

Volker Kempe

Inertial MEMS - Winzlinge messen Trägheit

Die Winzlinge - das sind hier mikroelektromechanische Sensoren (oder MEMS - micro electromechanical systems) mit einer Grundfläche von einigen Quadratmillimetern und einer Höhe, die häufig sogar unter 0.9 mm liegt. Und zwar im verpackten Zustand, mit allen elektrischen Anschlüssen. Die enormen technologischen Anforderungen an Chipherstellung und Verpackung werden einsichtig, wenn man sich die elektrische und mechanische Komplexität derartiger Systeme vergegenwärtigt. Signalverarbeitung einschließlich Korrektur temperatur- und streßabhängiger Umwelteinflüsse sowie Sensorsteuerung inklusive Selbstkalibrierung und Selbsttest erfordern höchstintegrierte Baublöcke. Auf Grund der meist unterschiedlichen technologischen Anforderungen werden diese oft auf einem gesonderten Chip, jedoch in der gleichen Häusung wie der Sensor untergebracht, in wachsendem Maße jedoch auch monolithisch mit diesem auf einem Chip integriert. Der eigentliche Sensor ist ein Gebilde mit mechanisch bewegten Teilen, die federnd aufgehängt sind, oder eine Anordnung mit eingeschlossenen Flüssigkeiten, deren Bewegung oder Wärmeausbreitung unter dem Einfluß äußerer Kräfte erfaßt werden kann. Auch streßabhängige mechanische Selbstschwinger z.B. in Form von eingespannten Balken und andere Konstruktionen kommen zum Einsatz. Ihre Strukturierung stützt sich auf die in den letzten Jahrzehnten entwickelten MEMS-Technologien, die es u.a. gestatten, Hohlräume und tiefe Gräben in einem der Mikroelektronik entlehnten Schichtenaufbau zu schaffen, so daß freistehende Balken, federnd aufgehängte Platten, fluidische Kanäle und Kammern etc. hergestellt werden können. Eine oft genutzte Technik ist dabei das selektive Ätzen, mit dem Opferschichtsegmente unterhalb der zu bewahrenden Strukturelementen weggeätzt oder Bulk-Silizium unterhalb von Membranen oder anderen bewegten Teilen entfernt werden. Das technologische Repertoire ist vielfältig (s. z.B. [Franssila, 2004], [Madou, 2002]) und beschränkt sich nicht nur auf die Strukturierung von Silizium (bulk micromachining) oder von Schichtenaufbauten über Silizium (surface micromachining), sondern erfaßt heute auch Glas, Keramik und Metalle sowie vorher in der Mikroelektronik nicht verwendete Schichtmaterialien mit den dafür entwickelten Abscheidetechniken. Obwohl MEMS-Strukturen und ihre komplizierten Herstellungstechnologien untrennbar miteinander verknüpft sind, würden die technologischen Aspekte jedoch den Rahmen unserer Darlegungen sprengen und werden deshalb nur am Rande gestreift.

Was verstehen wir nun unter Trägheitsmessung? Nach unserem Schulwissen sind Trägheitskräfte Scheinkräfte, die als zusätzliche Kräfte berücksichtigt werden müssen, wenn die Bewegung eines Körpers nicht in einem Inertialkoordinatensystem, sondern in einem sich mit verändernd-

der Geschwindigkeit dazu bewegenden Koordinatensystem beschrieben werden soll. Dies können körperassoziierte oder plattformzugeordnete Koordinatensysteme wie z.B. das Koordinatensystem eines fahrenden PKW sein. Solche nichtinertialen Bezugssysteme bewegen sich entweder beschleunigt oder rotieren im Bezug zum Inertialsystem. Im allgemeinen Fall vollführen sie eine Kombination beider Bewegungen. Da die auftretenden Scheinkräfte masseabhängig sind, werden sie oft als Massenkräfte bezeichnet. Die Beschleunigungskraft ist positionsunabhängig, die Fliehkräfte hängen von der Entfernung des Körpers vom Koordinatenursprung des rotierenden Nichtinertialsystems und die Corioliskräfte - von der Geschwindigkeit in diesem System ab.

Für rotierende Körper nichtvernachlässigbarer räumlicher Ausdehnung müssen die Trägheitskräfte durch Trägheitsmomente bzw. Drehimpulse erweitert werden, die von der Masseverteilung im Körper und der Drehgeschwindigkeit des Körpers im inertialen Bezugssystem abhängen, also der (vektoriellen) Summe von Eigendrehgeschwindigkeit im nichtinertialen Koordinatensystem und dessen Rotationsgeschwindigkeit bezüglich Inertialsystem.

Die Trägheitskräfte stellen die Verbindung zwischen der Bewegung des nichtinertialen Bezugssystems und der relativen Bewegung von Testkörpern in diesem her, so daß man aus deren Dynamik auf die Bewegung des Nichtinertialsystems im Raum schließen kann. Allerdings ist zu beachten, daß massenproportionale Gravitationskräfte nicht von Beschleunigungskräften unterschieden werden können. Die postulierte Äquivalenz von schwerer und träger Masse war ja auch der Ausgangspunkt von Einstein's Relativitätstheorie.

Heute untergliedert man Inertialsensoren in Beschleunigungssensoren und Drehratensensoren (bzw. integrierende Drehratensensoren¹). Diese Trennung macht deutlich, daß derzeit kaum Lösungen existieren, die in der Lage sind, mit einem einzigen Testkörpersystem ein vollständiges Bild von Drehung und Beschleunigung des nichtinertialen Bezugssystems zu erhalten, sondern daß dazu auf eine Kombination von Beschleunigungs- und Drehratensensoren zurückgegriffen werden muß.

Interessant ist, wie die biologische Evolution lebenden Wesen die Fähigkeit zur Bestimmung ihrer Lage und Bewegung im Raum vermittelt hat. Menschen, Tiere und Pflanzen nutzen in der Regel verteilte Rezeptoren in Gelenken, Sehnen und Muskeln, taktile Sensoren an der Körperoberfläche, Statozysten wie bei wirbellosen Wasserbewohnern bzw. den Zellgravitropismus (Graviperzeption) bei Pflanzen, um Beschleunigung und Gravitation zu erfassen. Natürlich werden diese Sinne ggf. durch visuelle Perzeption der Umwelt oder vestibuläre Wahrnehmung ergänzt. Der Vestibularapparat ist dabei ein Sensor, bei dem die Evolution ganz im Sinne der modernen Physik auf spezielle Probemassen - hier z.B. die Endolymphflüssigkeit in den Bogengängen sowie Ohrsteine (Otoliten) zur Erfassung von Winkel- bzw. Linerbeschleunigungen - zurückgreift. Mikroskopisch kleine Festkörper oder schwere Partikel wie Amyloplasten (Statolithenstärke) verleihen mittels ihrer Schwerkraft Einzellern oder Pflanzen die Fähigkeit zur Orientierung im Raum.

Vielleicht am frappierendsten sind jedoch Sensoren, mit denen Insekten Flugorientierungsänderungen registrieren. Leicht elastische, trommelschlegelähnliche Gebilde mit Verdickungen an der Spitze - die sg. Schwingkölbchen (Halteren), entstanden als Folge der Degeneration von Vorder- oder Hinterflügeln - werden synchron, aber in Gegenrichtung mit dem Flügelschlag in Vibrationsschwingungen versetzt. Bei Änderungen der Flugrichtung treten Corioliskräfte auf, die zu einem Abknicken der Kölbchen führen. Der Knickprozeß wird mit einem ganzen Netz von

¹werden aus Platzgründen nicht behandelt

taktilen Rezeptoren im Fußpunktbereich der Kölbchen erfaßt. Die Schwingkölbchen sind somit das natürliche Pendant zu den im MEMS-Bereich dominierenden Vibrationsgyroskopen. Man muß allerdings vermuten, daß den Entwicklern der ersten MEMS-Vibrationsgyroskope dieses Vorbild unbekannt war.

Ein kurzer Streifzug durch die Vorgeschichte der MEMS-Trägheitssensoren

Die Geschichte der Trägheitssensoren ist vergleichsweise kurz. Angesichts ihrer fundamentalen Bedeutung für die Kontrolle und Steuerung von bewegten Körpern ist dies verwunderlich, umso mehr, daß schon im späten Mittelalter eigentlich alle notwendigen Ingredientien wie Feinmechanik und Präzisionsfederherstellung zur Verfügung standen. Eine Ursache dürfte aber im Fehlen geeigneter Indikatortechnologien oder - in der Terminologie der modernen Technik - im Fehlen von Transducern und Ausgabemedien gelegen haben, mit denen schnelle Bewegungsänderungen von Testkörpern erfaß- und darstellbar waren. Nicht überraschend findet man demzufolge unter älteren Anwendungen vor allem Beschleunigungsschalter, bei denen eine achsengeführte, beschleunigte Masse bei Überwindung einer definierten Barrierkraft eine Aktion wie z.B. eine Bombendetonation auslöst. Der erste kommerzielle Beschleunigungsmesser aus den zwanziger Jahren des vorigen Jahrhunderts wird McCullom und O. S. Peters zugeschrieben ([McCullom and Peters, 1924]). Die druckabhängigen Widerstände zweier auf Zug bzw. Druck beanspruchter Zylinder aus Carbon-Ringen bewirken unter Beschleunigung die Verstimmung einer Wheatstone-Widerstands-Halbbrücke. Diese recht unhandlichen Signalwandler werden schon 1938 von Widerstands-Dehnmeßstreifen und Ende der 40-er Jahre von den wesentlich breitbandigeren piezoelektrischen Transducern abgelöst. Piezoresistive Signalwandler, die ohne spezielle piezoelektrische Materialien wie Quartz oder PZT ($Pb[Zr_xTi_{1-x}]O_3$; $0 < x < 1$) auskommen, wurden etwa um 1962 erprobt und Mitte der 60-er Jahre marktfähig. Sie bilden auch die Grundlage für den Eintritt in die Welt der mikroelektromechanischen Trägheitssensoren - die Welt der Sensoren, Aktuatoren und elektronischen Schaltungen mit Mikrometer- und Nanometerstrukturen auf einem Träger oder sogar auf einem Chip. Dieser erfolgte Ende der 70-er Jahre durch Roylance und Agnell ([Roylance and Angell, 1979]) mit der Demonstration eines in mikroelektromechanischer Losfertigung hergestellten piezoresistiven Akzelerometers, bei dem die Testmasse aus Bulk-Silizium zwischen zwei Glaswafern mittels eines Biegebalkens aufgehängt war. Piezoresistoren in der Nähe des Balkenfußpunktes wandelten den beschleunigungsinduzierten Streß in ein elektrisches Signal.

Bis zur breiten Kommerzialisierung dauerte es noch etwa 10 Jahre, in denen verschiedenste Prinzipien der Signalerfassung wie kapazitive Messung kleinster Auslenkungen, Frequenzmessung von mechanisch belasteten Resonatoren, Tunnelstrommessung über winzigste Spalts, Wärmeausbreitung in beschleunigten flüssigen und gasförmigen Medien u.a. erprobt und tw. marktreif gemacht wurden. Eine Pionierrolle spielte der mit erheblicher staatlicher Förderung entwickelte 50 g - Beschleunigungssensor von Analog Devices (USA) ([Analog Devices, 1993]) - Beispiel einer monolithischen Integration von kapazitivem Beschleunigungssensor und kompletter Signalverarbeitung auf einem Chip. Sein Markterfolg beruhte auf den sprunghaft gewachsenden Anforderungen der Automobilindustrie an preiswerten Airbag-Sensoren. Das Sicherheitsbedürfnis der Automobilkonsumenten gepaart mit wachsendem Preis- und Effizienzdruck war generell eine treibende Kraft für die breite Elektronisierung und Sensorausstattung des "liebsten Spielzeuges des kleinen Mannes" in einer hochindustrialisierten Welt.

