entsprechend aufeinander abgestimmt, summieren sich die Corioliskräfte zu einem Drehmoment, welches je nach Drehrichtung im Uhrzeigersinn oder entgegen dem Uhrzeigersinn um die Z-Achse wirkt. Infolgedessen
0 werden die Antriebsmassen zu Sekundärbewegungen im Uhrzeigersinn oder entgegen dem Uhrzeigersinn um die Z-Achse angeregt.

Da die Antriebsmassen erfindungsgemäß jeweils eine Primärbewegung ausführen, die zur Primärbewegung einer anderen Antriebsmasse orthogonal ausgerichtet ist, bewirkt
5 eine äußere Drehrate unabhängig von ihrer Orientierung im Raum und Ausrichtung zum Sensor eine entsprechende Reaktion in Form von einer Sekundärbewegung der ersten und/oder der zweiten Antriebsmasse(n). Die Sekundärbewegung(en) bewirken aufgrund der Kopplung zwischen Detektionsmasse und Antriebsmassen Erfassungsbewegungen der Detektionsmasse, die diese relativ zum Substrat ausführt. Erfindungsgemäß ist die
0 Detektionsmasse derart ausgebildet, dass sie als jeweilige Erfassungsbewegung eine Drehschwingung um jede der drei Achsen des Bezugskoordinatensystems (in den drei zueinander orthogonalen Raumrichtungen X, Y und Z) ausführen kann. Mit dem erfindungsgemäßen Sensordesign sind äußere Drehungen des Sensors oder des mit dem Sensor verbundenen Bezugssystems um alle drei Raumachsen erfassbar.

5 Nach einer besonders vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung kann der Coriolis-Drehratensensor in jeder Variante wenigstens vier Antriebsmassen aufweisen. Die wenigstens vier Antriebsmassen werden im Folgenden als erste, zweite, dritte und vierte Antriebsmasse bezeichnet. Sie sind derart zueinander angeordnet und miteinander
0 gekoppelt, dass jeweils zwei Antriebsmassen gegenphasige Primärbewegungen mit entgegengesetzter Bewegungsrichtung ausführen. Die verbleibenden beiden Antriebsmassen führen hierzu orthogonale Primärbewegungen ebenfalls gegenphasig mit entgegengesetzter Bewegungsrichtung aus. Beispielsweise schwingt die erste Antriebsmasse in positiver X-Richtung, während die dritte Antriebsmasse mit gleicher
5 Frequenz gegenphasig in negativer X-Richtung schwingt, wobei die zweite Antriebsmasse in positiver Y-Richtung und die vierte Antriebsmasse mit gleicher Frequenz gegenphasig in negative Y-Richtung schwingt. Auf diese Weise werden die Primärbewegungen der Antriebsmassen nicht oder nur mit sich gegenseitig überlagernden und auslöschenden Komponenten auf die Detektionsmasse übertragen,
0 wodurch eine vollständige mechanische Entkopplung der Erfassungsmoden von den Primärbewegungen erzielt wird, was bedeutet, dass über die Kopplung zwischen den

- 5 Antriebsmassen und der Detektionsmasse im Wesentlichen nur eine Übertragung von Sekundärbewegungen bewirkt wird.

Nach einer weiteren Ausführungsform der Erfindung ist vorgesehen, dass die Detektionsmasse an dem Substrat angeordnet ist. Die Anordnung kann mittelbar oder
0 unmittelbar erfolgen. Insbesondere kann die Detektionsmasse durch einen Verankerungspunkt an dem Substrat oder an einer auf das Substrat aufgetragenen Schicht angeordnet sein. Bei mittelbar oder unmittelbar am Substrat angeordneter Detektionsmasse sind die Antriebsmassen nicht unmittelbar mit dem Substrat verbunden, sondern lediglich mittelbar über die Detektionsmasse. Alternativ ist möglich,
5 dass die Antriebsmassen jeweils mittelbar oder unmittelbar an dem Substrat angeordnet sind und die Anordnung der Detektionsmasse am Substrat mittelbar über die Antriebsmassen erfolgt.

Es ist vorteilhaft, wenn die Detektionsmasse relativ zu dem Substrat translatorisch
0 unverschiebbar angeordnet oder angelenkt ist. In diesem Fall verbleiben für Bewegungen der Detektionsmasse drei Freiheitsgrade, nämlich in Form von Rotationsschwingungen um die drei Achsen des Koordinatensystems. Eine solche Anordnung der Detektionsmasse an dem Substrat kann mittels unterschiedlichster Lagerstrukturen zwischen Detektionsmasse und Substrat erzielt werden, z.B. mittels
5 einer oder mehrerer, vorzugsweise symmetrisch zum Drehpunkt der Detektionsmasse angeordneten Anlenkungsstruktur oder -strukturen. Besonders bevorzugt ist jedoch eine Anordnung der Detektionsmasse mittels einer in ihrem Massezentrum inneren Aufhängung am Substrat oder einer auf das Substrat aufgetragenen Schicht in Form eines zentralen Ankers. Die innere Aufhängung umfasst vorzugsweise Federstrukturen,
0 die die Detektionsmasse mittelbar z.B. über ein zentral angeordnetes Stift- oder Ankerelement o.ä. oder unmittelbar zentral mit dem Substrat verbinden. Die Federstrukturen stellen dabei vorzugsweise einzeln oder in Kombination translatorischen Relativverschiebungen der Detektionsmasse zum Substrat Widerstand entgegen und schränken diese weitgehend vollständig ein. Währenddessen werden
5 Rotationsbewegungen um die drei Achsen des Bezugskordinatensystems im Wesentlichen ohne Einschränkung ermöglicht.

Eine Alternative zur Verwendung einer zentralen Aufhängung mit Federelementen ist eine zentrale kardanische Aufhängung der Detektionsmasse am Substrat. Bei einer
0 solchen kardanischen Aufhängung ist ein Rahmenelement oder ähnliches mittels erster Federelemente, die eine Rotation des Rahmenelements um eine erste Achse ermöglichen, am zentralen Anker oder Aufhängungspunkt angeordnet. Am

5 Rahmenelement wiederum sind zweite Federelemente angeordnet orthogonal zu den ersten Federelementen angeordnet, die eine Rotation orthogonal zur Drehrichtung des Rahmenelements ermöglichen. An den zweiten Federelementen wiederum ist die Detektionsmasse aufgehängt. Gegebenenfalls, das heißt wenn mittels der ersten und zweiten Federelemente die Detektionsmasse nur mit zwei Freiheitsgraden aufgehängt
0 ist, kann ein weiterer Rahmen und ein weiteres Federelement für eine Rotation um eine dritte Achse vorgesehen sein, so dass die Detektionsmasse über eine solche kardanische Aufhängung in drei Raumrichtungen drehbeweglich gelagert ist.

Bei einer besonders vorteilhaften Ausführungsform sind die Antriebsmassen um die
5 Detektionsmasse herum angeordnet, das heißt ausgehend vom Nullpunkt des Bezugskoordinatensystems radial außerhalb der Detektionseinheit. Vorzugsweise sind die Detektionsmasse und die Antriebsmassen in einer Ebene angeordnet (im vorliegenden Koordinatensystem in der X-Y-Ebene). Es wird des Weiteren vorgeschlagen, dass jeweils zwei Antriebsmassen einander gegenüberliegend mit
0 zwischenliegender Detektionsmasse angeordnet sein können, insbesondere im Falle von wenigstens vier Antriebsmassen. Hierdurch wird in besonders einfacher Weise eine Entkopplung der Primärbewegungen von den Sekundärbewegungen der Antriebsmassen und den Erfassungsbewegungen der Detektionsmasse erreicht. Primärbewegungen der Antriebsmassen werden vorzugsweise nicht oder nur derart auf
5 die Detektionsmasse übertragen, dass sich die aufgrund von Primärbewegungen gegenüberliegender Antriebsmassen in die Detektionsmasse eingeleiteten Kraftkomponenten gegenseitig vorzugsweise vollständig aufheben. Aufgrund der einander gegenüberliegenden Anordnung je zweier Antriebsmassen löschen sich deren Sekundärbewegungen nicht gegenseitig aus, sondern summieren sich. Die sich so
0 gegenseitig verstärkenden Sekundärbewegungen regen die Detektionseinheit zur Erfassungsbewegung an, die dann über geeignete Messmittel oder Detektionsmechanismen ausgewertet wird.

Die Kopplung zwischen Antriebsmassen und Detektionsmasse ist vorzugsweise so
5 ausgebildet, dass zwar die Sekundärbewegungen, nicht jedoch die Primärbewegungen der Antriebsmassen auf die die Detektionsmasse übertragen werden und diese zum Ausführen einer Erfassungsbewegung anregen können. Anders ausgedrückt wird durch die spezifische Ausbildung der mechanischen Koppelstruktur eine mechanische Entkopplung der Erfassungsbewegungen (Sense Moden) von der oder den jeweils
0 vorliegenden Primärbewegungen (Drive Moden) erzielt. Durch die Kopplung werden neben der definierten Übertragung von Bewegungen der Antriebsmassen auf die Detektionsmasse auch die jeweiligen Freiheitsgrade jeder Antriebsmasse relativ zur

5 Detektionsmasse definiert und eingestellt. Mit Vorteil erfolgt die Kopplung derart, dass
wenigstens eine Antriebsmasse ihre Primärbewegung in radialer Richtung ungehindert
ausführen kann. Hinsichtlich der Sekundärbewegung soll die Kopplung nach einem
weiteren Vorschlag der Erfindung derart ausgebildet sein, dass die Antriebsmasse relativ
zur Detektionsachse zwei rotatorische Sekundärbewegungen in zueinander
0 orthogonalen Raumrichtungen ausführen kann. Mit besonderem Vorteil wird durch die
Kopplung eine rotatorische Sekundärbewegung der Antriebsmasse um eine zur
Primärbewegung parallele Raumrichtung im Wesentlichen verhindert.

Jede Antriebsmasse ist gemäß einem weiteren Vorschlag der Erfindung jeweils mittels
5 wenigstens eines Federelementes, insbesondere mittels zweier Federelemente, mit der
Detektionsmasse gekoppelt. Mit besonderem Vorteil ist wenigstens eine Antriebsmasse,
vorzugsweise jede Antriebsmasse, jeweils mittels eines oder mehrerer erster
Federelemente, die vorzugsweise mit dem zur Detektionsmasse zugewandten
Innenbereich der Antriebsmasse verbunden und an diesem angeordnet sind/und mittels
0 eines oder mehrerer zweiter Federelemente, die an dem der Detektionsmasse
abgewandten Außenbereich der Antriebsmasse angeordnet sind, mit der
Detektionsmasse gekoppelt. Aufgrund einer derartigen Federgeometrie sind im Idealfall
nur drei Bewegungs-Moden der Antriebsmassen relativ zur Detektionsmasse möglich,
nämlich die Primärbewegung als angeregte Bewegung vorzugsweise in Form einer
5 translatorischen Schwingung in radialer Richtung, jeweils gegenphasig zur
gegenüberliegenden Antriebsmasse, für Antriebsmassen mit Primärbewegung in
Richtung der X-Achse Sekundärbewegungen in Form von Torsionsbewegungen um die
Y- sowie Z-Achse sowie für Antriebsmassen mit Primärbewegung in Richtung der
Y-Achse Sekundärbewegungen in Form von Torsionsbewegungen um die X- sowie
0 Z-Achse. Alle weiteren Bewegungsmöglichkeiten werden durch die obige
Federgeometrie in vorteilhafter Weise im Wesentlichen vollständig unterdrückt bzw.
möglichst stark eingeschränkt. Dieses gilt insbesondere für zwei parasitäre Hauptmoden,
auf die hier nochmals speziell eingegangen werden wird.