Interessanterweise läßt sich die Geschichte der Drehratensensoren deutlich weiter zurückverfolgen. Grundlage aller Messungen von Winkeländerungen ist der Kreiseffekt und der ihm zugrunde liegende Satz von der Erhaltung des Drehimpulses. Die darauf beruhende stabilisierende Wirkung schnell rotierender Scheiben ist schon über Jahrtausende bekannt und wurde in alten Zeiten für yo-yo-ähnliche Spiele und Zeremonien genutzt. Mindestens seit dem 15. Jahrhundert werden spiralförmige Züge in Geschützrohren zur Drallerzeugung und Geschößstabilisierung verwendet. Weite Verbreitung in nahezu allen Kulturkreisen fand der Spielzeugkreisel, der eine Fülle empirischer Einsichten und Anregungen für nützliche Geräte wie z.B. den künstlichen Horizont - die spiegelnde Oberfläche eines präzessionsfrei aufgesetzten Kreisels - lieferte. Das empirisch-intuitive Verständnis für Drehbewegungen und die dabei auftretenden Kräfte wuchs und überdeckte jahrhundertlang aus mathematischen Modellen ableitbare Erkenntnisse. Letzteres auch deshalb, weil praxisbezogene, mathematische Detailanalysen schwierig, nur wenigen zugänglich und meist einfach zu aufwendig waren. So bekennt Euler, dem es schon etwa 1755 durch Einführung von Hauptträgheitsachsen gelungen war, beliebige Körper auf Rotationskörper zurückzuführen und damit ein geschlossenes Gleichungssystem abzuleiten, daß "er nicht im Stande sei, aus den so gewonnenen Gleichungen etwas zu erschließen, woraus man die Natur der Bewegung erkennen könne"¹. Das Entstehen und Reifen der Gyroskoptechnik erfolgte somit lange Zeit auf experimentell - intuitiver Basis. Die Einführung der Corioliskraft durch Gaspard-Gustave Coriolis im Jahre 1835 war deshalb sicher ein wesentlicher Schritt, der half, ein tieferes Verständnis für die wirksamen Kräfte zu erlangen. Die Corioliskraft erscheint in der Bewegungsgleichung eines Objektes, das sich in einem rotierenden Referenzsystem befindet, und hängt von der Eigengeschwindigkeit des Objektes in diesem System ab. Diese leicht in Richtung und Größe vorstellbare Kraft war hervorragend geeignet, die Überlegungen der Forscher auf ein solideres wissenschaftliches Fundament zu stellen. Man muß bekennen, daß auch heute noch das wissenschaftliche Verständnis technischer Artefakte mitunter dem intuitiv - kreativen Schöpfungsansatz hinterherhinkt. Korrekt funktionierende Systeme werden gar nicht so selten inkorrekt analysiert, aber schlimmer noch (zum Glück wesentlich seltener) - fehlerhafte mathematische Modelle führen zu Systemvorschlägen und technischen Entwicklungen, deren Ineffizienz mitunter erst sehr spät festgestellt wird. Ein lehrreiches Beispiel werden wir weiter unten präsentieren.

Aber zurück zu den ersten Schritten der Gyroskoptechnik. Als erste technische Realisierung eines Drehratensensors kann man das etwa im Jahre 1817 von Johann Gottfried Friedrich von Bohnenberger in Tübingen konstruierte mechanische Gyroskop betrachten, obwohl es eigentlich als Demonstrator von Rotationseffekten gedacht war - hier zur Veranschaulichung der durch Mond- und Sonnenanziehung bewirkten Erdachsenpräzession, verkürzt von 28500 Jahren auf einige Sekunden. Auch die räumliche Drehachsenstabilität der kardanisich aufgehängten rotierenden Kugel ließ sich hervorragend vorführen. Ähnliche Demonstratoren sind von Walter Johnson (USA, ~ 1830) u.a. bekannt geworden.

Das dem Auftreten von Corioliskräften in Nicht-Inertialsystemen zugrunde liegende Prinzip wurde von Leon Foucault im Jahre 1851 mit seinem bekannten Pendelversuch im Pariser Pantheon demonstriert. Die Schwingungsebene des 67 m langen Pendels mit einer Masse von 28 kg ändert sich in 24 Stunden um den Winkel $360^\circ \sin \varphi$, wobei φ die geographische Breite des Pendelortes darstellt. Das Pendel stellte den ersten Drehratensensor zur Erfassung der Erdrotation dar, wobei Foucault lediglich die Schwingungsebenenänderungen in Pol- und Äquaturnähe

¹interessierten Lesern sei zur Rolle von Wissenschaft und Intuition in der Kreiseltechnik das hervorragende Werk von Jobst Broelmann [Broelmann, 2002] empfohlen, aus dem auch obiges Zitat stammt

($360^\circ / 24 \text{ h} \cong 0.004^\circ / \text{sec}$ bzw. $0^\circ / \text{sec}$) exakt interpretierte. Die Transformation des unhandlichen Pendels auf einen schnell rotierenden, kardanisch aufgehängten Rotationsläufer, der in verschiedenen Freiheitsgraden gefesselt werden konnte, erlaubte es Foucault, die Grundformen von Azimutkreisel (in drei Freiheitsgraden rotierender, "kräftefreier", fixsternorientierter Richtungshalter) und Meridiankreisel (in zwei Freiheitsgraden drehbarer, schwerkraftgefesselter, meridian-suchender Kreisel auf ruhender Plattform) zu demonstrieren. Jedoch verging noch geraume Zeit, bis die vielfältigen Probleme von Plattformstabilisierung, Reibungsverlusten, Schwerpunktkontrolle, Eliminierung des Einflusses der Erdrotation und anderer externer Störungen u.v.a.m. zufriedenstellend gelöst wurden. Vorerst dominierten Stabilisierungsaufgaben über kurze Zeiträume z.B. für Torpedos und Kanonenmunition sowie vielfältige und intensive Bemühungen um weitere Kreiselanwendungen, auch für Kompaßfunktionen. Urheberrechtlicher Schutz derartiger Konstrukte wurde zum Usus. Aber erst im Jahre 1904 patentierte der deutsche Kunsthistoriker und studierte Mediziner Hermann Anschütz-Kaempfe seine erste, erfolgversprechende Konstruktion eines Kreiselkompasses, die Startpunkt eines langen und erbitterten Patentstreites mit Nachfolgern wie Elmar Sperry (USA, 1910) und den Vertretern älterer Patentrechte wie der Firma Siemens (Patente u.a. des Holländischen Geistlichen van den Bos und von Lord Kelvin) wurde ([Schell, 2005]). Albert Einstein, der - nebenbei gesagt - offensichtlich persönlich zur korrekten Formulierung der Schweizer Patentschrift beigetragen hatte, war als Gutachter in diesem Patentstreit tätig. Nachdem er die tastend-experimentell-intuitive Arbeitsweise von Anschütz-Kaempfe näher kennen und schätzen gelernt hatte, trug er maßgeblich zur Verbesserung des Kreiselkompasses bei. Die fruchtbare Symbiose wissenschaftlichen Denkens und kreativer Intuition zweier so gegensätzlicher Akteure führte schließlich zur Konstruktion des 1922 patentierten Kugelkompasses. Die Industrialisierung der Gyroskope und ihre breite Anwendung für Schiffs- und Flugnavigation hatte begonnen. Kreiselkompass dominierten über Jahrzehnte die Produktpalette. Der Druck nach Kostenreduktion und Miniaturisierung dieser klobigen Hochpräzisionsmaschinen führte dann aber etwa in den 60-er Jahren des vorigen Jahrhunderts zum Entstehen neuartiger Meßprinzipien wie der Nutzung vibrierender Saiten ([Quick, 1964]), der Schwingungen von Quarzstimmgabeln ([Hunt and Hobbs, 1964]) und der Schwingungsdeformationen von Schalen, die den Weg zu drastischer Größen- und Gewichtsreduktion öffneten und letztendlich mit der Transformation dieser Prinzipien in die MEMS-Welt endeten. Entscheidend war der Verzicht auf rotierende Teile und der Übergang zu oszillierenden mechanischen Elementen. Zuerst wurden MEMS-Technologien zur Herstellung von Komponenten der neuartigen Sensorsysteme herangezogen wie im Falle des Quarz-Stimmgabel-Drehratensensors von Systron Donner ([Soderkvist, 1990], USA) oder des vibrierenden Silizium-Ringes von British Aerospace System and Equipment ([Hopkin, 1997]). Die Komponenten wurden montiert und verpackt und bildeten zusammen mit ihrer elektronischen Verarbeitungseinheit einen kompletten Drehratensensor, der zwar noch nicht die Genauigkeit der Navigationskompass erreichte, jedoch für vorher kaum denkbar gehaltene Massen Anwendungen wie Fahrzeugstabilisierung eingesetzt werden konnte¹. Parallel dazu entstanden auf der Grundlage typischer MEMS-Technologien Bauelemente, die unter Nutzung verschiedener Bond-Techniken auf Wafer-Ebene gekapselt wurden und damit auch den in der Regel vakuumevakuierten Operationsraum für die fragilen mechanischen Elemente bereitstellten. Dazu gehörten ein 1986 vom Charles Draper Laboratorium (USA) vorgeschlagenes und 1991 erstmals demonstriertes, aus Bulk-Silizium gefertigtes Stimmgabelgyroskop

¹Ein ernsthafter Rivale betrat Ende der 70-er Jahre die Bühne: das optische Gyroskop. Es dominiert seitdem den Markt der Flugnavigationseräte und stellt bezüglich Stabilität und Genauigkeit eine Zielorientierung für viele Anwendungen von MEMS-Drehratensensoren im Navigationsbereich dar, der diese sich inzwischen erstaunlich weit angenähert haben.

([Greiff et al., 1991]) sowie ein 1993 vorgeführter silicon-on-glass Drehratensensor ([Weinberg et al., 1994]). 1998 demonstrierten Forscher der Michigan Universität ein aus Polysilizium gefertigtes Ring-Gyroskop ([Ayazi and Najafi, 1998]). Hunderte verschiedener Prototypen, entwickelt an Universitäten wie Berkeley, in wissenschaftlichen Gesellschaften wie der Hahn-Schickard Gesellschaft in Baden Württemberg, in großen Firmen wie Samsung, Murata und Bosch u.a., folgten. Sie nutzten verschiedenste Funktionsprinzipien und eine nahezu unübersichtliche Technologievielfalt. Doch nur wenige setzten sich am Markt durch, unter den erfolgreichen eine beachtliche Anzahl in speziell von Forschern gegründeten Firmen. Interessierten Lesern mögen der Übersichtsbeitrag von Yazdi et al. ([Yazdi et al., 1998]) sowie die Ergänzung von Shkel ([Shkel, 2001]) einen tieferen Einblick vermitteln.

Moderne Anwendungen

Klassische Einsatzgebiete von Akzelerometern waren Vibrometrie, Schockdetektion, Neigungsmessung, Dynamometrie und Seismologie. Gyroskope dienten fast ausschließlich der Plattformstabilisierung und Navigationszwecken.

Mit dem Erscheinen der Inertial-MEMS verbreiterten sich diese Einsatzbereiche und neue kamen hinzu. Akzelerometer werden in Automobilen zur Auslösung von Airbags verwendet, zur Neigungsmessung und für Antischleudersysteme. Berühmt - berüchtigt ist die Legende von der schnellen Verbreitung elektronischer Stabilisierungssysteme (ESP - elektronisches Stabilisierungsprogramm) - ausgelöst durch den mißglückten Elchtest der neu entwickeltem A-Klasse von Mercedes im Jahre 1997. Das ESP hatte die Reputation des Markennamens eines durch Qualität führenden Automobilherstellers zu retten, und es tat es. Ein empfindlicher Beschleunigungssensor und ein Gierwinkel-Drehratensensor sind die Schlüsselemente derartiger ESP, wie sie im Jahre 1994 von Bosch und Systron Donner eingeführt wurden und heute etwa 80 % aller Schleuderunfälle vermeiden helfen. Die schnell neu hinzukommenden Seiten-Airbag-Auslöser, LKW-Stabilisierungs- und Aufhängungskontrollsysteme, Überschlagschutzsysteme vor allen für hochbeinige Pick-up's, VAN's und SUV u.a. waren ebenfalls auf ein- und mehrachsige Beschleunigungs- und Drehratensensoren angewiesen.

Die Automobilanwendungen mit ihren extremen Sicherheits- und Einsatzanforderungen (z.B. Betriebstemperaturbereich - 40 bis +125 °C) forcierten und dominierten bis in das erste Jahrzehnt dieses Jahrhunderts mit etwa 80 % Anteil die Entwicklung der inertialen MEMS. Sehr bald wuchs jedoch der Ruf nach preiswerteren Trägheitssensoren für Anwendungen im Konsumgüter- und Informationstechniksegment. Crash-Sensoren für den Schutz von Magnetköpfen in Laptop-Magnetspeichersystemen, Bildstabilisierungssensoren in Handkameras, Stabilisierungssensoren für Transporter wie Segway's Einachsen-Einsatzfahrzeug, Bewegungssensoren für Überwachungssysteme, Lagedektoren zur Portrait-Landscape Umschaltung in ipad's und smartphones, hochempfindliche Beschleunigungs- und Drehratensensoren zur Bewegungserkennung wie erstmalig in Nintendo's Wii Spielkonsole eingesetzt, sind nur einige Beispiele für diesen Trend. Die Verwendung von Bewegungssensoren für elektronische Spiele, Mobiltelefone, Fitness und Sport und für die generelle Gestaltung von Mensch-Maschine Interfaces ist dabei sicher eine der interessantesten Anwendungen. Die Aktivitätskontrolle von Herzschrittmacherpatienten mittels Beschleunigungssensoren sei als Beispiel aus dem Bereich der Medizin genannt.