5 Zum einen soll der Resonanzpeak einer phasengleichen Schwingung zweier
gegenüberliegender Antriebsmassen aus der XY-Ebene heraus (Butterfly Mode)
möglichst eliminiert werden. Dieses kann beispielsweise dadurch geschehen, dass die
Resonanzfrequenz dieser parasitären Schwingung möglichst weit oberhalb der
Resonanzfrequenz der Primärbewegung der Antriebsmassen liegt. Im vorliegenden Fall
0 wird das dadurch erreicht, indem die Antriebsmasse mit Federelementen am
Innenbereich einerseits und mit Federelementen am Außenbereich andererseits an der

- 5 Detektionsmasse angeordnet ist. Hierdurch kommt es zu einer Resonanzfrequenzbereichsverschiebung aus dem Bereich der Primärbewegungen heraus.

Zum anderen sollen Sekundärbewegungen in Form von Rotationsschwingungen um die Achse in Bewegungsrichtung der Primärbewegung minimiert oder im Wesentlichen
0 vollständig verhindert werden. Dieses wird vorzugsweise durch die Verwendung von zwei möglichst von der entsprechenden Bewegungsachse entfernt liegenden Federelementen erzielt, die einer derartigen Verdrehung der Antriebsmassen um die jeweiligen Koordinatenachsen herum ausreichenden Widerstand entgegensetzen.

- 5 Bei einer besonders vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung weist wenigstens eine, vorzugsweise jede Antriebsmasse einen Durchlass auf, der sich in radialer Richtung erstreckt und wenigstens einseitig, vorzugsweise jedoch beidseitig offen ist. In dem Durchlass ist eine im Wesentlichen biegesteife Struktur, vorzugsweise in Form einer Balkenstruktur, angeordnet, mit der das erste, mit dem zur Detektionsmasse
0 zugewandten Innenbereich der Antriebsmasse verbundene Federelement mit dem zweiten, an dem der Detektionsmasse abgewandten Außenbereich der Antriebsmasse angeordneten Federelement verbunden ist.

- Nach einer weiteren Ausführungsform weist wenigstens eine, vorzugsweise jede
5 Antriebsmasse eine Ausnehmung zur Aufnahme wenigstens eines der Federelemente auf. Die Ausnehmung ist vorzugsweise in dem der Detektionsmasse abgewandten Außenbereich der Antriebsmasse angeordnet. Sie ist vorzugsweise mittels des Durchlasses über den der Detektionsmasse zugewandten Innenbereich der Antriebsmasse zur Detektionsmasse hin geöffnet. Das wenigstens eine, in der
0 Ausnehmung angeordnete Federelement ist über die in dem Durchlass angeordnete Balkenstruktur mit dem anderen Federelement verbunden. Das andere Federelement ist vorzugsweise in einem zwischen Antriebsmasse und Detektionsmasse vorliegenden Zwischenraum angeordnet, hierzu kann die Antriebsmasse auch eine weitere Ausnehmung aufweisen.

- 5 Der Antrieb der Antriebselemente erfolgt vorzugsweise elektrostatisch, beispielsweise über ein Anlegen von Spannungen an Fingerelektroden, piezoelektrisch oder magnetisch durch Einkoppeln eines Magnetfeldes. Der Coriolis-Drehratensensor weist nach einem weiteren Vorschlag wenigstens einen Antrieb zum Erzeugen einer Primärbewegung
0 einer Antriebsmasse auf, vorzugsweise jeweils einen Antrieb für jede Antriebsmasse. Der Antrieb bewirkt die Primärbewegung als Relativbewegung zwischen Antriebsmasse und Substrat. Mit besonderem Vorteil weist der Antrieb je Antriebsmasse eine

5 vorzugsweise an der Antriebsmasse angeordnete, kammartige Elektrode auf, die jeweils mit einer kammartigen Gegenelektrode zusammenwirkt, die an dem Substrat angeordnet ist. Eine Gegenelektrode kann mittelbar oder unmittelbar über Ankerstrukturen an dem Substrat fixiert sein. Gleiches gilt für die Elektroden, die ebenfalls mittelbar oder
0 unmittelbar an der jeweiligen Antriebsmasse fixiert sein können. Durch Anlegen einer Wechselfspannung wird zwischen den Elektroden und Gegenelektroden eine elektrostatische Kraft induziert, so dass die jeweilige Antriebsmasse relativ zum Substrat ausgelenkt wird. Wird dabei eine elektrische Wechselfspannung in der Nähe der mechanischen Resonanzfrequenz einer Antriebsmasse angelegt, kann bei niedrigem Dämpfungsfaktor (z.B. im Vakuum) auch bei relativ kleinen Spannungsamplituden eine
5 große Auslenkung im Bereich von 0,1 bis 100µm erreicht werden. Die Konstruktionselemente des elektrostatischen Antriebs wie Ankerstrukturen, Elektroden und Gegenelektroden sind vorzugsweise so ausgelegt, dass sie weder durch die anliegende elektrostatische Kraft, noch durch die bei Primär- oder Sekundärbewegungen der jeweiligen Antriebsmasse auftretenden Trägheitskräfte verzerrt werden.

0 Um die Primär- und Sekundärbewegungen der Antriebsmassen aufeinander abzustimmen und einstellen zu können, können die Antriebsmassen vorzugsweise miteinander gekoppelt sein, vorzugsweise über Kopplungsfedern. Die Kopplungsfedern sollen sicherstellen bzw. stellen sicher, dass die Antriebsmassen in der Primärbewegung
5 simultan in Antiphasse schwingen. Durch die Kopplung der Antriebsmassen miteinander werden diese quasi als gekoppelte Antriebsmasse ausgebildet, die vorzugsweise nur ein Hauptschwingungsmodus und somit nur eine Resonanzfrequenz aufweist. Durch diese Kopplungsfedern zwischen den Antriebsmassen kann erreicht werden, dass die Primärmodus und die drei Sekundärmoden die niedrigsten Resonanzfrequenzen
0 darstellen. Insbesondere sind Bewegungen, bei denen sich mindestens zwei Antriebsmassen parallel bzw. in Phase bewegen, nahezu vollständig unterbunden, die ihre Resonanzfrequenz deutlich höher liegt als die vier zuvor genannten Arbeitsfrequenzen. Da derartige parallel Bewegungsmuster bei Beschleunigung in der XY-Ebene auftreten, zeigt der Sensor eine gute Schockrobustheit und
5 Vibrationsfestigkeit. Mit besonderem Vorteil sind die Kopplungsfedern in Form von gefalteten oder u-förmigen Federelementen ausgebildet.

An den Antriebsmassen können neben den Kopplungsfedern weitere Strukturen angebracht sein, die zum Beispiel die mechanische Stabilität des Systems
0 Antriebsmassen/Kopplungsfedern vergrößern oder beeinflussen. Beispielsweise kann an den Kopplungsfedern, im Falle von u-förmigen Kopplungsfedern insbesondere an deren Umlenkpunkt, und/oder mittelbar anderweitig an den Antriebsmassen eine umlaufende

5 Ringstruktur vorgesehen sein, die die Kopplungsfedern miteinander koppelt und deren mechanisches Verhalten synchronisiert. Eine weitere Möglichkeit zur Beeinflussung des mechanischen Verhaltens des Systems Antriebsmassen/Kopplungsfedern sind Außenfedern, die vorzugsweise über Außenanker an dem Substrat befestigt sind. Die Außenfedern können an den Antriebsmassen und/oder an den Kopplungsfedern
0 angeordnet sein und deren Bewegungsmöglichkeiten relativ zum Substrat in gezielter Weise beeinflussen.

Nach einem weiteren Vorschlag der Erfindung weist ein erfindungsgemäßer Drehratensensor wenigstens zwei erste Elektrodenpaare zur Detektion deren
5 Verkipfung um X, wenigstens zwei zweite Elektrodenpaare zur Detektion deren Verkipfung um Y, sowie wenigstens zwei dritte Elektrodenpaare zur Detektion deren Verkipfung um Z auf. Jedes Elektrodenpaar umfasst jeweils eine am Substrat angeordnete Gegenelektrode sowie eine an der Detektionsmasse angeordnete Elektrode. Jeweils ein Elektrodenpaar ist auf einer Seite der Detektionsmasse
0 angeordnet, das verbleibende Elektrodenpaar auf der gegenüberliegenden Seite (der Detektionsmasse sowie des Nullpunkts des Bezugskordinatensystems). Um die Messauflösung zu verbessern, braucht nach einem weiteren Vorschlag nicht die Kapazitätsänderung an einer Elektrode/Gegenelektrode gemessen zu werden, sondern kann die differentielle Kapazität von zwei einander zugeordneten Elektrodenpaaren
5 erfasst werden, so dass der absolute Kapazitätswert unerheblich ist. Hierzu ist des Weiteren vorgesehen, dass die Elektrodenpaare so miteinander verschaltet sind, dass die differentiellen Kapazitäten erfasst werden können. In der Ruhelage der Detektionsmasse ist die Differenz der Kapazitätswerte einander zugeordneter, das heißt einander gegenüber liegender Elektrodenpaare (jeweils umfassend eine Elektrode und
0 eine Gegenelektrode) gleich Null. Bei Vorliegen einer Auslenkung der Detektionsmasse aufgrund einer Erfassungsbewegung vergrößert sich die Kapazität des einen Elektrodenpaars, während sich die des komplementären Elektrodenpaars in gleicher Weise verringert, so dass die Kapazitätsdifferenz auf den doppelten Wert der jeweiligen Kapazitätsänderung anwächst.