Die Kombination von Akzelerometern und Drehratensensoren wird zunehmend für Navigationszwecke genutzt, insbesondere zur Überbrückung der Totzonen von GPS-Systemen in Straßenschluchten, Tunneln und Gebäudekomplexen. MEMS-Gyroskope werden immer öfter mit

GPS-Systemen kombiniert. Zur Navigation innerhalb von Gebäuden wie Messehallen oder Flugplätzen werden 3D-Akzelerometer und 3D-Gyroskope mit 3D-Magnetfeldsensoren und Drucksensoren kombiniert, wobei die Magnetfeldsensoren die Richtung des lokalen Erdmagnetfeldes als stabile Richtungsreferenz bereitstellen und die Drucksensoren eine Höhenmessung zur Stockwerkdetektion erlauben. Stetig dringen MEMS-Trägheitssensoren weiter in den klassischen Bereich der Aeronautik und Militärtechnik vor. MEMS-Trägheitssensoren werden heute als 1D-, 2D- und 3D-Akzelerometer und Gyroskope angeboten sowie als Kombination beider Elemente auf einem Chip. Die ultimative IMU (inertial measurement unit) mit 6 Freiheitsgraden ist heres Ziel, jedoch mit den geforderten Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsparametern in der Regel nur mit noch unadequat hohem Aufwand bzw. Kosten erreichbar. Die großen Akteure am Markt wie der größte MEMS-Sensorhersteller Bosch mit verschiedenen 1D- bis 3D-Sensoren oder Firmen wie ST Microelectronics (Italien) mit ihrem 3D-Gyroskop für den Konsumgütermarkt, InvenSense INC. (USA), Panasonic, Murata und Seiko-Epson - um nur einige zu nennen - bieten heute in der Regel nicht mehr nur ein Spitzenprodukt sondern eine Palette von Mehrkomponentensensoren sowie weiteren MEMS-Sensoren an, mit denen stetig komplexer werdende Anwendungen erschlossen werden können. Die Kompetenz spezialisierter Start-up-Firmen wird dabei häufig durch Zukauf und Firmenintegration einverleibt.

Um eine Vorstellung von der Größenordnung dieser Entwicklung zu bekommen, seien hier nur die etwas über 30 % liegenden Marktanteile der inertialen MEMS am gesamten MEMS-Markt von etwa 8 Mrd. \$ im Jahre 2011 genannt. Trägheitssensoren haben sich zum größten MEMS-Marktsegment gemausert und die lange Zeit dominierenden Tintenstrahl-Druckköpfe (Hewlett Packard) sowie digitalen Spiegelarrays (DMD - digital mirror devices für Beamer und Mikrodisplays von Texas Instruments) vom ersten Platz verdrängt.

Trotz vielfältiger ungelöster Fragen und technisch-technologischer Schwierigkeiten sind MEMS-Trägheitssensoren heute aus ihrer Sturm-und Drang Phase in die Ära reifer Produkte eingetreten. Der allgemeine Trend zielt klar in Richtung der Verschmelzung verschiedener Sensorsysteme (sensor fusion) und macht damit auch die gemeinsame Integration von Trägheitssensoren, magnetischen Sensoren, Drucksensoren, optischen Sensoren u.a. auf einem Chip zu einem aktuellen Anliegen, das unzweifelhaft auch Rückwirkungen auf die Erschließung neuer Funktionsprinzipien zur Trägheitsmessung haben wird.

Beschleunigungssensoren

Beschleunigungsmesser sollen induzierte Beschleunigungskomponenten in geeignete Ausgangssignale umwandeln.

In einer elektronisierten technischen Umwelt sind - von einigen Ausnahmen wie z. B. Einsatz in hochexplosiven Medien einmal abgesehen - elektrische Ausgangssignale erwünscht. Damit ist ein mindestens zweistufiger Wandlungsprozeß verbunden: Zuerst wird ein physikalisches Prinzip gesucht, das sich durch eine möglichst ausgeprägte mechanische, thermische oder andere Reaktion auf eine einwirkende Beschleunigung auszeichnet. Danach wird diese Reaktion mittels eines Wandler (Transducers) in ein elektrisches Ausgangssignal transformiert.

Typische Aspekte von inertial MEMS an Hand eines Feder-Masse Systems

Im MEMS-Bereich favorisieren die hervorragenden mechanischen Eigenschaften von gewachsenem Bulk-Silizium mit Elastizitätsmoduli um 190 GPa (orientierungsabhängig) und Fließfestig-

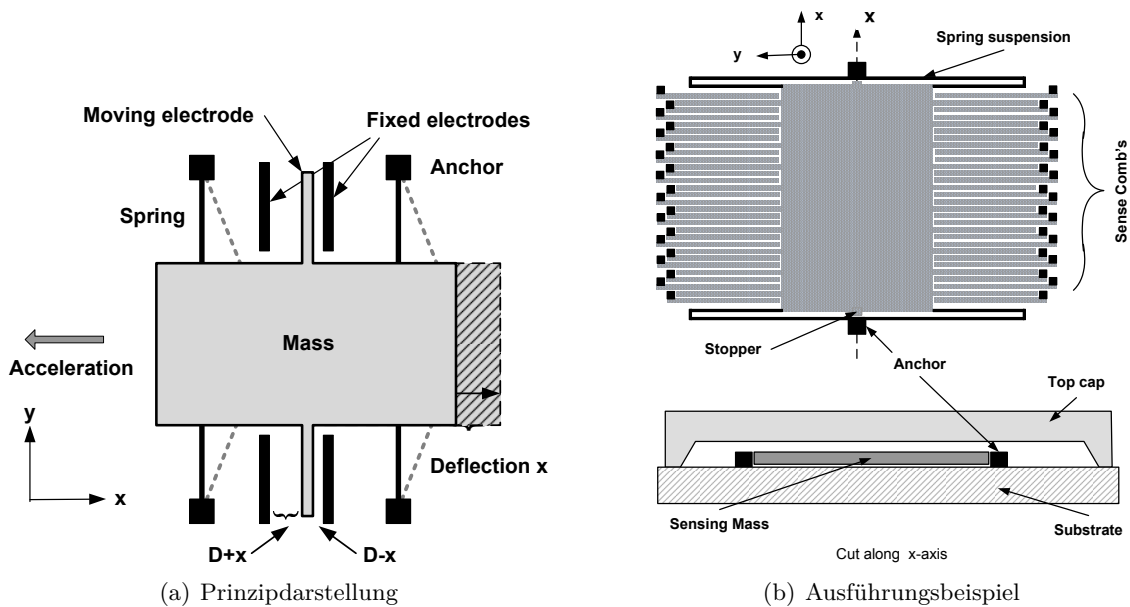


Abbildung 1: Lineares Feder-Masse Akzelerometer.

keiten um 7 GPa sowie des etwas weniger leistungsfähigen, dafür aber isotropen, abgeschiedenen polykristallinen Siliziums (kurz: Polysilizium) die Konstruktion klassischer Feder-Masse Systeme. Beschleunigungsinduzierte Auslenkungen oder auftretender Deformationsstreß werden erfaßt und in elektrische Signale gewandelt. Das in Abb. 1 dargestellte Feder-Masse-1D-Akzelerometer mit kapazitivem Wandler veranschaulicht typische Merkmale einer Inertialsensorkonstruktion und möge zur Erläuterung der wichtigsten Einflußfaktoren und Beschränkungen sowohl für Beschleunigungssensoren als auch sinngemäß für Drehratensensoren dienen.

Eine an vier Federn im Abstand von einigen μm über der Waferoberfläche aufgehängte Platte wird unter Einfluß einer in x-Richtung wirkenden Beschleunigung ausgelenkt. Platte und Federn können z.B. durch Unterätzen einer strukturierten Polysiliziumschicht freigelegt werden. Die Platte trägt an beiden Seiten kammartig angeordnete Finger, von denen in Abb.1(a) nur je einer gezeigt ist. Die Finger bilden Teile eines vertikalen Kondensators, deren Gegenelektroden (schwarz) fest, jedoch elektrisch isoliert auf der Waferoberfläche verankert sind, so daß eine Plattenauslenkung eine Kapazitätsänderung nach sich zieht. Infolge der Abstandsabhängigkeit wächst bei Fingerbewegung eine der Kapazitäten, während sich die andere verringert. Auf diese Weise wird eine differenzielle Abstandsmessung ermöglicht. Da die Kapazität eines Einzelfingers bei typischen Schichtdicken von einigen wenigen μm bis zu etwa $50 \mu\text{m}$ sehr klein ist, greift man

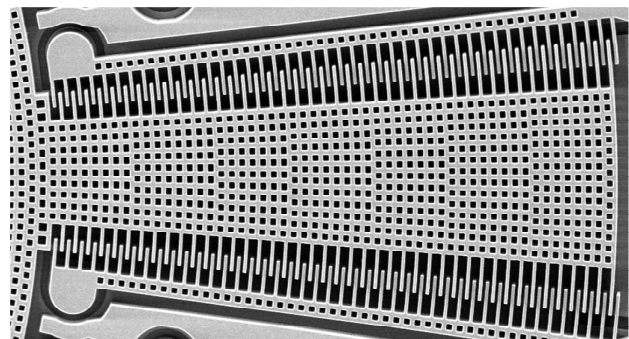


Abbildung 2: Radiale Kammstruktur

in der Regel auf vielfingrige Kammstrukturen zurück.

Abb. 2 zeigt ein Beispiel einer etwas anderen Ausführungsform eines kapazitiven Wandler, bei dem die durch Drehung des Innenträgers verursachte Kapazitätsänderung durch Änderung der Eintauchtiefe der beweglichen Finger zwischen die fixierten Fingerelektroden hervorgerufen wird.

Typisch sind die abgebildeten Ätzlöcher, mit deren Hilfe die unter dem Polysilizium liegende Opferschicht leichter weggeätzt werden kann.

Die Dynamik der beweglichen Masse m des abgebildeten Beschleunigungssensors kann in erster Näherung durch eine lineare Differentialgleichung beschrieben werden:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + k_x(x - x_0) = ma_x + N_B \quad (1)$$

in der c - die Dämpfungskonstante, a_x - die einwirkende Beschleunigung, x_0 - die Nullpunkt-auslenkung und N_B - das mechanische Brown'sche Rauschen darstellen. Die Gleichung soll der Illustration der wichtigsten Einflußfaktoren und Effekte dienen. So ist das mechanische System in eine gasförmige Umgebung eingebettet und den verschiedensten geschwindigkeitsproportionalen fluidischen bis molekularen Dämpfungsmechanismen wie Slide- und Squeeze-Film Dämpfung sowie thermoelastischen Dämpfungsverlusten in der Struktur selbst unterworfen. Hunderte wissenschaftliche Beiträge sind der Modellierung dieser Wirkungsmechanismen gewidmet und versuchen den Einfluß von Geometrie incl. Perforation (Ätzlöcher!), Viskosität der verschiedenst ausgedünnten Gase bis hin zur molekularen Stoßtheorie, Nichtlinearität der Dämpfungsterme usw. zu erfassen. Squeeze-Film Dämpfung, wie sie für sich aufeinander zu bzw. voneinander weg bewegende Platten typisch ist (jedoch nicht relevant für unser slide-damping determiniertes Beispiel nach Abbildung 1(a)), ist darüber hinaus oft mit dem Auftreten nicht vernachlässigbarer Federkräfte verbunden.

Die Dämpfungskonstante c bzw. ihr normalisiertes Pendant $\delta = \frac{1}{2}c/\sqrt{k_x m}$ bestimmt das dynamische Verhalten des mechanischen Systems. Für unterkritische Dämpfung ($\delta < 1$) treten bei Anlegen einer stufenförmigen Beschleunigung oszillatorische Überschwingungen auf; bei überkritischer Dämpfung ($\delta > 1$) verzögert sich die Reaktion mit wachsendem δ immer stärker. In der Regel strebt man eine kritische Dämpfung ($\delta = 1$) an. Eine weitere wichtige Dimensionierungsgröße ist die natürliche Resonanzfrequenz $f_0 = \omega_0/2\pi$ des Systems, die durch $\omega_0 = \sqrt{k_x/m}$ gegeben und umgekehrt proportional zur mechanische Empfindlichkeit des Systems ist. Die mechanische Bandbreite des Systems ist hingegen direkt proportional zu ω_0 , so daß ein fundamentaler Konflikt zwischen großer Bandbreite und hoher Empfindlichkeit besteht. Dieser Konflikt kann zumindest teilweise aufgelöst werden, indem man mit Hilfe kapazitiver Aktuatoren Rückstellkräfte einführt und die entsprechend zu dimensionierende negative Rückkopplung zur Optimierung von Dynamik und Empfindlichkeit nutzt. Wichtiges Motiv für die Nutzung rückgekoppelter Beschleunigungsmesser ist jedoch oft die Verringerung der mechanischen Auslenkungen und damit des Einflusses von Nichtlinearitäten sowie der Streßbelastung.

Die Federkonstante k_x repräsentiert die Elastizität der gesamten Aufhängung in x-Richtung. Für große Auslenkungen sind immanente, meist kubische Nichtlinearitäten nicht mehr vernachlässigbar und können sogar zu Hystereseeffekten und damit verbundenen Instabilitäten in der Abhängigkeit der Resonanzfrequenz von der Auslenkung führen. Dieser Effekt ist weniger für Sensoren von Bedeutung, als für Resonatoren mit beachtlichen Deflexionen wie sie als Teilelemente von Vibrationsgyroskopen verwendet werden.