5 Um eine Erfassung der Erfassungsbewegungen in allen drei Raumrichtungen gewährleisten zu können, kann bei jeder Ausführungsform des Sensors nach einem weiteren Vorschlag der Erfindung wenigstens ein Elektrodenpaar in Form von Fingerelektroden ausgebildet sein, die mit entsprechenden Fingergegenelektroden am
0 Substrat zusammenwirken. Des Weiteren kann wenigstens ein Elektrodenpaar in Form von zwischen der Detektionsmasse und dem Substrat und/oder zwischen der Detektionsmasse und einem auf der dem Substrat abgewandten Seite ausgebildeten

- 5 Gegensubstrat angeordneten Flächenelektroden mit entsprechenden
Flächengegenelektroden am Substrat bzw. Gegensubstrat ausgebildet sein.
Vorzugsweise sind beiderseits der Detektionsmasse einander gegenüber liegende
Fingerelektroden angeordnet.
- 0 Die vorliegende Erfindung betrifft des Weiteren eine Inertiale Messeinheit (IMU, Inertial
Measurement Unit), die einen Drehratensensor gemäß der vorliegenden Erfindung
aufweist. Mit besonderem Vorteil kann die Beschleunigungsmesseinheit neben dem
erfindungsgemäßen 3D-Drehratensensor Beschleunigungssensoren zur Erfassung
linearer Beschleunigungen in jeweils eine, zwei oder drei Raumrichtungen umfassen. Die
5 Beschleunigungsmesseinheit kann als Chip mit herkömmlicher Aufbau- und
Verbindungstechnologie zusammen mit entsprechender ASIC in einem Plastik-, Metall-
oder Keramikgehäuse aufgebaut werden, beispielsweise in Form eines Hybridaufbaus,
mittels Wirebonding, Flip-Chip-Technologie, etc. Denkbar ist auch eine monolithische
Integration der MEMS-Technologie und der Asic-Technologie.
- 0 Schließlich betrifft die vorliegende Erfindung ein Verfahren zur Erfassung von Drehraten
in drei zueinander orthogonalen Raumrichtungen, vorzugsweise unter Verwendung eines
Sensors gemäß einer der hier beschriebenen Ausführungsformen oder Ansprüchen,
wobei wenigstens vier Antriebsmassen vorzugsweise in Form einer ersten, einer
5 zweiten, einer dritten und einer vierten Antriebsmasse jeweils zu einer translatorischen
Schwingung als Primärbewegung angeregt werden, wobei wenigstens zwei
Antriebsmassen die Primärbewegung senkrecht zur Primärbewegung wenigstens zweier
anderer Antriebsmassen ausführen, wobei bei Wirkung einer zu erfassenden äußeren
Drehrate eine durch Corioliskraft bewirkte Sekundärbewegung wenigstens einer
0 Antriebsmasse auf die Detektionsmasse übertragen wird, und wobei die
Detektionsmasse relativ zum Substrat Drehschwingungen in drei zueinander orthogonale
Raumrichtungen (X,Y,Z) ausführen kann. Vorzugsweise schwingen dabei einander
gegenüberliegend mit zwischenliegender Detektionsmasse angeordnete Antriebsmassen
simultan in Antiphase. Des Weiteren liegen die Resonanzfrequenzen der Primär- und
5 Sekundärbewegungen von Antriebsmasse sowie Detektionsmasse mit besonderem
Vorteil in einem Bereich von 1,0 kHz bis 50,0 kHz, vorzugsweise in einem Bereich von
5 kHz bis 30,0 kHz, bevorzugter in einem Bereich von 10,0 kHz bis 12,0 kHz sowie
besonders bevorzugt bei 11,0 kHz. Die Resonanzfrequenzen weiterer Bewegungsmoden
können bei allen Ausführungsformen in einem höheren Frequenzbereich liegen, so dass
0 störende Einkopplungen weitgehend vollständig vermieden werden können.

5 Weitere Vorteile und Merkmale der vorliegenden Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden, nicht beschränkenden Beschreibung beispielhafter Ausführungsformen anhand der Figuren. Dabei zeigt:

- 0 **Figur 1** eine schematische Darstellung des zur Beschreibung von Anordnungen und Orientierungen relativ zum Sensor verwendeten Bezugskoordinatensystems,
- Figur 2** eine schematische Darstellung einer Aufsicht auf einen Coriolis-Drehratensensor in Richtung der negativen Z-Achse auf die X-Y-Ebene,
- 5 **Figur 3** eine der Figur 2 entsprechende Ansicht bei Einwirken einer äußeren Drehrate um die X-Achse,
- Figur 4** eine der Figur 2 entsprechende Ansicht bei Einwirken einer äußeren Drehrate um die Y-Achse,
- 0 **Figur 5** eine der Figur 2 entsprechende Ansicht bei Einwirken einer äußeren Drehrate um die Z-Achse,
- 5 **Figur 6** die Antriebseinheit des Sensors nach den Fig. 2 bis 5 in einem vergrößerten Ausschnitt,
- Figur 7** eine Antriebsmasse des Sensors in einer anderen Ausführungsform und in einer Aufsicht auf die X-Y-Ebene,
- 0 **Figur 8** eine schematische Darstellung der Anordnung von Detektionseinheiten,
- Figur 9** eine andere Ausführungsform des Sensors in einer Aufsicht auf die X-Y-Ebene in Richtung der negativen Z-Achse,
- 5 **Figur 10** einen vergrößerten Ausschnitt aus dem Eckbereich des Sensors der Figur 9 und
- 0 **Figur 11** eine schematische Darstellung einer Kombination eines 3D-Coriolis-Drehratensensors mit einem 3D-Beschleunigungssensor auf Chipebene als Inertial Measurement Unit (IMU).

- 5 In dem in der **Figur 1** dargestellten orthogonalen Koordinatensystem, das bei der vorstehenden allgemeinen Beschreibung der Erfindung sowie der nachfolgenden Beschreibung bevorzugter Ausführungsformen als Bezugssystem zur eindeutigen Bezeichnung von Anordnungen und Orientierungen relativ zum Sensor verwendet wird, sind neben den Bezeichnungen X, Y sowie Z für die drei Raumachsen die
- 0 Geschwindigkeitsvektoren (V_i), die äußeren Drehraten (Ω_i), den Drehwinkel (θ_i) um die jeweilige Achse sowie die positive Drehrichtung eingezeichnet. Das Koordinatensystem ist in den meisten übrigen Figuren zum Zwecke einer besseren Übersichtlichkeit neben den jeweiligen Darstellungen des Sensors eingezeichnet. Es ist jedoch relativ zu diesem derart angeordnet, dass sein Ursprung mit dem zentralen Ankerpunkt 1 der Sensoren
- 5 zusammenfällt, die X-Y-Ebene sich parallel zum Substrat und die Z-Achse sich orthogonal dazu erstreckt.

- In der **Figur 2** ist ein Ausführungsbeispiel des Coriolis-Drehratensensors dargestellt. Die Figur zeigt eine Aufsicht auf die zum Substrat parallele X-Y-Ebene in negativer
- 0 Z-Richtung. Der Sensor der Fig. 2 ist in den Figuren 3, 4 und 5 in gleicher Weise dargestellt, wobei ihn die letzteren Figuren bei Vorliegen einer äußeren Drehrate um die X-Achse, die Y-Achse bzw. die Z-Achse zeigen. Gleiche Elemente des Sensors sind in den Figuren daher mit gleichen Bezugszeichen versehen.

- 5 Der Sensor des bevorzugten Ausführungsbeispiels weist einen zentralen Anker 1 auf, der eine Detektionsmasse 3 über radial angeordnete Federelemente 2 mit dem parallel zur Ebene der Detektionsmasse 3 angeordneten Substrat 7 verbindet. Die Federelemente 2 zwischen zentralem Anker 1 und Detektionsmasse 3 sind derart ausgebildet, dass Letztere im Wesentlichen drei Freiheitsgrade für Bewegungen besitzt.
- 0 Sie ist in der Lage, Drehbewegungen um die X-Achse, die Y-Achse sowie die Z-Achse auszuführen. Translationsbewegungen der Detektionsmasse 3 werden durch die Federelemente 2 im Wesentlichen vollständig unterbunden.

- Am Außenrand der Detektionsmasse 3 sind Federelemente 5 in radialer Richtung
- 5 angeordnet. Über diese ist die Detektionsmasse 3 mit im dargestellten Ausführungsbeispiel vier Antriebsmassen 4a,4b,4c,4d gekoppelt. Die Antriebsmassen 4a,4b,4c,4d sind radial um die Detektionsmasse 3 herum angeordnet.

- Die Antriebsmassen 4a,4b,4c,4d sind über Kopplungsfedern 6 miteinander gekoppelt,
- 0 wobei zwischen zwei Antriebsmassen 4a,4b,4c,4d jeweils eine Kopplungsfeder 6 angeordnet ist. Die Kopplungsfedern 6 dienen der mechanischen Kopplung der Antriebsmassen 4a,4b,4c,4d untereinander, so dass bei einer geeigneten geometrischen

- 5 Ausführung die Antriebsmassen 4a,4b,4c,4d als eine mechanische Einheit mit definierten Bewegungsmoden und Eigenfrequenzen angesehen werden können.

Die Antriebsmassen 4a,4b,4c,4d werden über in der Figur 6 vergrößert beispielhaft anhand der Antriebsmasse 4a dargestellte kapazitive Antriebe in Primärschwingung
0 versetzt. Die Antriebe weisen je eine Gegenelektrode 10 auf, die über Außenanker 11 fest an dem Substrat 7 angeordnet ist. Die Gegenelektrode 10 weist radial nach innen in Richtung des zentralen Ankers 1 weisende Gegenelektrodenkämme 12 auf, deren Elektrodenfinger in radialer Richtung zum Ursprung des Bezugskoordinatensystems hin ausgerichtet sind. Die Gegenelektrodenkämme 12 greifen mit jeweils einem
5 Elektrodenkamm 9 ineinander. Diese sind in radialer Richtung am Außenumfang der Antriebsmassen 4a,4b,4c,4d angeordnet. Die Abstände zwischen den Elektroden und Gegenelektroden sind derart ausgewählt, dass die Antriebsmasse ihre Primärbewegung sowie sämtliche Sekundärbewegungen ausführen kann, ohne dass es zu einem Kontakt zwischen Elektrodenkamm 9 und Gegenelektrodenkamm 12 kommt.

0 Durch Anlegen einer Wechselspannung zwischen Elektrodenkamm 9 und Gegenelektrodenkamm 12 wird eine elektrostatische Kraft induziert, aufgrund der die Antriebsmasse relativ zur Gegenelektrode 10 in Form ihrer Primärbewegung ausgelenkt wird. Wird die elektrische Wechselspannung in der Nähe der mechanischen
5 Resonanzfrequenz f_R angelegt, kann bei niedrigem Dämpfungsfaktor (beispielsweise im Vakuum) auch bei relativ kleinen Spannungsamplituden eine große Auslenkung in einem Bereich von 0,1 bis 100 μ erreicht werden. Sämtliche Konstruktionselemente, d.h. die Gegenelektrode 10, die Außenanker 11 sowie die Antriebsmassen 4a,4b,4c,4d sind dabei derart ausgelegt, dass sie weder durch die anliegenden elektrostatischen Kräfte
0 noch durch Primär- oder Sekundärbewegungen verzerrt werden.

Die Antriebe der übrigen Antriebsmassen 4b, 4c und 4d sind in identischer Weise wie der zuvor beschriebene Antrieb der Antriebsmasse 4a ausgebildet.

5 Über einen derart ausgebildeten Antrieb wird jede Antriebsmasse 4a,4b,4c,4d individuell angetrieben. Dieses erfolgt derart, dass jede Antriebsmasse 4a,4b,4c,4d eine Primärschwingung in radialer Richtung ausführt. Die simultane Bewegungsrichtung der Antriebsmassen 4a,4b,4c,4d wird dabei derart aufeinander abgestimmt, dass sie sich entweder gleichzeitig radial nach außen, also vom zentralen Anker 1 weg, oder radial
0 nach innen, also zum zentralen Anker 1 hin, bringen. Die Antriebsmasse 4a bewegt sich so radial in Richtung der positiven X-Achse (V_{xa}), während die Antriebsmasse 4c sich radial in negativer X-Richtung (V_{xc}) bewegt, die Antriebsmasse 4b sich radial in positiver

5 Y-Richtung (V_{Yb}) bewegt und die Antriebsmasse 4d sich schließlich in negativer Y-Richtung (V_{Yd}) bewegt. Die Antriebsmassen 4a,4b,4c,4d führen eine Radialschwingung in Antiphasen aus. Das Design des Sensors ist derart ausgelegt, dass dieser Antiphasen-Antriebsmode die niedrigste Resonanzfrequenz aller möglichen Bewegungsmoden aufweist und die anderer Sekundärmoden höher liegen.

0 Bei Vorliegen einer äußeren Drehrate Ω wirken aufgrund der Primärschwingungen $V_{Xa}, V_{Yb}, V_{Xc}, V_{Yd}$ der Antriebsmassen 4a,4b,4c,4d bedingt durch den Corioliseffekt auf diese Drehmomente ein. In der Figur 3 ist die Einwirkung einer äußeren Drehrate Ω_x um die X-Achse dargestellt. Die Antriebsmassen 4a,4b,4c,4d führen die zuvor
5 beschriebenen Primärbewegungen $V_{Xa}, V_{Yb}, V_{Xc}, V_{Yd}$ in Form radialer Schwingungen in Richtung der X- bzw. der Y-Achse aus. Die äußere Drehrate Ω_x führt zu einer Rotation des gesamten Systems um die X-Achse und bewirkt oszillierende Drehbewegungen θ_{Xb}, θ_{Xd} der Antriebsmassen 4b,4d um die X-Achse als deren Sekundärbewegung. Da die Antriebsmassen 4b,4d gegenphasige Primärbewegungen V_{Yb}, V_{Yd} ausüben, sind auch
0 ihre Sekundärbewegungen θ_{Xb}, θ_{Xd} in Antiphasen. Das bedeutet, dass während eines Zeitraums, in dem die Antriebsmasse 4b aus der dargestellten X-Y-Ebene in Richtung der positiven Z-Achse schwingt, die Antriebsmasse 4d aus der X-Y-Ebene in Richtung der negativen Z-Achse schwingt.

5 Die äußere Drehrate Ω_x bewirkt bezüglich der Antriebsmassen 4a,4c keine Sekundärbewegungen, da deren Richtung mit der Richtung der Primärbewegungen V_{Xa} und V_{Xc} der Antriebsmassen 4a bzw. 4c übereinstimmt und es aufgrund der Relation der Corioliskraft als Kreuzprodukt $F_c = 2m(v \times \Omega)$ nicht zum Auftreten von Corioliskräften kommt. Dieses führt dazu, dass die Antriebsmassen 4a,4c bei Wirken einer äußeren
0 Drehrate Ω_x um die X-Achse lediglich ihre Primärbewegungen V_{Xa} bzw. V_{Xc} und keine Sekundärbewegungen ausführen.

Die Sekundärbewegungen θ_{Xb}, θ_{Xd} der Antriebsmassen 4b,4d werden mittels der Federelemente 5 auf die Detektionsmasse 3 übertragen. Da diese aufgrund der
5 zentralen Aufhängung mittels der Federelemente 2 und des zentralen Ankers 1 Drehbewegungen um alle drei Raumachsen X,Y,Z ausführen kann, pendelt sie angeregt durch die Sekundärbewegungen θ_{Xb} und θ_{Xd} um die X-Achse. Diese Bewegung der Detektionsmasse 3 wird im folgenden als Erfassungsbewegung θ_{X3} bezeichnet. Die Größe der Auslenkung der Erfassungsbewegung θ_{X3} wird - wie im weiteren Verlauf
0 beschrieben wird - kapazitiv erfasst und ist in erster Näherung direkt proportional zur äußeren Drehrate Ω_x .

5 In analoger Weise wie zuvor beschrieben führt eine äußere Drehrate Ω_Y um die Y-Achse zu Sekundärbewegungen θ_{Ya} sowie θ_{Yc} der Antriebsmassen 4a bzw. 4c um die Y-Achse. Auf die Antriebsmassen 4b, 4d wird keine Corioliskraft ausgeübt, da die äußere Drehrate Ω_Y richtungsgleich zu den Primärbewegungen V_{Yb} und V_{Yd} der Antriebsmassen 4b, 4d ist. Die Sekundärbewegungen θ_{Ya} und θ_{Yc} der
0 Antriebsmassen 4a, 4c werden über die Federelemente 5 auf die Detektionsmasse 3 übertragen, woraufhin diese zur Erfassungsbewegung θ_{Y3} in Form einer Drehschwingung um die Y-Achse angeregt wird. Wiederum ist die Größe der Auslenkung der Erfassungsbewegung θ_{Y3} der Detektionsmasse 3 direkt proportional zur äußeren Drehrate Ω_Y und kann kapazitiv erfasst werden.

5 In der Figur 5 ist die Einwirkung einer äußeren Drehrate Ω_Z um die Z-Achse dargestellt. Da die äußere Drehrate Ω_Z orthogonal zu sämtlichen Primärbewegungen V_{Xa} , V_{Yb} , V_{Xc} sowie V_{Yd} ist, wird auf jede Antriebsmasse 4a, 4b, 4c, 4d eine Corioliskraft ausgeübt. Aufgrund der Kreuzrelation $F_c = (V \times \Omega)$ wird bei in jeweils positiver Achsrichtung
0 verlaufenden Primärbewegungen V_{Xa} , V_{Yb} , V_{Xc} , V_{Yd} auf die Antriebsmasse 4a eine Corioliskraft in negativer Y-Richtung, auf die Antriebsmasse 4c eine Corioliskraft in positiver Y-Richtung, auf die Antriebsmasse 4b eine Corioliskraft in negativer X-Richtung und auf die Antriebsmasse 4d eine Corioliskraft in positiver X-Richtung ausgeübt. Bei Bewegungsumkehr der Primärbewegungen V_{Xa} , V_{Yb} , V_{Xc} , V_{Yd} , d.h. bei einer Verringerung
5 des Abstands der Antriebsmassen 4a, 4b, 4c, 4d zum zentralen Anker 1, kommt es zu einer Vorzeichenumkehr der zuvor beschriebenen Corioliskräfte. Für den erstgenannten Fall sind die auf die Antriebsmassen 4a, 4b, 4c, 4d wirkenden Corioliskräfte in die Figur 5 eingezeichnet. Es ist deutlich erkennbar, dass sich die Corioliskräfte bei einer Abstandsvergrößerung zum zentralen Anker 1 insgesamt zu einem auf die
0 Antriebsmassen 4a, 4b, 4c, 4d wirkenden Drehmoment im Uhrzeigersinn summieren, wohingegen es im umgekehrten Fall zu einem Drehmoment entgegen dem Uhrzeigersinn kommt. Die Antriebsmassen 4a, 4b, 4c, 4d führen aufgrund der wirkenden Corioliskräfte Sekundärbewegungen in Form von Drehschwingungen θ_{Za} , θ_{Zb} , θ_{Zc} sowie θ_{Zd} um die Z-Achse aus. Diese Sekundärbewegungen werden durch die Wirkung der
5 Federelemente 5 auf die Detektionsmasse 3 übertragen, woraufhin diese zum Durchführen einer Erfassungsbewegung in Form einer Drehschwingung θ_{Z3} um die Z-Achse angeregt wird. Die Erfassungsbewegung θ_{Z3} der Detektionsmasse 3 ist direkt proportional zur äußeren Drehrate Ω_Z und kann wiederum kapazitiv erfasst werden.

0 Insgesamt führen äußere Drehraten Ω_X , Ω_Y sowie Ω_Z zu Erfassungsbewegungen θ_{X3} , θ_{Y3} und θ_{Z3} der Detektionsmasse 3 in Form von Rotationsschwingungen um die jeweiligen Achsen X, Y und Z. Ein besonderer Vorteil der dargestellten Ausführungsform ist, dass

5 sämtliche Erfassungsmoden von den Primärbewegungen mechanisch entkoppelt sind. So kommt es durch die gegenüberliegende Anordnung der Antriebsmassen 4a,4b,4c,4d sowie deren jeweils in Antiphasen verlaufenden Primärbewegungen - die Antriebsmasse 4a führt ihre Primärbewegung V_{xa} in Antiphasen zur Primärbewegung V_{xc} der Antriebsmasse 4c und die Antriebsmasse 4b ihre Primärbewegung V_{yb} in Antiphasen zur Primärbewegung V_{yd} der Antriebsmasse 4d aus - zu einer gegenseitigen Auslöschung der durch die jeweils gegenüberliegenden Primärbewegungen verursachten Kräfte und Momente. Auch auf die Antriebsmassen 4a,4b,4c,4d wirkende Zentripetal- sowie Zentrifugalkräfte werden durch die gegenüberliegende Anordnung gegenseitig aufgehoben. Die Resonanzfrequenz f_R des aus den

5 Antriebsmassen 4a,4b,4c,4d, den Federelementen 5 sowie den Koppelfedern 6 gebildeten Systems liegt bei der dargestellten Ausführungsform vorzugsweise bei einem Wert von 11 kHz. Bei einem Gütefaktor von 10.000 schwingen die Antriebsmassen 4a,4b,4c,4d mit einer Amplitude von etwa $10\mu\text{m}$. Die Resonanzfrequenzen f_{3x}, f_{3y}, f_{3z} der Detektionsmasse 3 bezüglich

0 Rotationsschwingungen um die drei Achsen X, Y und Z liegen in einem ähnlichen Bereich, nämlich vorzugsweise zwischen ungefähr 10,0 und 12,0 kHz. Durch diese eng beieinander liegenden Resonanzfrequenzen des Systems Antriebsmassen 4a,4b,4c,4d, Federelemente 5 sowie Koppelfedern 6 einerseits (f_R) und der Detektionsmasse 3, (f_{3x}, f_{3y}, f_{3z}) andererseits wird eine gute Übertragbarkeit der Sekundärbewegungen der

5 Antriebsmassen 4a,4b,4c,4d auf die Detektionsmasse 3 in Form deren Erfassungsbewegungen gewährleistet. Für eine maximale Übertragbarkeit wären nahezu identische Resonanzfrequenzen ideal, allerdings würden zeitabhängige Drehraten dann zu einem stark reduzierten und damit verfälschten Signal führen. Die Bandbreite wäre damit sehr gering.