Zu beachten ist das Lebensdauerverhalten der Federung. Nichtstationäre Oberflächeneffekte und innere Streßauf- bzw. Abbauphänomene, deren Natur nach wie vor Gegenstand intensiver

Untersuchungen ist, führen nicht nur zu Veränderungen der Federkonstante, sondern auch zur Migration der Nullpunktposition, x_0 , der bewegten Masse. Beide Parameter sind entscheidend für die Stabilität von Nullpunkt und Empfindlichkeit des Sensors, wobei die sg. Biasstabilität in der Regel den kritischeren Parameter darstellt. Die Nullpunktposition selbst, die durch Formungenauigkeiten der Federelemente sowie geometrische Justage- und Ausrichtungsfehler bedingt ist, kann ja - sofern stabil - elektronisch kompensiert werden, während Stabilitätsfehler eine fundamentale Beschränkung darstellen. Dabei ist das kristalline Bulk-Silizium bezüglich Stabilitätsverhalten dem kornstrukturierten Polysilizium überlegen, führt jedoch vor allem bei Drehratensensoren zu wesentlich aufwendigeren und teureren Konstruktionen.

Die Formungenauigkeiten sowie Justagefehler sind auch eine Ursache für Querempfindlichkeiten von Beschleunigungssensoren. Allerdings spielt für diese die Justagegenauigkeit des Sensors in der Verpackung sowie deren Ausrichtung auf der Leiterplatte eine wesentlich größere Rolle.

Generell kann der Einfluß der Verpackung dramatische Konsequenzen haben, wenn thermisch induzierter Streß das Trägermaterial verformt und damit die Ankerpunkte der Aufhängung zu wandern beginnen. Verpackung von Trägheitssensoren bedeutet nicht nur Primärkapselung (das sg. Zero-Level Packaging) mit Schaffung des Operationsraumes, sondern auch möglichst preiswerte Verpackung des Gesamtsystems in einem Gehäuse mit allen Außenanschlüssen zur Montage auf der Leiterplatte (das sg. First-Level Packaging). Während die Primärverpackung überwiegend mit Hilfe von Bondprozessen auf Waferebene erfolgt, ist die Endverpackung ein Einzelteilprozeß. Aus Kostengründen wird - wo irgend möglich - Plastikverpackung bevorzugt. Dabei wird der Sensor mit einem i.d.R. metallischen Träger verklebt und danach plastikummantelt. Auch bei anderen Materialien wie Keramik oder Metal ist die thermische Anpassung an den primärverpackten Sensor ein Schlüsselproblem. Um den durch die thermische Fehlanpassung erzeugten Streß möglichst gering zu halten, versucht man diesen mit "weichen" Klebern und ggf. weiteren Zwischenummantelungen in vorgegebenen Grenzen zu halten. Man beachte jedoch, daß eine zu weiche Einbettung die einwirkende Beschleunigung verfälscht, da sich der gesamte primärgekapselte Sensor relativ zur Montageplattform bewegen kann.

Da wegen des komplizierten und oft nicht genügend genau bekannten Materialverhaltens trotz Einsatzes aller verfügbaren Modellierungsmethoden die Unsicherheit bezüglich Verpackungseinfluß auf das thermische Verhalten und die Langzeitstabilität des Sensors sehr hoch ist, schließen sich umfangreiche und teure Test- und Qualifizierungsprogramme an, die nicht ungewöhnlicherweise zu mehreren Verpackungsiterationen führen können.

Ein Schlüsselparameter aller Sensoren ist ihre Auflösung. Sie wird limitiert durch das elektronische und mechanische Rauschen, wobei letzteres vor allem durch den stochastischen Charakter der Wechselwirkungsprozesse zwischen bewegter Masse und dem umgebenden gasförmigen Medium bedingt ist und den anzustrebenden Auflösungsgrenzwert bestimmt. Für mechanische Systeme mit einem Freiheitsgrad ergibt sich aus thermodynamischen Überlegungen (s. z.B. [Gabrielson, 1993]) eine spektrale Rauschleistungsdichte von $S_B = 4kTc$; (k - Boltzmannkonstante, T - absolute Temperatur, c - Dämpfungskonstante). Vakuumkapselung der bewegten Massen reduziert zumindest den in der Regel dominanten Anteil der Gasdämpfung bis zu dem Punkt, bei dem die strukturellen Dämpfungsmechanismen wirksam werden. Drehratensensoren sind darüber hinaus oft auf Vakuumbedingungen angewiesen, um die notwendigen Primäroszillationen mit den zur Verfügung stehenden geringen Antriebskräften realisieren zu können (s.u.).

Im Falle des betrachteten Beschleunigungssensors schließt sich an das mechanische System eine geeignete Elektronik an, die die auslenkungsinduzierten Kapazitätsänderungen erfaßt, die winzigen Signale weiter verstärkt und ggf. für Rückkopplungsmechanismen, für Kalibrierung und

Testung bereitstellt. Klarerweise müssen vor allem die ersten Stufen der Signalverarbeitungskette extrem rauscharm sein. Die gesamte Elektronik sollte darüber hinaus linear und temperaturunabhängig funktionieren. Generell wäre ohne den maßgeblichen Beitrag moderner und oft grundsätzlich neuer Methoden der elektronischen Signalverarbeitung der Erfolg der Trägheitssensoren nicht möglich gewesen.

Die an Hand des Beispiels dargelegten Aspekte sind für die meisten MEMS-Trägheitssensoren charakteristisch, aber bei weitem nicht vollständig. Hinzu kommen solche Probleme wie die Sicherung aller Leistungsparameter über den Arbeitstemperaturbereich, die Garantie der Stabilität des Operationsraumes über die Lebensdauer (Ausgasungsprozesse, Leckverluste etc.), die Gewährleistung der Schock- und Vibrationsfestigkeit bei vor allem im Automobilbereich enormen Anforderungen u.v.a.m. Sie dürften jedoch ein erstes Bild von der Komplexität des Gebietes vermitteln und helfen, die weiteren Prinzipialbeschreibungen in diesen Kontext einzubetten.

Weitere Prinzipien der Beschleunigungsmessung

Der eben betrachtete Beschleunigungssensor wird in vielfältigen Modifikationen zur Messung der in der Waferebene liegenden Beschleunigungskomponente eingesetzt. Ebenfalls populär sind kapazitive Feder-Masse Akzelerometer für die Messung aus der Waferebene heraus wirkender Beschleunigungen sowie von Winkelbeschleunigungen. In Abb. 3 sind die entsprechenden Grundstrukturen dargestellt.

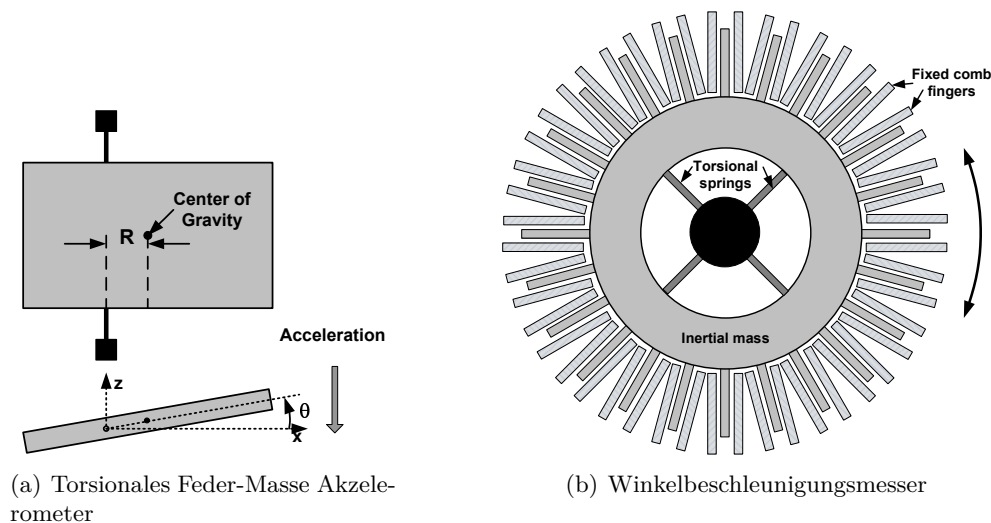


Abbildung 3: 1D Akzelerometer Prinzipien (nach Kempe [2011])

Im ersten Falle (Abb. 3(a)) ist eine Platte unsymmetrisch an zwei Torsionsfedern aufgehängt, so daß sie unter Einfluß einer vertikalen Beschleunigung verkippt. Die resultierenden Kapazitätsänderungen zweier rechts und links unterhalb der Platte symmetrisch angebrachter Gegenelektroden sind mit entgegengesetzten Vorzeichen proportional zum Drehwinkel und damit ein Maß für die wirkende Beschleunigung. Ähnlich führt die unter dem Einfluß einer Winkelbeschleunigung hervorgerufene Verdrehung der in Abb. 3(b) gezeigten Ringstruktur zur Änderung der differentiellen Kapazität zwischen den bewegten und den einbettenden, fixierten Fingerelektroden.

Das Feder-Masse Prinzip wird ebenfalls zum Aufbau von 2D-Akzelerometern mit zwei Freiheitsgraden herangezogen, indem z.B. die Federaufhängung der Platte gemäß Abb. 1(a) so ge-

staltet wird, daß Auslenkungen in beiden orthogonalen Richtungen in der Waferebene ermöglicht werden. Die schwierigere Kontrolle von Nullpunktstabilität, Empfindlichkeit sowie Querempfindlichkeit macht ähnlich hochgenaue Messungen wie mit 1D-Akzelerometern problematisch und weist derartigen Systemen in der Regel einen Platz unter den Produkten niedrigerer Leistung zu.

Neben kapazitiven Beschleunigungssensoren haben piezoresistive Akzelerometer weite Verbreitung gefunden. Sie sind die eigentlichen Pioniere bei den MEMS-Akzelerometern gewesen. Mittels bulk-micromachining gefertigte Silizium-Testkörper beachtlicher Größe und Masse, aufgehängt an Biegebalken verschiedenster Konstruktionen, sind bestens an piezoresistive Meßwandler anpaßbar und gewährleisten eine hohe Empfindlichkeit. Die Piezoresistoren lassen sich einfach durch Dotierung der entsprechenden Oberflächenbereiche der Biegebalken herstellen. Ihre streßabhängige Widerstandsänderung im anisotropen kristallinen Silizium ist allerdings stark temperaturabhängig (ca. $0.25\%/^{\circ}\text{C}$) und überdeckt die durch die Beschleunigung hervorgerufenen streßinduzierten Abweichungen bei weitem. Deutlich weniger temperaturabhängig (ca. $0.05\%/^{\circ}\text{C}$) sind die Piezoresistance-Koeffizienten von Polysilizium, dessen Piezoeffekt durch Vorzugsorientierung der sich bei der Abscheidung bildenden Kornstrukturen bedingt ist. Jedoch sind auch hier von vornherein Temperatur-Kompensationsmaßnahmen zu ergreifen. In Abb.4(a)

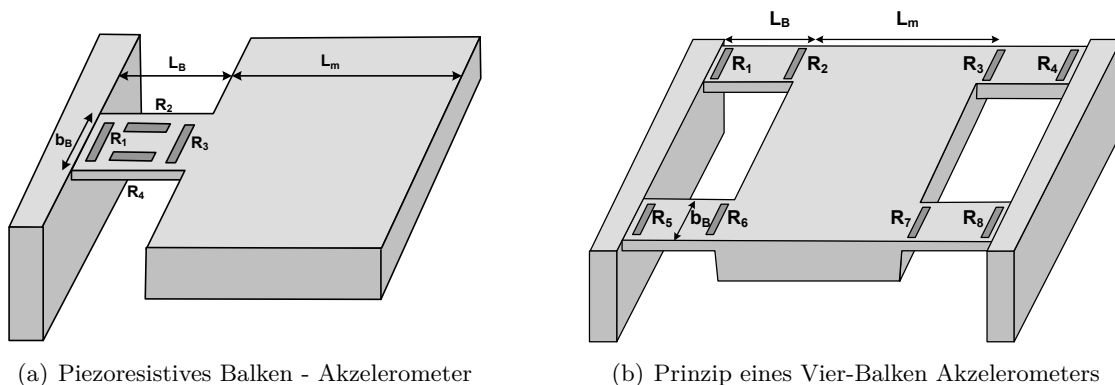


Abbildung 4: Piezoresistive Beschleunigungsmesser

ist ein einfaches Balken-Akzelerometer aus Bulk-Silizium dargestellt, dessen Funktionsweise dem oben erwähnten Beschleunigungssensor von Roylance and Agnell ([Roylance and Angell, 1979]) entspricht. Die angedeuteten dünnen Piezoresistoren erfassen den horizontalen Balkenstreß (vertikale Streßkomponenten können wegen der geringen Höhe der Widerstände keine nennenswerten Änderungen hervorrufen, Shear-Streß ist vernachlässigbar). Im Falle p-dotierter Resistoren läßt sich eine nette Anisotropieeigenschaft für den Aufbau einer effektiven Temperaturkompensation nutzen. Wenn nämlich zwei Piezowiderstände in der (100)-Ebene parallel bzw. senkrecht zur [110]-Achse angeordnet werden, so sind ihre streßbedingten Änderungen etwa gleich groß, jedoch von umgekehrten Vorzeichen. Je zwei Paare derartiger Widerstände, arrangiert in einer Wheatston-Meßbrücke, liefern dann ein weitgehend temperaturunabhängiges, streßproportionales Ausgangssignal, da ja idente temperaturbedingte Änderungen der Widerstände keine Verstimmung der Brücke bewirken.