0 Die die Antriebsmassen 4a,4b,4c,4d mit der Detektionsmasse 3 verbindenden Federelemente 5 sind derart ausgebildet, dass jeweils nur drei Bewegungsmoden der Antriebsmassen 4a,4b,4c,4d relativ zur Detektionsmasse 3 möglich sind. Im Falle der Antriebsmassen 4a und 4c sind dies die Primärbewegungen V_{xa} und V_{xc} in radialer

5 Richtung, die zueinander gegenphasig sind, sowie die Sekundärbewegungen in Form von Torsionsbewegungen θ_{ya} bzw. θ_{yc} um die Y-Achse sowie in Form von Torsionsbewegungen θ_{za} und θ_{zc} um die Z-Achse.

In analoger Weise können die Antriebsmassen 4b und 4d ebenfalls nur drei

0 Bewegungsmoden relativ zur Detektionsmasse 3 ausführen. Es sind dies die Primärbewegungen V_{yb} und V_{yd} in radialer Richtung zum zentralen Anker und zueinander gegenphasig sowie die Sekundärbewegungen in Form von

- 5 Torsionsbewegungen θ_{xb} und θ_{xd} um die X-Achse sowie in Form von Radialschwingungen θ_{zb} und θ_{zd} um die Z-Achse.

Alle anderen Bewegungsmoden der Antriebsmassen 4a,4b,4c,4d werden durch die Geometrie und Ausbildung der Federelemente 5 unterdrückt bzw. möglichst weitgehend
0 eingeschränkt. Besonders wichtig ist hier die Unterdrückung zweier parasitärer Hauptmoden, nämlich einer Rotation der Antriebsmassen 4a sowie 4c um die X-Achse bzw. der Antriebsmassen 4b und 4d um die Y-Achse einerseits sowie eine phasengleiche Schwingung der Antriebsmassen 4a und 4c sowie 4b und 4d aus der X-Y-Ebene heraus in Richtung der Z-Achse (auch als Butterfly-Mode bezeichnet).

5 Bei der in den Figuren 2 bis 6 dargestellten Ausführungsform des Sensors wird der erstgenannte parasitäre Hauptmode dadurch minimiert, dass zur Kopplung der Antriebsmassen 4a und 4c an die Detektionsmasse 3 zwei möglichst weit von der X-Achse entfernt angeordnete Federelemente 5, und zur Kopplung der
0 Antriebsmassen 4b und 4d an die Detektionsmasse 3 zwei möglichst weit von der Y-Achse entfernte Federelemente 5 verwendet werden.

Dem zweitgenannten parasitären Hauptmode kann durch die im Detail in der Figur 7 dargestellte Ausbildung der Federelemente 5 sowie der Antriebsmassen 4a,4b,4c,4d
5 entgegengewirkt werden. Die in der Figur 7 beispielhaft dargestellte Antriebsmasse 4a ist mittels insgesamt vier Federelementen 5 mit der Detektionsmasse 3 gekoppelt. Sie weist in ihrem Außenbereich 16 eine Ausnehmung 15 auf, die über einen radial verlaufenden Durchlass 14 zum zur Detektionsmasse 3 weisenden Innenbereich 17 hin geöffnet ist. In der Ausnehmung 15 sind jeweils möglichst weit von der durch den
0 Durchlass 14 verlaufenden X-Achse entfernt zwei Federelemente 5 angeordnet. Diese beiden Federelemente 5 sind über eine Verbindungsstruktur miteinander verbunden, wobei diese wiederum über ein den Durchlass 14 durchgreifendes Balkenelement 18 mit einer weiteren Verbindungsstruktur 19 am Innenbereich 17 der Antriebsmasse 4a verbunden ist. Diese Verbindungsstruktur 19 ist wiederum endseitig mit den beiden
5 anderen möglichst von der X-Achse entfernt angeordneten Federelementen 5 verbunden, die wiederum am Innenbereich 17 der Antriebsmasse 4a angeordnet sind.

Durch die in der Figur 7 dargestellte Vierpunktanordnung der Antriebsmasse 4a mittels der vier Federelemente 5 werden beide vorgenannte parasitäre Hauptmoden erfolgreich
0 unterdrückt. Die möglichst weit von der X-Achse entfernte Anordnung der Federelemente 5 unterdrückt dabei die angesprochene Drehschwingung um die X-Achse, während die Anordnung der Federn am Außenbereich einerseits und am

- 5 Innenbereich andererseits die phasengleiche Schwingung aus der X-Y-Ebene heraus (Butterfly-Mode) unterdrückt, der bei der dargestellten Antriebsmasse 4a in Form einer Torsionsschwingung um die Y-Achse vorliegt. Die übrigen Antriebsmassen 4b, 4c, 4d können in gleicher Weise gelagert sein.
- 0 In der Figur 8 ist eine mögliche Ausführungsform eines Detektionsmechanismus dargestellt. Zwischen der Detektionsmasse 3 und dem Substrat 7 sind insgesamt vier Elektrodenpaare 23 bis 26 angeordnet. Die Elektrodenpaare 23 sowie 25 sind im Bereich der X-Achse und die Elektrodenpaare 24 sowie 26 im Bereich der Y-Achse platziert. Die Elektrodenpaare 23 sowie 25 dienen einer Detektion einer Erfassungsbewegung der
- 5 Detektionsmasse 3 um die Y-Achse, also einer Erfassung deren Drehschwingung θ_{Y3} um die Y-Achse. Die Elektrodenpaare 24 sowie 26 hingegen dienen der Erfassung der Erfassungsbewegung der Detektionsmasse 3 um die X-Achse, also der Erfassung der Rotationsschwingung θ_{X3} um die X-Achse. Durch Verwendung zusätzlicher Funktionsschichten oder eines entsprechend ausgebildeten Gegensubstrats, die in den
- 0 beispielhaften Figuren nicht dargestellt sind, können zusätzlich oder alternativ Elektrodenpaare oberhalb der Detektionsmasse ausgebildet sein.

- Um die Erfassungsbewegungen der Detektionsmasse 3 um die Z-Achse in Form der Drehschwingungen θ_{Z3} erfassen zu können, sind am Außenumfang der
- 5 Detektionsmasse 3 vier Fingerelektroden 20 angeordnet. Die fingerförmigen Elektroden der Fingerelektroden 20 erstrecken sich tangential zum zentralen Anker 1. Die Fingerelektroden 20 stehen jeweils mit Gegenfingerelektroden 21, 22 in Eingriff, die ebenfalls tangential zum zentralen Anker 1 angeordnet sind. Obwohl in der dargestellten Ausführungsform die Verwendung von vier Fingerelektroden 20 mit einer
- 0 entsprechenden Anzahl von Gegenfingerelektroden 21, 22 dargestellt ist, kann die aus einer Fingerelektrode 20 und zwei Gegenfingerelektroden 21, 22 bestehende Anordnung in beliebiger Anzahl an der Detektionsmasse 3 angeordnet sein.

- Aufgrund der für MEMS typischen kleinen Strukturgrößen und geringen Auslenkungen
- 5 liegen dort üblicherweise sehr geringe Kapazitätsänderungen vor. Die Messauflösung wird erheblich verbessert, wenn nicht die Kapazitätsänderung an einer Elektrode gemessen wird, sondern die differentielle Kapazität von zwei in geeigneter Weise angeordneten Elektrodenpaaren, so dass der absolute Kapazitätswert unerheblich ist. Einer derartigen Erfassung der differentiellen Kapazität dient die in der Figur 8
- 0 dargestellte Anordnung des Detektionsmechanismus. In der Ruhelage der Detektionsmasse 3, d.h. wenn keine äußere Drehrate Ω_X , Ω_Y , Ω_Z auf den Sensor einwirkt, wird der Differenzkapazität ein Wert von Null zugeordnet. Im Falle einer

- 5 Auslenkung, d.h. bei Vorliegen einer Erfassungsbewegung der Detektionsmasse 3 relativ zum Substrat 7 aufgrund einer äußeren Drehrate Ω_x , Ω_y , Ω_z vergrößert bzw. verkleinert sich die differentielle Kapazität je nach Drehrichtung der Detektionsmasse 3.

- 0 In den Figuren 9 und 10 ist eine weitere Ausführungsform des erfindungsgemäßen Drehratensensors dargestellt. Der Sensor entspricht im Wesentlichen der in den Figuren 2 bis 8 dargestellten Ausführungsform, weist jedoch abweichend hiervon eine in der X-Y-Ebene rechteckige Grundform auf.

- Die Figur 11 zeigt eine Kombination eines erfindungsgemäßen 3D-Coriolis-
5 Drehratensensors 27 mit einem 3D-Beschleunigungssensor 28 auf einem MEMS-Silizium-Chip 29. Der 3D-Drehratensensor 27 und der 3D-Beschleunigungssensor 28 bilden zusammen eine vollständige IMU. Mittels des 3D-Drehratensensors 27 werden äußere Drehraten Ω_x , Ω_y , Ω_z um sämtliche Raumachsen des Koordinatenbezugssystems erfasst. Mittels des 3D-Beschleunigungssensors werden in
0 der jeweiligen Achsrichtung vorliegende lineare Beschleunigungen a_x , a_y , a_z erfasst. Beide Sensoren sind über entsprechende Zuleitungen 30 mit Anschluss pads 31 verbunden. Insgesamt kann der Chip in herkömmlicher Aufbau- und Verbindungstechnologie zusammen mit einer entsprechenden ASIC in einem in der Figur 11 nicht dargestellten Plastik-, Metall- oder Keramikgehäuse aufgebaut werden.
5 Ebenfalls denkbar ist eine monolithische Integration der MEMS-Technologie sowie der ASIC-Technologie.