Nachteil der einfachen Balken-Sensoren ist ihre Querempfindlichkeit: wegen dem unterhalb der Balkenmittellinie liegendem Schwerpunkt des Testquaders wird eine Auslenkung nicht nur durch vertikale Beschleunigungskomponenten, sondern ebenfalls durch laterale Beschleunigungen erzeugt. Abhilfe liefern verschiedene symmetrische Balkenaufhängungen, wie z.B. die in

Abb. 4(b) gezeigte Vier-Balken Aufhängung. Eine vertikale Beschleunigung führt in gleichem Abstand von den Enden eines gegebenen Balkens zu gleich großen kompressiven bzw. tensilen Streß, so daß die Piezowiderstände in der Nähe der Balkenenden sich mit umgekehrten Vorzeichen ändern - wieder eine ideale Voraussetzung für den Aufbau einer Wheatston-Brücke.

Betragsmäßig gleich große kompressive und tensile Streßkomponenten in beschleunigungsinduzierten Balkendeformationen werden auch bei komplizierteren Aufhängungen von Probekörpern mit mehreren Freiheitsgraden gern genutzt. Amarashinge u.a. ([Amarasinghe et al., 2006]) konstruierten auf diese Weise einen in allen drei Achsen empfindlichen Beschleunigungssensor, indem sie das Streßmuster in einer Vier-Balken-Aufhängung eines Kubus analysierten und die für die jeweiligen Beschleunigungen relevanten Komponenten in drei Wheatston-Brücken erfaßten. Es gelang ihnen sogar in einer ähnlichen Konstruktion zusätzlich die drei Winkelbeschleunigungen aufzunehmen und somit einen 6D-Akzelerometer-Prototypen zu demonstrieren ([Amarasinghe et al., 2007]). Kommerziellen Erfolg hatten derartige Multi-Komponent-Sensoren jedoch nicht, während Parallelanordnungen von drei piezoresistiven 1D-Sensoren (z.B. [Dong et al., 2008]) deutlich bessere Erfolgchancen besitzen.

Neben piezoresistiven Beschleunigungssensoren verdienen piezoelektrische Akzelerometer Beachtung. Als klassische mikromechanische Produkte haben sie eine lange Tradition und belegen bis heute beachtliche Marktanteile. Piezoelektrische MEMS-Akzelerometer haben sich hingegen bis heute nicht recht durchsetzen können, was zweifellos damit zusammenhängt, daß Piezoelektrika nicht zu den mikroelektronik-freundlichen Materialien gehören und zusätzlichen Integrationsaufwand erfordern, den allerdings einige japanische Firmen vor allem im Bereich der Drehratensensoren erfolgreich meistern.

Da durch Streß bzw. durch die äquivalenten Deformationen erzeugten Ladungen eines piezoelektrischen Sensors durch unvermeidliche Verlustströme verloren gehen, sind derartige Sensoren für Messungen von konstantem Streß (konstanten Beschleunigungen) ungeeignet. Allerdings kann ihre Bandpaßcharakteristik dank modernster Isolationstechniken bis tief in den Bereich von Bruchteilen eines Hertz ausgedehnt werden, was in den meisten praktischen Fällen ausreicht.

Ein Vorteil der Piezoelektrika gegenüber Piezowiderständen ist die Möglichkeit, sie gleichfalls als Aktuatoren verwenden zu können und somit rückgekoppelte Systeme zu realisieren. Diese Möglichkeit wurde weniger bei Beschleunigungssensoren sondern vor allem bei der Entwicklung von Drehratensensoren genutzt.

Unter den Feder-Masse-Systemen verdienen noch die Tunnel-Akzelerometer Erwähnung. Sie nutzen Tunnelstrom-Transducer, bei denen der Tunnelstrom über einen winzigen Spalt zwischen einer metallischen Spitze und einer ebenen Elektrode gemessen wird. Da die Größenordnung des Spaltes einige Atomlängen beträgt, sind scharfe Spitzen oder Keile notwendig, um gut definierte Abstände und genügend große elektrische Felder realisieren zu können. Der generierte Tunnelstrom I_t ist abhängig von der Spaltgröße

$$I_t = I_0 e^{-\alpha_I \sqrt{\Phi} z} \simeq I_0 e^{-0.725 \cdot 10^{10} z} \quad (2)$$

wobei $\alpha_I = 1.025 \text{ \AA}^{-1} eV^{-0.5}$ eine Konstante darstellt, $\Phi \simeq 0.5 eV$ ist die Tunnelbarriere, die typischerweise bei $0.5 eV$, liegt, und I_0 ist proportional zur angelegten Vorspannung V_B über den Tunnelspalt z . Ist der anfängliche Spalt z.B. $z_0 = 10 \text{ \AA}$ groß, so ergibt sich daraus eine ungeheure Auslenkungsempfindlichkeit von etwa 70 \%/\AA . Derartige Systeme werden deshalb in komplizierten Rückkopplungsschleifen betrieben, um sowohl den statischen Abstand zu kontrollieren als auch die dynamischen Auslenkungen so gering wie möglich zu halten. Vor allen

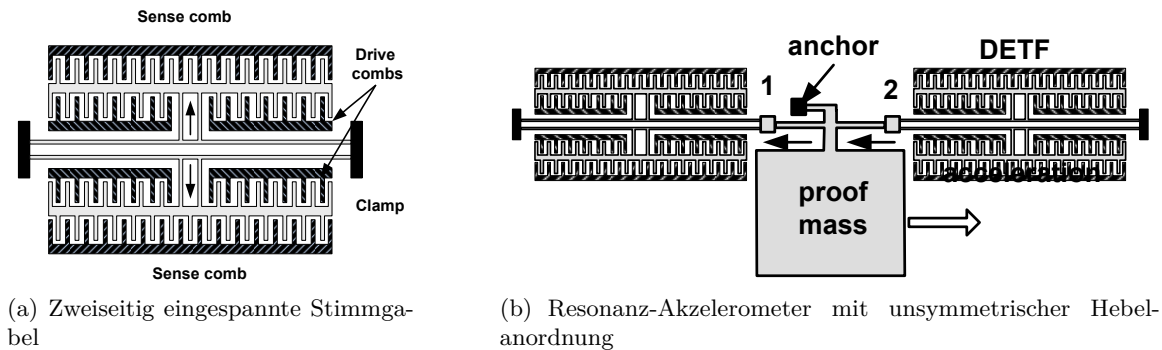


Abbildung 5: Resonanz-Akzelerometer

Lebensdauerprobleme der Tunnelspitzen, die ja erheblichen Verschleiß ausgesetzt sind, haben bisher den kommerziellen Einsatz dieser Systeme verhindert.

Die bisher beschriebenen Beschleunigungssensoren waren allesamt auslenkungssensitiv. Auch einfache Balkenakzelerometer ohne zusätzliche Testmassen - übrigens ein typisches System mit verteilten Parametern wie es z.B. von Brandl und Kempe ([Brandl and Kempe, 2001]) erfolgreich demonstriert wurde - entsprechen dieser Doktrin. Die Auslenkungen folgen der einwirkenden Beschleunigung. Mit Resonanzsensoren kann die einwirkende Beschleunigung jedoch direkt in eine frequenzmodulierte Schwingung transformiert werden, was u.a. Vorteile für die nachfolgende Signalverarbeitung mit sich bringt.

Als streßabhängiger Resonator wird dabei vorwiegend ein beidseitig eingespannter Balken verwendet. Werden die Einspannungen aufeinander zubewegt, entsteht kompressiver Streß, bei Zug - tensiler Streß. In Abhängigkeit vom eingepprägten Streß ändert sich die natürliche Resonanzfrequenz der Balkenlängsschwingungen, die von einigen Dutzend kHz bis zu mehreren 100 kHz betragen kann.

In Abb. 5(a) ist eine Anordnung mit zwei Balken gezeigt, die jeweils durch die inneren rechts- und linkstreibenden kapazitiven Antriebskämme erregt werden. Aufgenommen werden die Längsschwingungen des Balkens durch die äußeren Kämme, so daß durch einen einfachen Phasenregelkreis das Antriebssignal auf die Resonanzfrequenz gesetzt werden kann.

Natürlich ist die Masse der Balken viel zu klein, um relevanten beschleunigungsinduzierten Streß zu erzeugen. Deshalb wurden verschiedenste Konstruktionen ausgeklügelt, bei denen Probmassen über Hebel den entsprechenden Druck oder Zug an den Balkeneinspannungen erzeugen. Ein frühes Beispiel nach [Roessig et al., 1997] bzw. [Seshia et al., 2002] ist in Abb. 5(b) dargestellt. Die Hebelwirkung der surface-micromachined Probmasse erzeugt bei einer der Stimmgabelstrukturen kompressiven, bei der anderen - tensilen Streß. Die Abweichungen der Resonanzfrequenzen weisen somit umgekehrtes Vorzeichen auf. Durch Abwärtsmischung beider Signale entsteht ein Signal mit doppelter Verschiebungsfrequenz. Typische Empfindlichkeiten liegen in der Größenordnung von einigen Dutzend Hz/g.

Anstelle elektrostatischer Anregung wurden vielfach auch thermische Erregungsmechanismen eingesetzt, bei denen der Resonanzbalken durch eingebettete lokale Heizer in Schwingungen versetzt wird. (z.B. [Aikele et al., 2001], [Ohlckers et al., 1998], [Burrer and Esteve, 1995], [Ferrari et al., 2005]). Bei guter thermischer Isolation lassen sich erstaunlich hohe Resonanzfrequenzen erreichen. Die Schwingungsaufnahme erfolgt dabei durch Piezoresistoren in der Nähe der Balkenenden, wo der Streß am ausgeprägtesten ist.

Obwohl Resonanzakzelerometer robust, genau und signalverarbeitungsfreundlich sind, ha-

ben sie am Markt keine relevante Position erobern können. Ähnlich erging es den konvektiven Akzelerometern, denen die sich unter Beschleunigungseinfluß ändernde thermische Ausbreitung in gasförmigen oder flüssigen Medien zugrunde liegt. Ein zentraler Heizer erzeugt z.B. in einer quaderförmigen, gasgefüllten Kavität ein symmetrisches Temperaturprofil, das sich unter Beschleunigungseinfluß infolge des asymmetrisch werdenden Konvektionsflusses verschiebt (s. z.B. [Luo et al., 2001], [Leung et al., 1997]). Rechts und links vom zentralen Heiz-“draht” symmetrisch positionierte Thermistoren oder Thermopiles erfassen die Temperaturabweichungen. Da konvektive Sensoren keine bewegten Teile aufweisen, sind sie eigentlich prädestiniert für extrem shock- und vibrationsrobuste Produkte, konnten sich aber vor allem wegen der niedrigen Reaktionszeiten (geringe Bandbreiten) nicht durchsetzen.

Im Gegensatz dazu haben die von der Firma MEMSIC vertriebenen robusten Bubble-Akzelerometer erstaunlichen Erfolg erringen können. Sie beruhen auf der beschleunigungsinduzierten Wanderung einer Gasblase im flüssigen Medium, wie in Abb. 6 dargestellt. Ein zentral

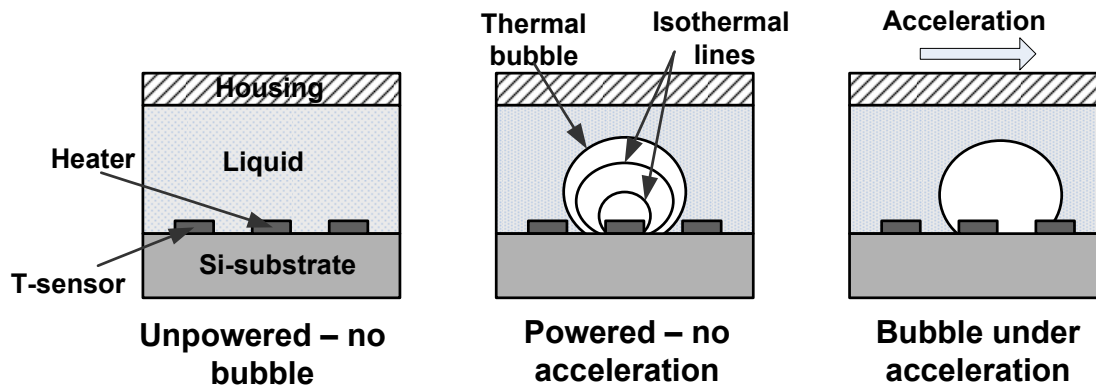


Abbildung 6: Thermisches Bubble-Akzelerometer

angeordneter Heizer verdampft nach Einschalten des Sensors einen Teil der eingeschlossenen Flüssigkeit, so daß sich eine Gasblase bildet. Unter Beschleunigungseinfluß verschiebt sich die Blase in Beschleunigungsrichtung, da sich die trägere Flüssigkeit entgegengesetzt bewegt. Die entstehende Temperatur-Asymmetrie wird durch zwei (oder mehr) symmetrisch angeordnete thermische Sensoren erfaßt und in das beschleunigungsproportionale Ausgangssignal transformiert. MEMSIC vertreibt erfolgreich 1D- und 2D-Beschleunigungssensoren für Meßbereiche von 0.25 bis 35 g.

Das Repertoire der verfügbaren Meßprinzipien ist mit den geschilderten Entwicklungen bei weitem nicht ausgeschöpft. Insbesondere fluidische, magnetische, optische und (nicht elektrostatische) elektrische Verfahren harren ebenso wie neue mechanische Konstruktionen z.B. mit gedrehten Balkenelementen ihrer Integration vor allem in die Welt der mehrdimensionalen Beschleunigungssensoren und ihrer Kombination mit den Drehratensensoren.

Gyroskope

Ein Gyroskop im engeren Sinne ist ein Kreiselinstrument, das zur Messung von Winkelgeschwindigkeiten benutzt werden kann. Jedoch wird dieser Begriff heute generell auch für jede Art von Drehratensensoren benutzt, insbesondere für MEMS-Drehratensensoren mit vibrierenden Probenmassen. Schlüssel zum Verständnis dieser Konstrukte ist die Corioliskraft, die als massepropor-

tionales Vektorprodukt von relativer Geschwindigkeit eines Festkörpers, \bar{v} , und Drehgeschwindigkeit der Plattform, $\bar{\Omega}$, definiert ist:

$$\bar{F}_C = -2m[\bar{\Omega} \times \bar{v}]. \quad (3)$$

Für mit Winkelgeschwindigkeit $\bar{\omega}$ im Plattformkoordinatensystem rotierende Probmassen entsteht analog ein Coriolismoment, das man nach [Kempe, 2011], Kapitel 8, darstellen kann als

$$\bar{M}_C = -2[\mathbf{J}^D \bar{\Omega} \times \bar{\omega}]. \quad (4)$$

\mathbf{J}^D sind die weiter unten erläuterten dyadischen Trägheitsmomente.

Beim klassischen Gyrostat nach Abb. 7(a) wird ein verkippbares Schwungrad auf konstante Winkelgeschwindigkeit ω_1 geregelt. Die Drehachse \bar{e}_1 ist die Antriebs- oder Primärachse, die Kippachse \bar{e}_3 - die Meßwertgeber- oder Sekundärachse. Eine Plattformdrehung mit Winkelgeschwindigkeit Ω_2 um die zu Dreh- und Kippachsen orthogonale Achse \bar{e}_2 erzeugt ein um die Kippachse wirkendes Coriolismoment, dessen Größe z.B. durch ein kompensierendes Moment gleicher Größe bestimmt werden kann.

Da verschleißfeste Drehlager im MEMS-Bereich schwierig zu realisieren sind, kommen dort vorwiegend oszillierende Massen zum Einsatz wie z.B. in Abb. 7(b) und 7(c) angedeutet. Eine in der $\bar{e}_1 - \bar{e}_3$ - Ebene (\bar{e}_3 - entspricht der vertikalen z-Achse) schwingende Saite erfährt unter Einfluß einer Plattformdrehung um die z-Achse eine Auslenkung aus der Ebene heraus, deren Größe die Plattform-Winkelgeschwindigkeit charakterisiert.

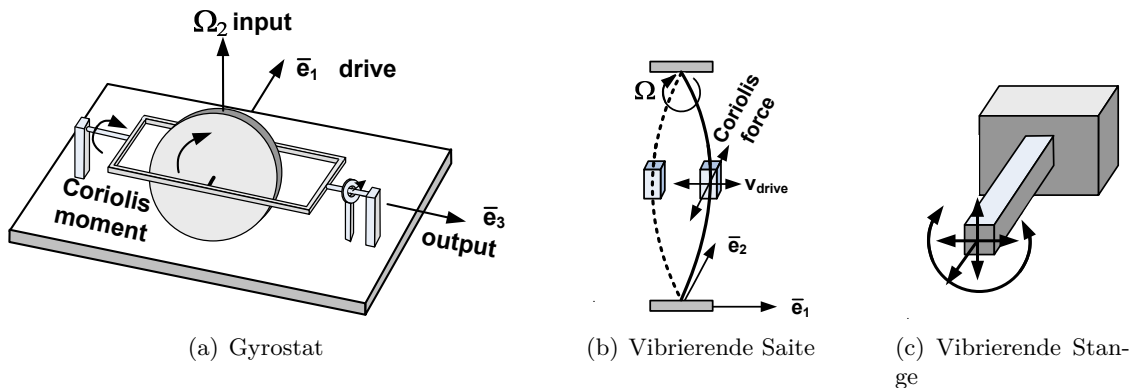


Abbildung 7: Prinzipien Coriolis-Kraft-basierter Drehratenmessung

Offensichtlich führt auch bei der in Abb. 7(c) gezeigten, oszillierenden Stange eine Plattformdrehung um die Längsachse zu einer Vibrationsschwingung orthogonal zur Richtung der Primärerregung, die wiederum ein Maß für die Geschwindigkeit der Plattform-Drehung ist. Stangenförmige Gyroskope wurden von der japanischen Firma Murata erfolgreich zur Stabilisierung von Kameras und Spielkonsolen zum Einsatz gebracht.

Sehr erfolgreich wurde in der Frühphase der MEMS-Trägheitssensoren das in Abb. 8(a) erläuterte Stimmgabelprinzip umgesetzt. Die beiden Gabelzinken werden in der Stimmgabelebene gegenphasig in Schwingungen versetzt, so daß die durch eine Plattformdrehung um die Stimmgabelachse entstehenden Corioliskräfte gegenphasige, oszillierende Auslenkungen der Zinken aus der Gabelebene heraus (in \bar{e}_1 -Richtung) bewirken. Neben der Messung der Auslenkungen kann ebenfalls das um die Gabelachse entstehende Drehmoment gemessen werden. Praktisch wurde das Prinzip von der US-Firma Systron-Donner in den 90-er Jahren mit Hilfe einer Quarz-

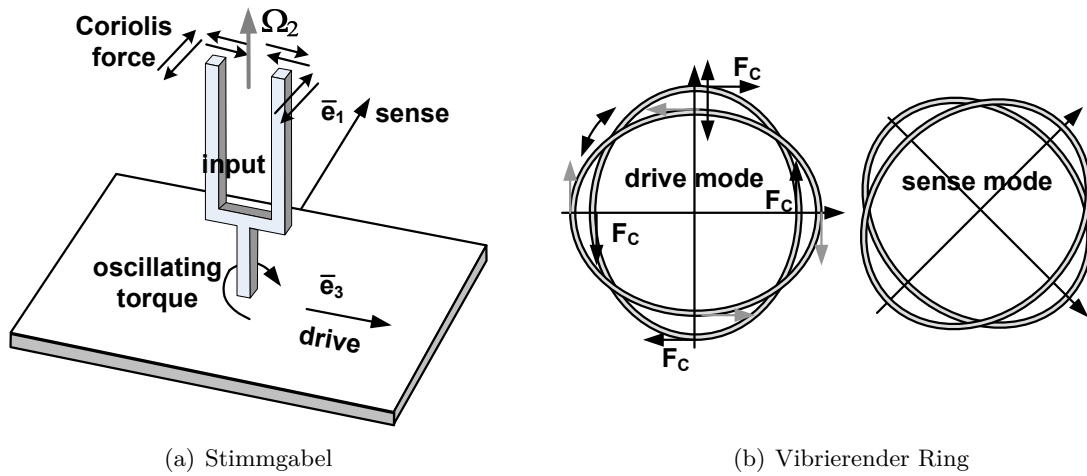
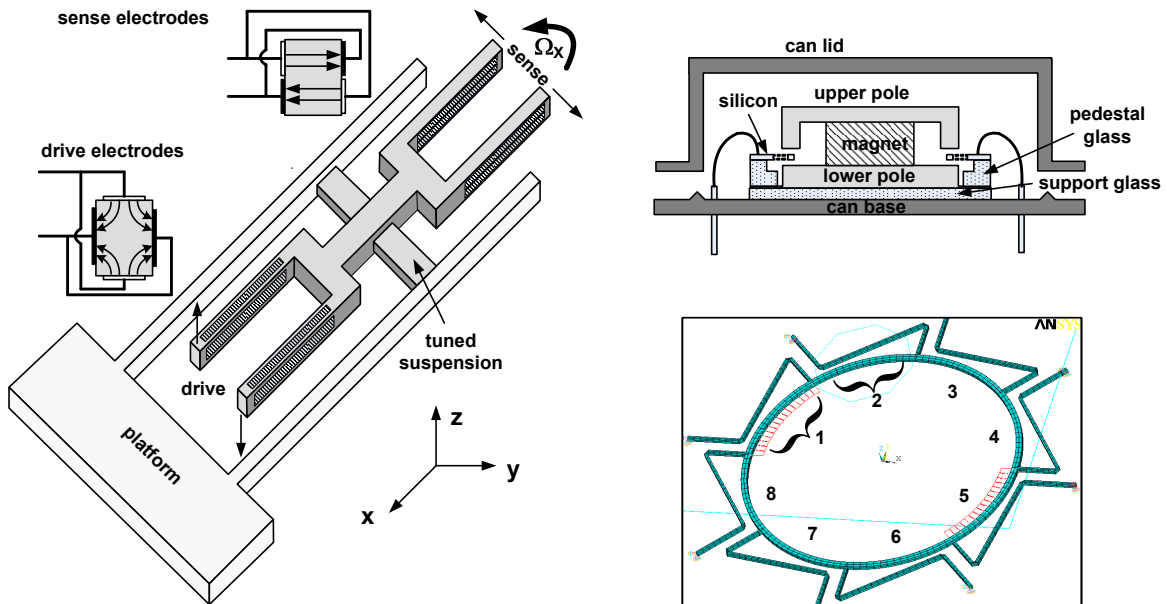


Abbildung 8: Drehratenmessung mit vibrierenden Stimmgabeln oder Schalen

Doppelstimmgabel verwirklicht, deren Zinken unter Ausnutzung der natürlichen Piezoelektrizität des Quarzes erregt und abgetastet werden ([Madni et al., 1996], [Madni et al., 2003]). Eine schematische Darstellung des Drehratensensors ist in Abb. 9(a) gezeigt, auf der auch die auf den Zinken aufgebrachtten Aktuator- und Aufnahmeelektroden zu sehen sind. Der Sensor gehört mit seiner exzellenten Auflösung (Hintergrundrauschen bis zu $0.0017(^{\circ}/s)/\sqrt{Hz}$) zu den Hochleistungsgyroskopen, die nicht nur im Automobilbereich sondern auch für Aerospace-Anwendungen geeignet sind. Wegen der Probleme bei der weiteren Miniaturisierung von Quarz-Stimmgabeln unter die erreichten 8 mm hat das Quarz-Stimmgabelprinzip jedoch zunehmend an Bedeutung verloren.



(a) Quarz-Stimmgabel. Adaptiert von Madni et al. [1996]

(b) Ring Gyroskop nach Hopkin [1997]

Abbildung 9: Quarz-Stimmgabel und Ring-Gyroskop

Ähnlich erging es den Ring-Gyroskopen des Rüstungskonzerns BAE (UK) und Silicon Sensing Systems (SSS) (Japan), die nach dem in Abb. 8(b) dargestellten Prinzip der Weinglasresonatoren arbeiten. Ein Ring (oder Zylinder) besitzt zwei ebene Resonanzmodi (genauer: ein Modipaar), die um 45° voneinander separiert sind und idealerweise die gleiche Frequenz aufweisen. Wird einer der Modi erregt, so transformieren die durch Drehung um die Ringachse erzeugten und in der Zeichnung angedeuteten Corioliskräfte einen Teil der Schwingungsenergie der Masselemente in den orthogonalen Schwingmodus. Die von BAE/SSS entwickelte Ausführung ist in Abb. 9(b) veranschaulicht. Ein an spinnenförmigen Federn aufgehängter $100\ \mu\text{m}$ hoher Silizium-Ring ist in acht elektrisch voneinander getrennte Segmente mit oben aufgebracht stromführenden Leiterbahnen geteilt. Diese werden über auf den Federn aufgebracht metallischen Zuführungen versorgt, so daß unter dem Einfluß des nahezu homogenen Magnetfeldes Lorentzkräfte in zwei der acht Segmente (z.B. 1 und 5) generiert werden können, die den Primärmodus erregen. Der durch die Corioliskräfte angeregte Sekundärmodus wird über die in zwei Segmenten (z.B. 2 und 6) induzierten Spannungen abgegriffen. Die Segmente 3 und 7 können zur Kontrolle der Primärerregung und Segmente 4 und 8 zur Einführung einer Rückkopplungsschleife für die Sekundärschwingung genutzt werden. Der Sensor besitzt bei 30 Hz Bandbreite Auflösungen um $0.15^\circ/\text{s}$ und hat sich im Automobilbereich insbesondere auch wegen der guten Shock- und Vibrationsunempfindlichkeit tapfer bewährt. Nachteilig ist vor allem die Verwendung eines äußeren Magneten sowie die komplizierte Eliminierung von Asymmetrien. Um dem abzuwehren wurde eine elektrostatische Erregung und Abtastung der Ringsegmente im Zuge einer drastischen Miniaturisierung prototypisch demonstriert ([Putty and Najafi, 1994], [Ayazi and Najafi, 1998]), fand jedoch bis jetzt keine Kommerzialisierungspartner.