5 Bezugszeichenliste

	1	zentraler Anker
	2	Federelement
	3	Detektionsmasse
0	4a,b,c,d	Antriebsmasse
	5	Federelement
	6	Kopplungsfeder
	7	Substrat
	8	
5	9	Elektrodenkamm
	10	Gegenelektrode
	11	Außenanker
	12	Gegenelektrodenkamm
	13	Verbindungsstruktur
0	14	Durchlass
	15	Ausnehmung
	16	Außenbereich
	17	Innenbereich
	18	Balkenelement
5	19	Verbindungsstruktur
	20	Fingerelektrode
	21	Gegenfingerelektrode
	22	Gegenfingerelektrode
	23	Elektrodenpaar
0	24	Elektrodenpaar
	25	Elektrodenpaar
	26	Elektrodenpaar
	27	3D-Coriolis-Drehratensensor
	28	3D-Beschleunigungssensor
5	29	Si-Chip
	30	Zuleitungen
	31	Anschluss pads

Ansprüche:

1. **Mikromechanischer Coriolis-Drehratensensor** zur Erfassung von Drehraten $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$ mit Komponenten um Messachsen in drei zueinander orthogonalen Raumrichtungen (X-, Y- und Z-Achse), aufweisend:
 - ein Substrat (1),
 - eine Detektionsmasse (3) und
 - wenigstens zwei Antriebsmassen (4a,4b,4c,4d),
 - wobei die Antriebsmassen (4a,4b,4c,4d) jeweils relativ zum Substrat zu einer Primärbewegung ($V_{xa}, V_{yb}, V_{xc}, V_{yd}$) antreibbar sind,
 - wobei die Richtung der Primärbewegung ($V_{xa}, V_{yb}, V_{xc}, V_{yd}$) einer der wenigstens zwei Antriebsmassen (4a,4c) senkrecht zur Richtung der Primärbewegung ($V_{xa}, V_{yb}, V_{xc}, V_{yd}$) einer anderen der wenigstens zwei Antriebsmassen (4b,4d) ist, wobei die Detektionsmasse (3) mit den Antriebsmassen (4a,4b,4c,4d) gekoppelt ist,
 - derart, dass die Detektionsmasse (3) durch eine Sekundärbewegung der Antriebsmassen (4a,4b,4c,4d), bewirkt durch Corioliskraft bei Wirkung einer zu erfassenden äußeren Drehrate, zu einer Erfassungsbewegung anregbar ist, dadurch gekennzeichnet, dass
 - die Detektionsmasse (3) relativ zum Substrat als Erfassungsbewegung Drehschwingungen um Drehachsen in den drei zueinander orthogonale Raumrichtungen (X,Y,Z) ausführen kann.
2. Mikromechanischer Coriolis-Drehratensensor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Detektionsmasse (3) an dem Substrat (1) oder an einer auf dem Substrat (1) aufgetragenen Schicht angeordnet ist.
3. Mikromechanischer Coriolis-Drehratensensor nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Detektionsmasse (3) relativ zu dem Substrat (1) translatorisch unverschiebbar angeordnet ist.
4. Mikromechanischer Coriolis-Drehratensensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Detektionsmasse (3) mittels einer in ihrem Massezentrum angeordneten inneren Aufhängung, vorzugsweise mittels eines zentralen Ankers 1 sowie zwischen diesem und der Detektionsmasse 3 angeordneten Federelementen 2, an dem Substrat (1) angeordnet ist.

- 5 5. Mikromechanischer Coriolis-Drehratensensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Detektionsmasse (3) mit jeder Antriebsmasse derart gekoppelt ist, dass jede Antriebsmasse die Primärbewegung jeweils in radialer Richtung bezüglich der Detektionsmasse (3) ausführen kann.
- 0 6. Mikromechanischer Coriolis-Drehratensensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Detektionsmasse mit jeder Antriebsmasse derart gekoppelt ist, dass jede Antriebsmasse relativ zur Detektionsmasse zwei rotatorische Sekundärbewegungen in zueinander orthogonalen Raumrichtungen ausführen kann.
- 5 7. Mikromechanischer Coriolis-Drehratensensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Detektionsmasse mit jeder Antriebsmasse derart gekoppelt ist, dass keine Antriebsmasse relativ zur Detektionsmasse eine rotatorische Sekundärbewegung um eine zur
0 Primärbewegung parallele Raumrichtung ausführen kann.
8. Mikromechanischer Coriolis-Drehratensensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Antriebsmassen um die Detektionsmasse herum angeordnet sind, vorzugsweise dass die Detektionsmasse
5 und die Antriebsmassen in einer Ebene angeordnet sind.
9. Mikromechanischer Coriolis-Drehratensensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass jeweils zwei Antriebsmassen einander gegenüberliegend mit zwischenliegender Detektionsmasse angeordnet sind.
- 0 10. Mikromechanischer Coriolis-Drehratensensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass jede Antriebsmasse jeweils mittels wenigstens eines Federelements mit der Detektionsmasse gekoppelt ist.
- 5 11. Mikromechanischer Coriolis-Drehratensensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass wenigstens eine Antriebsmasse jeweils mittels eines oder mehrerer erster Federelemente, die an dem zur Detektionsmasse zugewandten Seitenbereich der Antriebsmasse angeordnet sind, und mittels eines oder mehrerer zweiter Federelemente, die an dem der
0 Detektionsmasse abgewandten Seitenbereich der Antriebsmasse angeordnet sind, mit der Detektionsmasse gekoppelt ist.

- 5 12. Mikromechanischer Coriolis-Drehratensensor nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass wenigstens eine Antriebsmasse eine Ausnehmung in ihrem der Detektionsmasse abgewandten Seitenbereich aufweist, in der die zweiten Federelemente angeordnet sind.
- 0 13. Mikromechanischer Coriolis-Drehratensensor nach Anspruch 11 oder 12, dadurch gekennzeichnet, dass die ersten und zweiten Federelemente über eine im Wesentlichen biegesteife Struktur, vorzugsweise Balkenstruktur, miteinander verbunden sind, die in der Ausnehmung der Antriebsmasse angeordnet ist.
- 5 14. **Beschleunigungsmesseinheit (IMU)** mit einem Coriolis-Drehratensensor nach einem der vorhergehenden Ansprüche.
15. **Verfahren** zur Erfassung von Drehraten in drei zueinander orthogonale Raumrichtungen, vorzugsweise unter Verwendung eines Coriolis-
- 0 Drehratensensors nach einem der Ansprüche 1 bis 23, wobei wenigstens vier Antriebsmassen vorzugsweise in Form einer ersten (4a), einer zweiten (4b), einer dritten (4c) und einer vierten (4d) Antriebsmasse jeweils zu einer translatorischen Schwingung als Primärbewegung angeregt werden, wobei wenigstens zwei Antriebsmassen (4a,4b,4c,4d) die Primärbewegung
- 5 senkrecht zur Primärbewegung wenigstens zweier anderer Antriebsmassen (4a,4b,4c,4d) ausführen, wobei bei Wirkung einer zu erfassenden äußeren Drehrate eine durch Corioliskraft bewirkte Sekundärbewegung wenigstens einer Antriebsmasse (4a,4b,4c,4d) auf die Detektionsmasse (3) übertragen wird, dadurch gekennzeichnet, dass die
- 0 Detektionsmasse (2) relativ zum Substrat Drehschwingungen in drei zueinander orthogonale Raumrichtungen (X,Y,Z) ausführen kann.