Die Kopplung elastischer, akustischer Wellen in einem rotationssymmetrischen Diskus wurde ebenfalls erprobt. Die zwei Schwingungs-Grundmodi sind hier um 30° versetzt, so daß durch entsprechend separierte äußere Elektroden der Grundmodus erregt als auch die coriolis-induzierte Sekundärschwingung (im Nanometerbereich!) abgegriffen werden kann ([Johari and Ayazi, 2006]). Da hier nur Deformationen des Diskusperimeters eine Rolle spielen und keine bewegten Teile verwendet werden, ist das System für robuste Einsätze predestiniert.

Kinematik von Gyroskopen mit rigiden Testkörpern

Im letzten Jahrzehnt haben sich im MEMS-Bereich einfach zu realisierende, federnd aufgehängte flache Testkörper als Gyroskop-Grundstrukturen durchgesetzt. In Abb. 10 sind die beiden

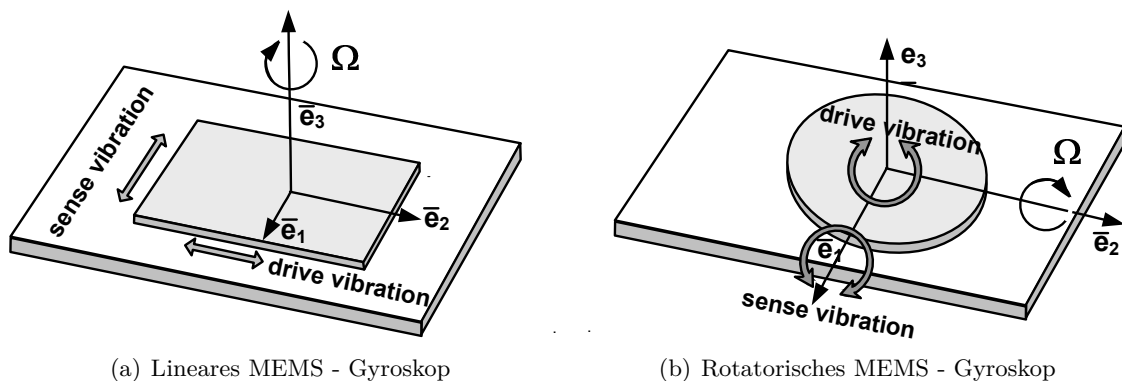


Abbildung 10: MEMS - Gyroskope mit rigiden Testkörpern

Prinzipanordnungen skizziert, wobei Aufhängungen und Antriebs Elemente weggelassen wurden. Die Platte des linearen Gyroskopes (Abb. 10(a)) wird in stabilisierte Vibrationen z.B. in \bar{e}_2 -Richtung versetzt, so daß eine aufgeprägte Drehung um die \bar{e}_3 -Achse genau definierte Sekundäroszillationen in \bar{e}_1 -Richtung generiert. Diese sg. z-Gyroskope werden ergänzt durch in-plane (x - und y -) Drehscheiben-Gyroskope (s. Abb. 10(b)), bei denen die Primäroszillation um die z -Achse (\bar{e}_3 -Achse) durch das einwirkende Coriolismoment in Kippschwingungen um die \bar{e}_1 -Achse transformiert werden.

Die Kinematik dieser Systeme wird durch Momentensatz und Drehimpulssatz determiniert. Der Momentensatz beschreibt die Schwerpunktbewegung der Platte bei Drehung der Plattform, in dem die Platte aufgehängt ist, wobei sich die Plattform voraussetzungsgemäß mit Winkelgeschwindigkeit $\bar{\Omega}$ dreht und die Bewegung im Plattformkoordinatensystem beschrieben wird.

$$m[\ddot{\bar{r}}_0 + 2\bar{\Omega} \times \dot{\bar{r}}_0 + \bar{\Omega} \times (\bar{\Omega} \times \bar{r}_0) + \dot{\bar{\Omega}} \times \bar{r}_0] = \bar{F} + m\bar{a}. \quad (5)$$

\bar{a} = ist die Plattformbeschleunigung (im Inertialkoordinatensystem) während $\dot{\bar{r}}_0$ die relative Geschwindigkeit und $\ddot{\bar{r}}_0$ die relative Beschleunigung der Platte im Plattformkoordinatensystem darstellen (\bar{r}_0 - Schwerpunktkoordinate). Der entscheidende Term für Coriolisgyroskope ist natürlich die Corioliskraft $\bar{F}_C = 2m \bar{\Omega} \times \dot{\bar{r}}_0$, während $m \bar{\Omega} \times (\bar{\Omega} \times \bar{r}_0) + \dot{\bar{\Omega}} \times \bar{r}_0$ - Zentrifugal- und Zentripetalkräfte beschreiben. \bar{F} ist die äußere Bindungskraft zwischen Platte und Plattform und muß auch solche Einflüsse wie Reibung und Dämpfung berücksichtigen. Die Corioliskraft ist um so größer, je schneller sich die Platte bewegt, die durch Antriebskräfte in harmonische Primärvibrationen $\bar{r}_0 = \bar{r}_{0,0} \sin \omega_0 t$ versetzt wird. Für die praktisch bedeutsamen Größenordnungen schneller Relativbewegungen bei relativ langsamen Plattformdrehungen ($\omega_0 \gg |\bar{\Omega}|$) können die Terme $\bar{\Omega} \times (\bar{\Omega} \times \bar{r}_0) + \dot{\bar{\Omega}} \times \bar{r}_0$ vernachlässigt werden, so daß sich ein sehr einfaches Differentialgleichungssystem ergibt:

$$m \ddot{\bar{r}}_0 = -2m \bar{\Omega} \times \dot{\bar{r}}_0 + \bar{F} + m\bar{a}. \quad (6)$$

Der Drehimpulssatz für die Rotationsbewegung einer aufgehängten Platte (z.B. nach Abb. 10(b)) ist schwieriger abzuleiten. Im Inertialkoordinatensystem führt der Drehimpulssatz zur gut bekannten Euler-Gleichung, wenn man die absoluten Winkelgeschwindigkeiten verwendet. Diese Darstellung ist jedoch für ein Verständnis der Bewegung im Plattformkoordinatensystem ungeeignet. Viele Autoren gehen deshalb bei der Analyse konkreter Strukturen auf den Lagrange-Formalismus zurück, der aber auf Grund der vielfachen Bewegungsprojektionen von einem Koordinatensystem zum anderen (wir haben es hier mit drei Koordinatensystemen zu tun: Inertial-, Plattform- und Körperkoordinatensystem) oft zu inkorrekten Ergebnissen geführt hat. Besser geeignet scheint uns deshalb eine allgemeine Erweiterung der Euler-Gleichung wie sie in [Kempe, 2011] vorgenommen wurde. Danach werden die Drehbewegungen eines Körpers im Körperkoordinatensystem beschrieben durch

$$\mathbf{J}\bar{\omega} + 2(\mathbf{J}^D \bar{\Omega} \times \bar{\omega}) + \bar{\omega} \times \mathbf{J}\bar{\omega} + \bar{\Omega} \times \mathbf{J}\bar{\Omega} + \dot{\mathbf{J}}\bar{\Omega} = \bar{M}. \quad (7)$$

\bar{M} ist das Bindungsmoment. Die Matrizen der Trägheitsmomente \mathbf{J} und der in [Kempe, 2011] eingeführten dyadischen Trägheitsmomente \mathbf{J}^D sind gegeben durch

$$\mathbf{J} = \int_V dm \begin{pmatrix} \rho_2^2 + \rho_3^2 & -\rho_1\rho_2 & -\rho_1\rho_3 \\ -\rho_1\rho_2 & \rho_1^2 + \rho_3^2 & -\rho_2\rho_3 \\ -\rho_1\rho_3 & -\rho_2\rho_3 & \rho_1^2 + \rho_2^2 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{J}^D = \int_V dm \begin{pmatrix} \rho_1^2 & \rho_1\rho_2 & \rho_1\rho_3 \\ \rho_1\rho_2 & \rho_2^2 & \rho_2\rho_3 \\ \rho_1\rho_3 & \rho_2\rho_3 & \rho_3^2 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

wobei die ρ_i die Massepunktkoordinaten des Körpers im Körperkoordinatensystem mit Ursprung im Körperschwerpunkt sind. Es ist leicht zu sehen, daß $J_{ii}^D = \int_V dm \rho_i^2 = \frac{1}{2}(\sum_j J_{jj} - 2J_{ii})$ und $J_{ij}^D = -J_{ij}$; $i \neq j$. Da für symmetrische Körper, wie sie vorwiegend verwendet werden, die Kreuzprodukte verschwinden, sind in der Praxis nur die Diagonalelemente von Bedeutung. Setzt man kleine und schnelle Körperdrehungen sowie langsame Plattformrotationen voraus, so läßt sich Gleichung 7 durch Projektion der Winkelgeschwindigkeitsvektoren in das Plattformkoordinatensystem in ein ähnlich einfaches Differentialgleichungssystem wie 5 überführen ($\omega_i = \dot{\theta}_i$):

$$\begin{aligned} J_1 \ddot{\theta}_1 + c_{\theta,1} \dot{\theta}_1 + k_{\theta,1} \theta_1 &= -2J_2^D \Omega_{P,2} \dot{\theta}_3 + 2J_3^D \Omega_{P,3} \dot{\theta}_2 + M_{D,1} + N_{B,1} \\ J_2 \ddot{\theta}_2 + c_{\theta,2} \dot{\theta}_2 + k_{\theta,2} \theta_2 &= 2J_1^D \Omega_{P,1} \dot{\theta}_3 - 2J_3^D \Omega_{P,3} \dot{\theta}_1 + M_{D,2} + N_{B,2} \\ J_3 \ddot{\theta}_3 + c_{\theta,3} \dot{\theta}_3 + k_{\theta,3} \theta_3 &= -2J_1^D \Omega_{P,1} \dot{\theta}_2 + 2J_2^D \Omega_{P,2} \dot{\theta}_1 + M_{D,3} + N_{B,3} \end{aligned} \quad (9)$$

Die θ_i sind die Drehwinkel um die entsprechenden Achsen und $\Omega_{P,i}$ - die in das Plattformkoordinatensystem projizierten Plattformdrehgeschwindigkeiten. Das Bindungsmoment wurde unter der Annahme von federnden Aufhängungen mit Federkonstanten k_i sowie geschwindigkeitsproportionaler Dämpfung $c_{\theta,i} \dot{\theta}_i$ und äußeren Antriebsmomenten $M_{D,i}$ sowie Brown'schen Rauschen $N_{B,i}$ konkretisiert.

Für eine teilweise gefesselte Platte ähnlich Abb. 10(b), jedoch mit Primärvibrationen um die \bar{e}_2 Achse gilt $\theta_3 = 0$ sowie $\theta_1 \ll \theta_2$, so daß das dominante Coriolismoment durch $2J_3^D \Omega_{e,3} \dot{\theta}_2$ gegeben ist. Für eine symmetrische, in \bar{e}_3 -Richtung dünne Platte ist aber $J_3^D = \int dm \rho_3^2$ sehr klein und ein Gyroskop, das auf dieser Bewegungsart beruht, unempfindlich und praktisch nicht einsatzfähig. Das in [Acar, 2004] bzw. [Acar and Shkel, 2009] vorgeschlagene und bezüglich Primärbewegung eifrig analysierte Konzept eines flachen, rotatorischen z-Gyroscopes ist damit äußerst fragwürdig.

Aufbau von flachen Drehratensensoren

In der Praxis werden die eben beschriebenen flachen Strukturen elektrostatisch sowohl erregt als auch abgetastet. Derartige MEMS-Vibrationsgyroskope mit zwei Freiheitsgraden haben sich her-

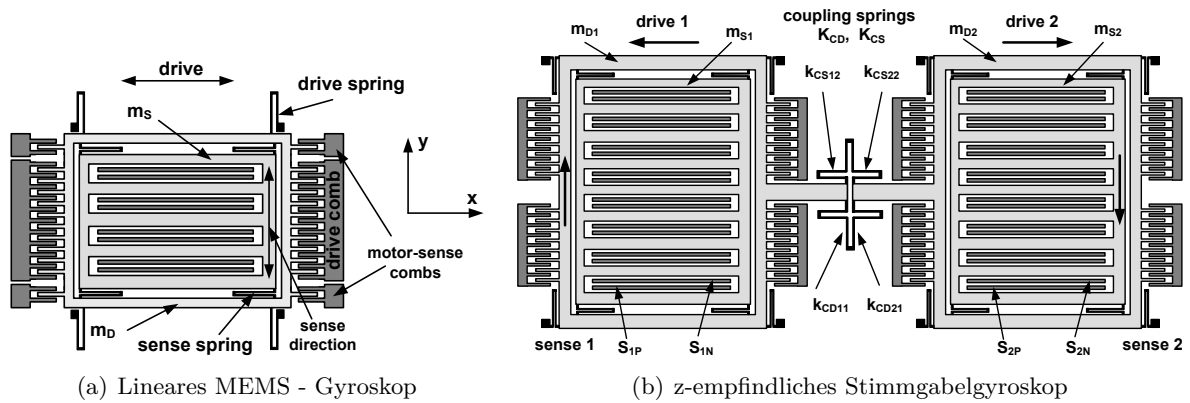


Abbildung 11: Typische z-Gyroskopstrukturen

vorrangend bewährt. Sie beruhen im wesentlichen auf der Ausbildung von zwei Funktionsblöcken: einem Aktuator, der das für die Generierung der Corioliskraft notwendige Geschwindigkeitsfeld

generiert, und einem Beschleunigungssensor, der die durch die Corioliskraft bewirkte, orthogonale Auslenkung des Testkörpers erfaßt. Beide Funktionsblöcke werden mit Hilfe von mechanischen Resonatoren realisiert, um eine möglichst effiziente Nutzung der winzigen Kräfte zu gewährleisten. Die Resonanzfrequenz des aufnehmenden Resonators soll dabei entweder exakt mit der Antriebsresonanz übereinstimmen oder aus Stabilitätsgründen bewußt einen kleinen Abstand daneben gesetzt werden.