* * *

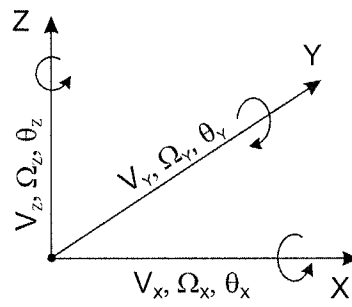


Fig. 1

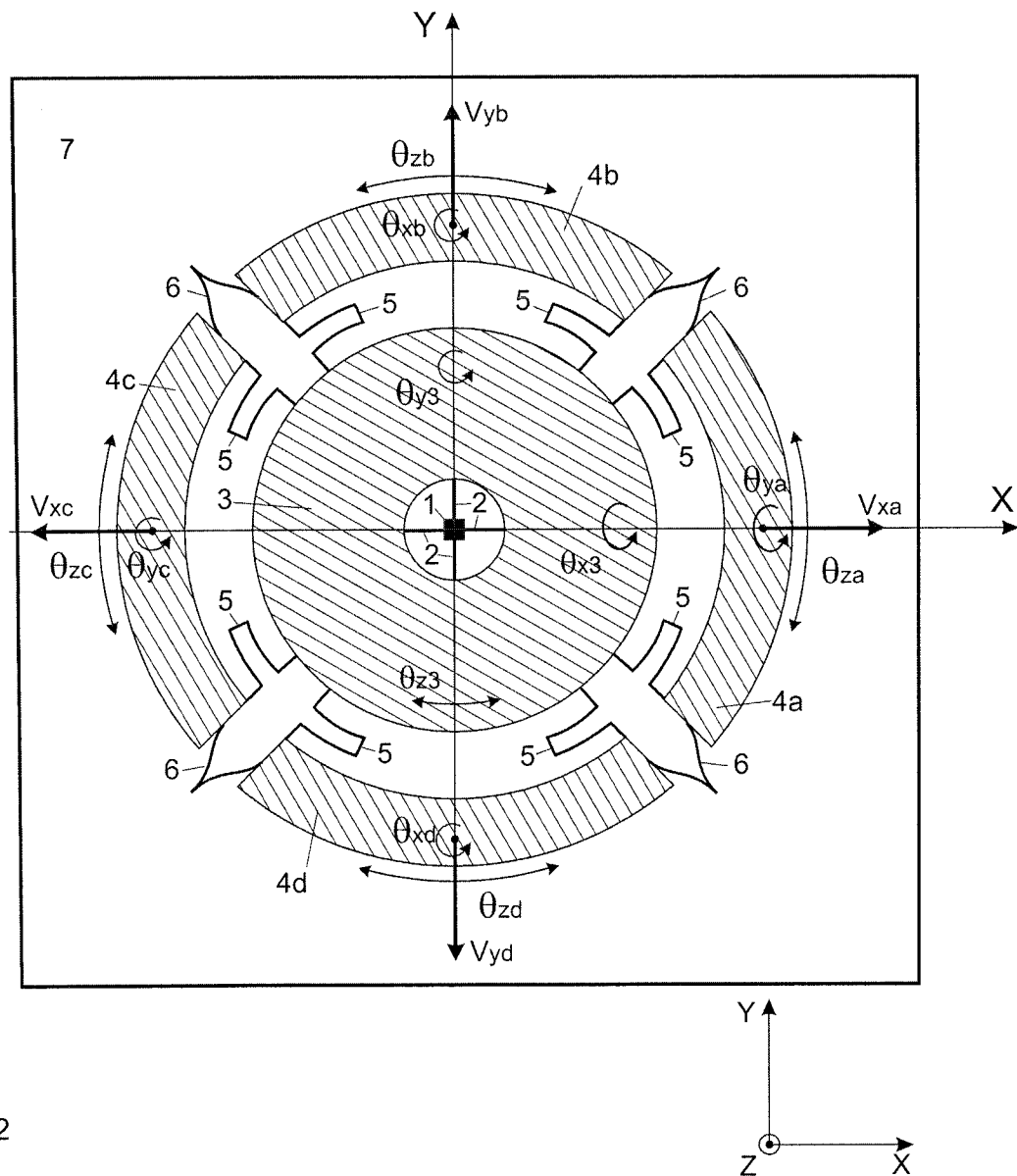


Fig. 2

2/6

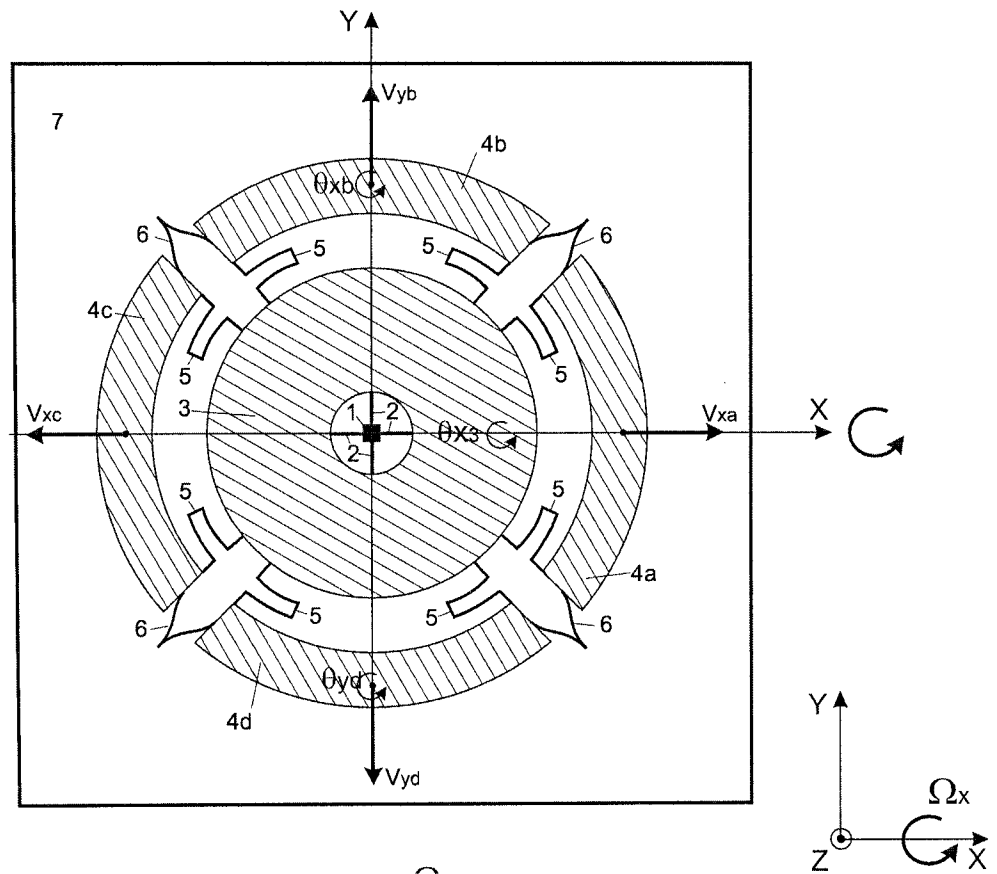


Fig. 3

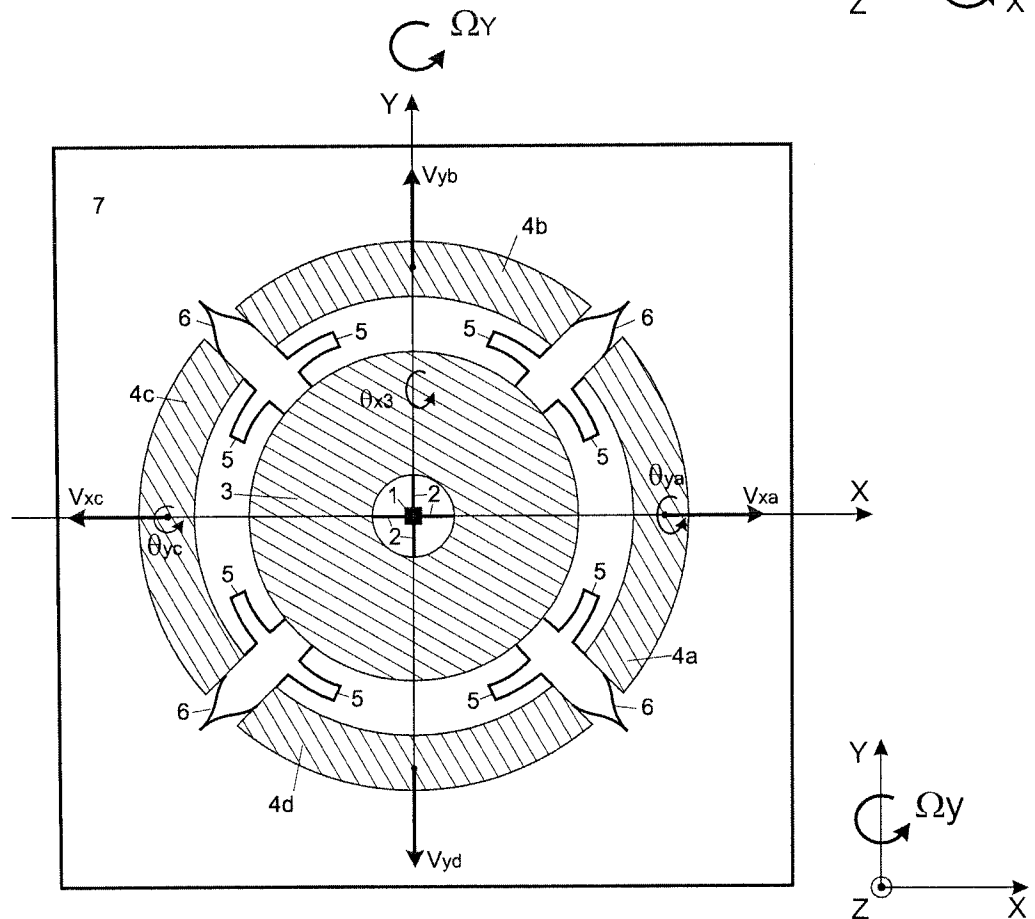


Fig. 4

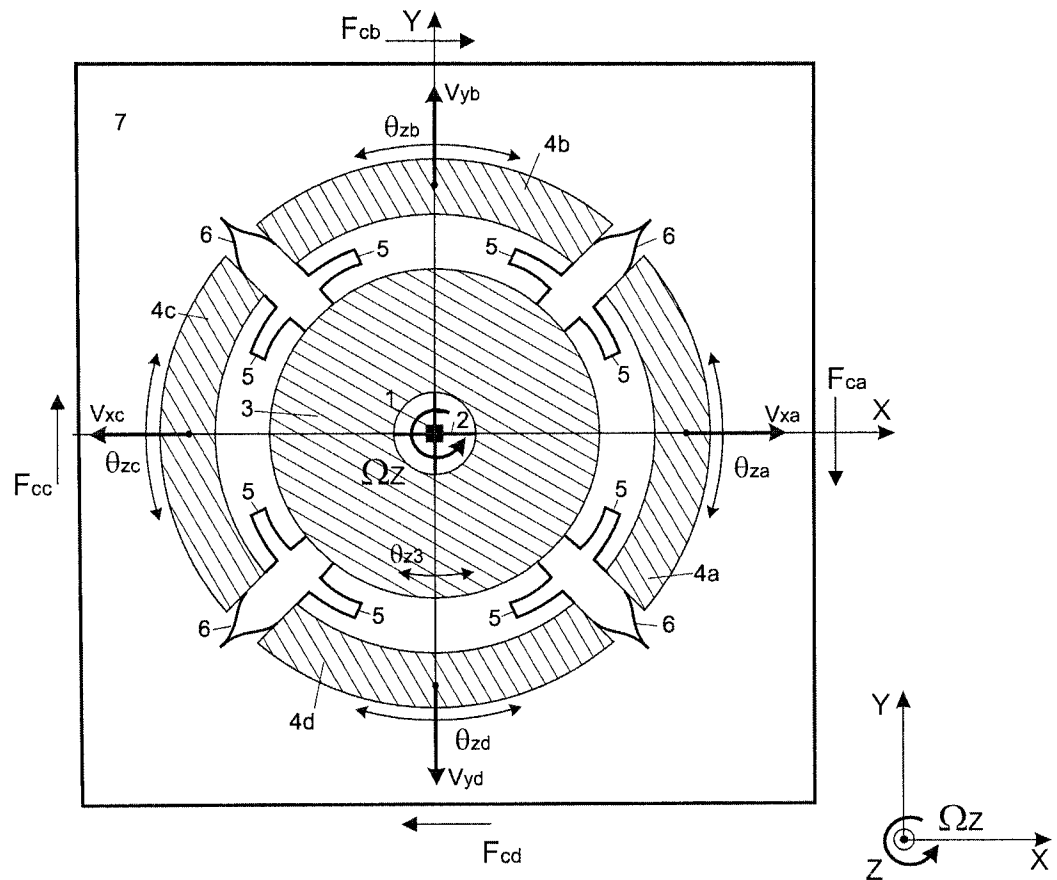


Fig. 5

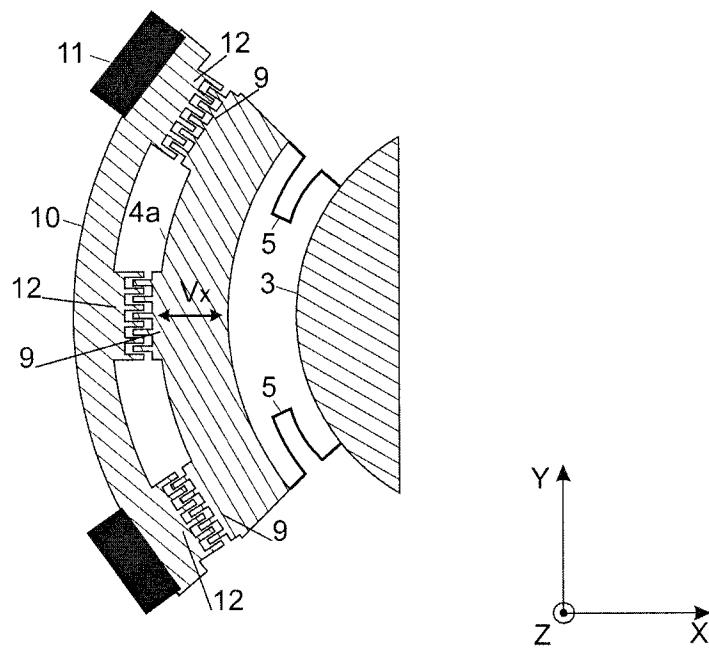


Fig. 6

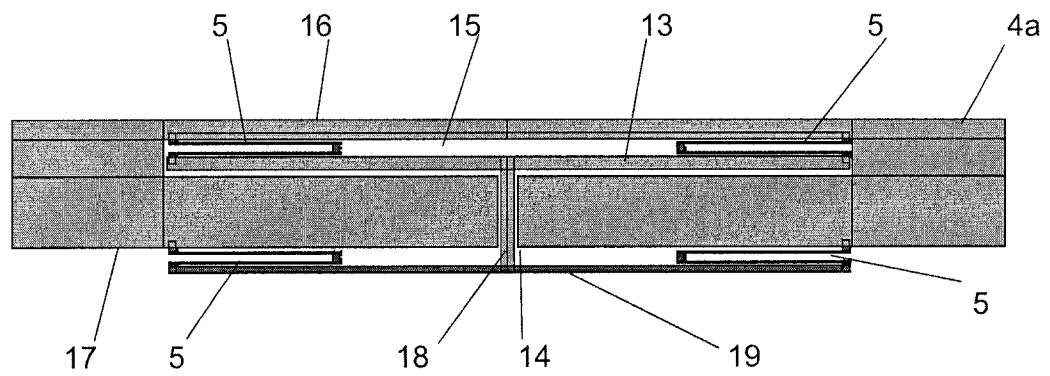


Fig. 7

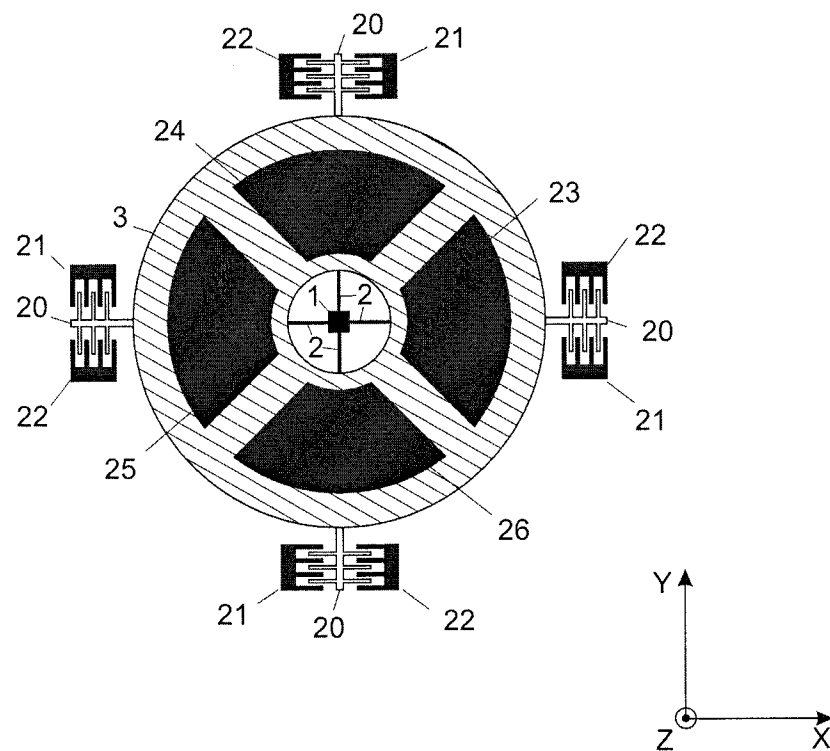


Fig. 8

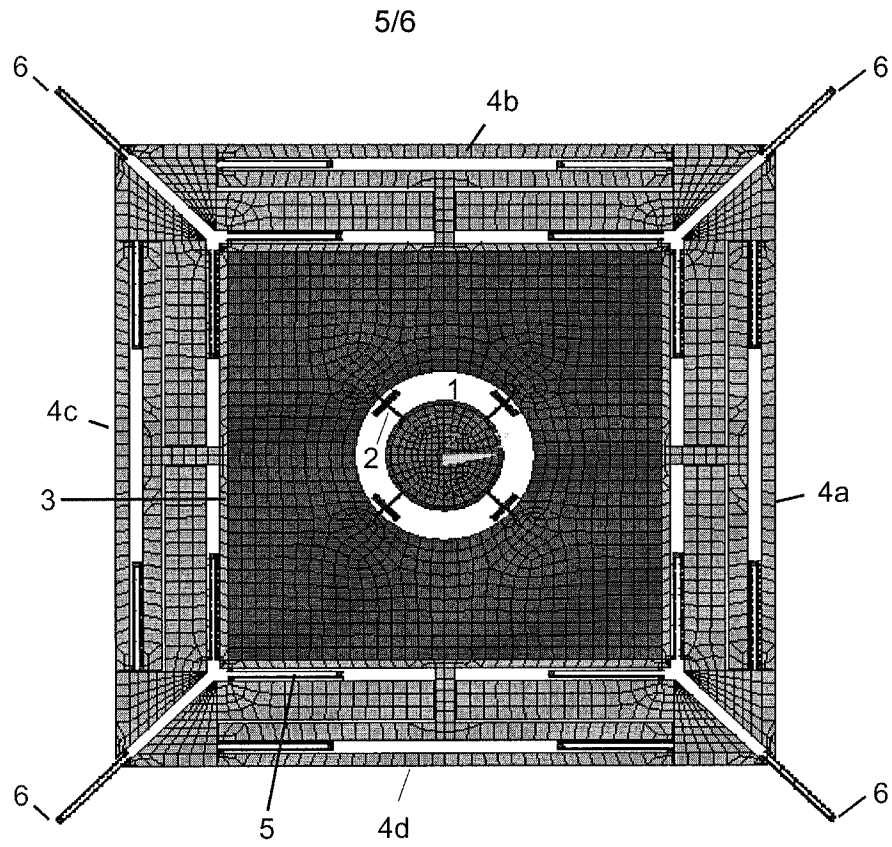


Fig. 9

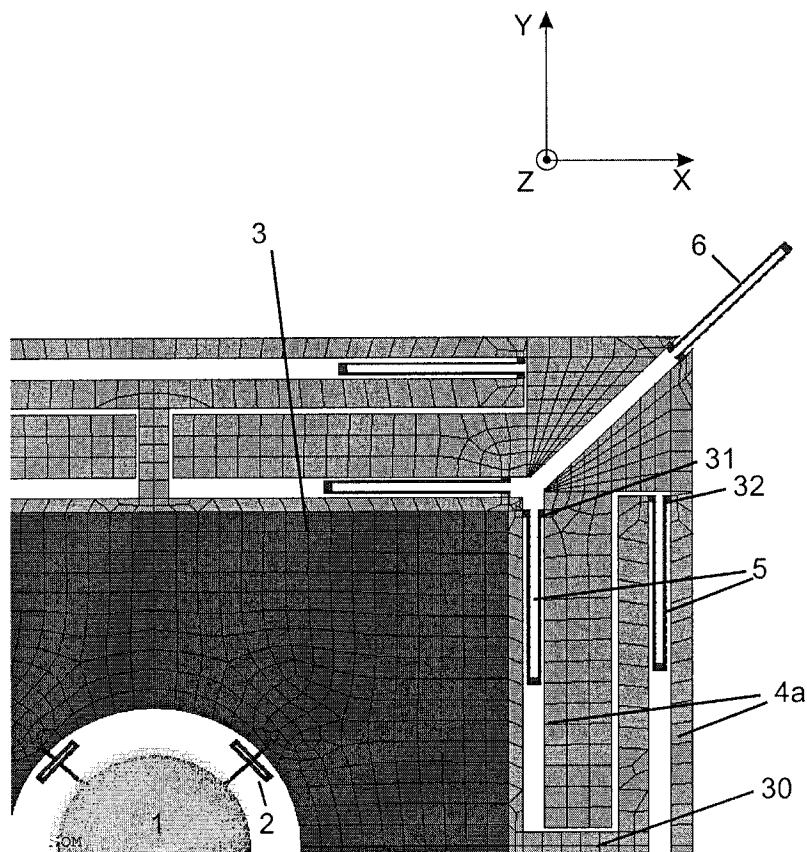


Fig. 10

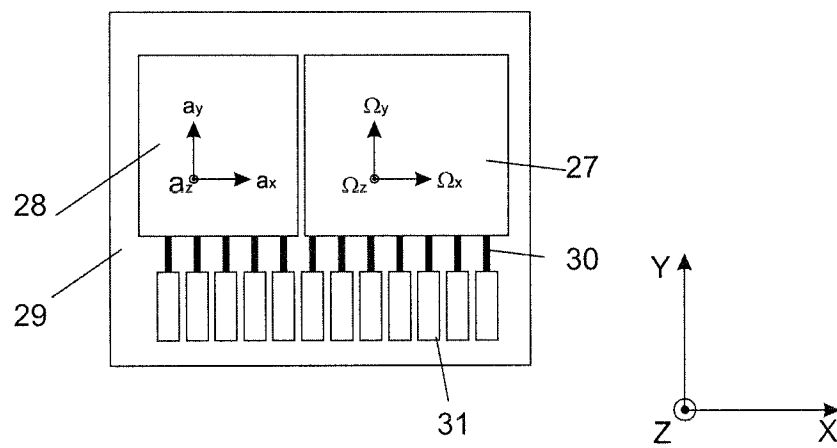


Fig. 11

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No

PCT/EP2009/064984

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

INV. G01C19/56

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

G01C

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 92/21000 A (BRITISH TECH GROUP [GB]) 26 November 1992 (1992-11-26) cited in the application page 1, line 35 - page 2, line 8 page 4, line 4 page 9, line 2 - page 10, line 30; figure 10 -----	1,15

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier document but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

8 December 2009

Date of mailing of the international search report

15/12/2009

Name and mailing address of the ISA/

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Hoekstra, Frank

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No

PCT/EP2009/064984

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
WO 9221000	A	26-11-1992	
		DE 69212603 D1	05-09-1996
		DE 69212603 T2	05-12-1996
		EP 0586437 A1	16-03-1994
		GB 2271636 A	20-04-1994
		JP 6508684 T	29-09-1994
		US 5490420 A	13-02-1996

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2009/064984

A. KLASSTIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES

INV. G01C19/56

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
G01C

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	WO 92/21000 A (BRITISH TECH GROUP [GB]) 26. November 1992 (1992-11-26) in der Anmeldung erwähnt Seite 1, Zeile 35 - Seite 2, Zeile 8 Seite 4, Zeile 4 Seite 9, Zeile 2 - Seite 10, Zeile 30; Abbildung 10 -----	1,15



Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen ☒ Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"8" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

8. Dezember 2009

Absenddatum des internationalen Recherchenberichts

15/12/2009

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde

Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040,
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Hoekstra, Frank

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2009/064984

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
WO 9221000 A	26-11-1992	DE 69212603 D1	05-09-1996
		DE 69212603 T2	05-12-1996
		EP 0586437 A1	16-03-1994
		GB 2271636 A	20-04-1994
		JP 6508684 T	29-09-1994
		US 5490420 A	13-02-1996