Antriebs- und Sensorblock von z-Gyroskopen nach Abb. 10(a) lassen sich im Prinzip mit einer Testplatte, die federnd in x- und y- Richtung aufgehängt ist, realisieren. Da aber parasitäre Kopplungen zwischen den beiden in-plane Modi vermieden werden müssen, ist eine derartige Aufhängung extrem schwierig zu gestalten. Deshalb werden Federn (z.B. gefaltete Biegebalken) verwendet, die wie in Abb. 11(a) dargestellt jeweils (nahezu) nur in einem Freiheitsgrad elastisch reagieren¹. Dazu muß jedoch der Testkörper in zwei Teile aufgetrennt werden. Der äußere Antriebsrahmen ist über vier gefaltete Biegebalken auf dem Substrat verankert und kann x-Bewegungen ausführen. Die innere Sensorstruktur ist über vier gefaltete Balken am Antriebsrahmen befestigt. Beide werden gemeinsam in Primäroszillationen versetzt werden (hier in x-Richtung), während die Corioliskraft nur auf die innere Teststruktur wirken kann. Deren Auslenkungen in y-Richtung werden kapazitiv über die verankerten Elektroden in den inneren Aussparungen (Boxen) erfaßt. Am Primärrahmen sind übrigens noch Abnehmer für die Erfassung der x-Bewegung integriert. Dies ermöglicht eine genaue Regelung der Primärbewegung, die damit, nebenbei gesagt, auch die von der Sekundärbewegung nach 6 erzeugte (winzige) Corioliskraft kompensiert.

Nachteil dieser Strukturen ist ihre Sensitivität gegenüber äußeren Beschleunigungen in y-Richtung. Das Beschleunigungsspektrum im Automotivbereich kann vor allem bei Vibrationsbeschleunigungen, wie sie z.B. durch Steinschlag oder Fahren auf Schotterstrecken verursacht werden, durchaus in den Bereich des hochfrequenten Nutzspektrums hineinreichern (bis über 50 kHz), so daß sie sogar bei modernen Vibrationsgyroskopen mit Antriebsfrequenzen über 30 kHz eine nicht tolerierbare Störung verursachen.

Abhilfe schaffen Stimmgabelgyroskope wie in Abbildung 11(b) dargestellt. Zwei z-Gyroskope nach Abbildung 11(a) werden gegenphasig in Schwingung versetzt, so daß die Corioliskräfte gegenphasige Auslenkungen bewirken, während die y-Beschleunigung gleichphasige Verschiebungen verursacht. Subtrahiert man die beiden Signale der Aufnahmeboxen, so werden die durch die Beschleunigung generierten Signalanteile eliminiert. Zur phasengenauen Synchronisation beider Antriebsschwingungen werden beide Gyroskope elastisch gekoppelt.

Die parasitäre Kopplung zwischen den beiden Schwingungsmodi ist bei allen Vibrationsgyroskopen ein Problem. Die durch die Corioliskraft um Größenordnungen übertreffende Antriebskraft ruft dadurch unerwünschte Auslenkungen im Sekundärmodus hervor, die allerdings wegen der Geschwindigkeitsproportionalität der Corioliskraft um 90 ° phasenverschoben zur Sekundärdeflexion sind und deshalb als Quadratur-Bias bezeichnet werden. Ursachen parasitärer Kopplungen sind Querauslenkungen verursacht durch die elastische Aufhängung (Anisoelastizität), Geometrie- und Masseverteilungssymmetrien, Justageungenauigkeiten usw..

Generell ist die Nullpunktverschiebung (Bias) und vor allem die Nullpunktstabilität von Drehratensensoren ein entscheidender Leistungsparameter, der u.a. über ihre Eignung für Navigationsaufgaben entscheidet. Die Untersuchung der Biasstabilität führt neben Problemen elektrischer Offsets und elektronischer Kreuzkopplungen, nichtproportionaler Dämpfung, fluidischer

¹In den nachfolgenden Abbildungen sind die gefalteten Balken sowie die Finger von Kammstrukturen nicht immer einwandfrei zu erkennen - deshalb ist dort die Phantasie des Lesers gefragt

Flußkopplungen (z.B. in der Nähe von Kavitätsgrenzungen), Forminhomogenitäten usw. tief in z.T. ungeklärte Materialprobleme insbesondere zum Streßab- oder Streßaufbau in elastischen Festkörpern.

Um nun die beiden mechanischen Grundmodi auf Architekturebene besser zu entkoppeln wird mitunter noch ein zusätzlicher Rahmen zwischen Primärrahmen und innerem Testkörper eingefügt - der sg. Coriols-Frame - der dann einzige Teilkörper, der in beiden Koordinaten beweglich ist und damit die Corioliskraft generiert. Der erfolgreiche MM3-Drehratensensor von Bosch beruht auf diesem Prinzip ([Ernst, 2007], [Willig et al., 2004]). Eine SEM-Aufnahme ist in Abb. 12 eingefügt.

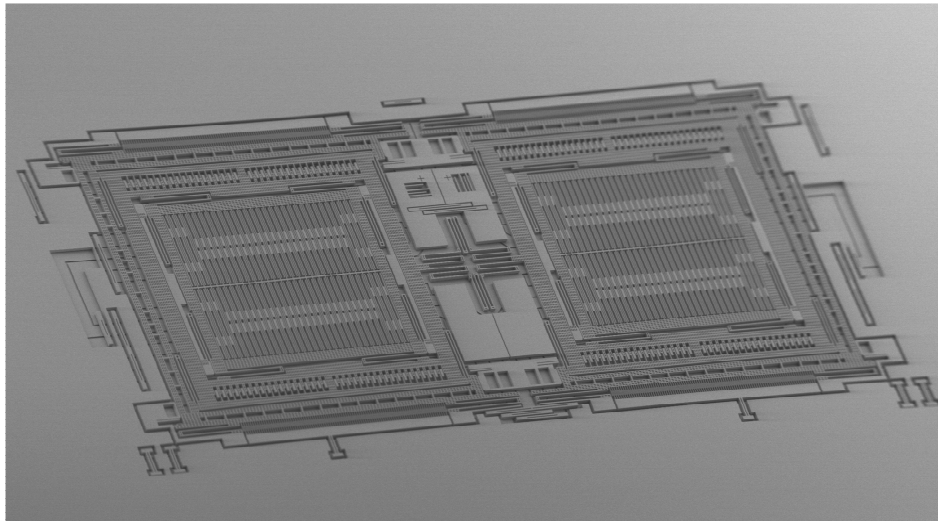


Abbildung 12: Bosch's doppelt entkoppeltes z-Gyroskop.- Courtesy of Bosch GmbH.

Die Vielzahl der in der Literatur untersuchten geometrischen Architekturen beruht auf unterschiedlichen Anordnungsprinzipien der zwei oder drei Teilrahmen. Z.B. können Antriebs- und Sensorrahmen vertauscht werden, oder der Sensorrahmen außerhalb von Antriebs- und Coriolisstruktur untergebracht werden (z.B. [Geiger and Lang, 2002]) u.s.w.. Mitunter werden multiple Antriebs- oder Sensorrahmensysteme verwendet, bei denen die gekoppelten Teilkörper leicht unterschiedliche Resonanzfrequenzen besitzen, die so gewählt werden, daß das Gesamtsystem zwar weniger empfindlich ist, dafür aber die Abgleichgenauigkeitsforderungen abgeschwächt werden können.

Neben den meist auf linearen Testkörperauslenkungen beruhenden z-Gyroskopen decken Torsionsgyroskope, wie in Abb. 13 dargestellt (s. [Funk et al., 1999]), einen großen Marktanteil der in-plane empfindlichen Drehratensensoren ab. Hier wird eine um die z-Achse drehbare und um die y-Achse kippbare Doppel-Schmetterlingsstruktur mittels der an den Flügeln ausgeprägten Antriebskämme in Resonanzoszillationen um die z-Achse versetzt. Durch Plattformdrehung um die x-Achse entstehende Coriolismomente führen zur Plattenverkipfung, wobei die gewählte Plattenform möglichst große, gegenphasige Kapazitätsänderungen zu den beiden unterliegenden Elektroden verursacht.

Ähnlich wie bei linearen Drehratensensoren versucht man auch bei Torsionsgyroskopen Primär- und Sekundärbewegung zu entkoppeln, um vor allen den störenden Quad-Bias möglichst gering zu halten. Ein Beispiel nach [Reeds and Hsu, 2002] bzw. [Reeds et al., 2003] ist in Abb. 14 gezeigt. Die innere Aufhängung ist nur noch um die y-Achse elastisch, während der die

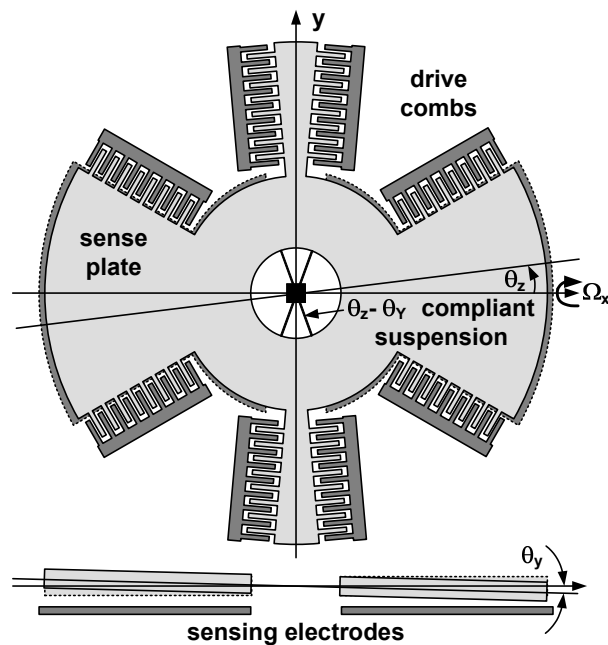


Abbildung 13: Grundstruktur eines Torsionsgyroskops

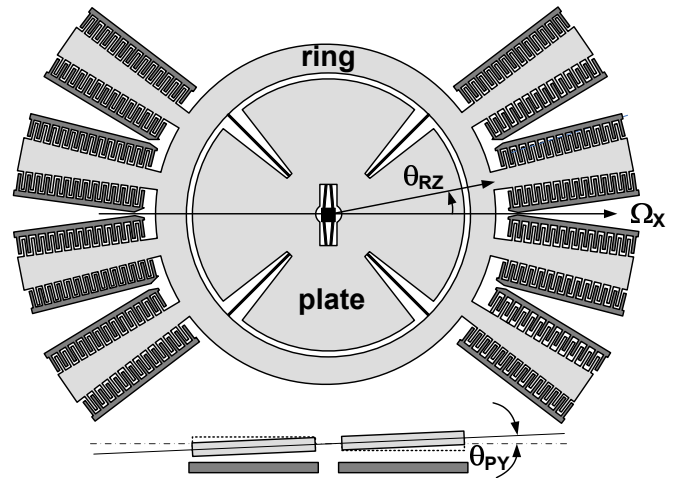


Abbildung 14: Torsionsgyroskop mit drei Freiheitsgraden

Antriebskämme tragende äußere Ring in Oszillationen um die z -Achse versetzt wird und mittels der relativ langen Federn das am Ring entstehende Coriolismoment auf den inneren Diskus überträgt. Das Ring-Diskus-System besitzt zwei Kippresonanzstellen, von denen die erste auf eine Frequenz in definiert kleinem Abstand zur Antriebsresonanz gesetzt wird; die zweite wird möglichst weit außerhalb gelegt.

Wie bei den linearen Gyroskopen wurden auch Architekturen entwickelt, bei denen der innere Teilkörper rotatorisch oszillierend angetrieben wird, und die Sensorplatte an diesem kippbar angebracht wird (s. z.B. [Geiger et al., 1999], [Geiger et al., 2002]). Trotz der benötigten Sondertechnologien fanden ebenfalls Systeme, bei denen die Antriebsoszillation um eine der in-plane-Achsen erfolgt, und die Coriolismomentreaktion zu einer Oszillation um die z -Achse führt, ihren Markt ([Adams et al., 2003]). Weiterhin wurden gekoppelte, gegenphasig angetriebene Stimmgabel-Torsionsgyroskope ([Geen, 1999]) erfolgreich erprobt. Die Aufzählung ließe sich fortsetzen, sprengt aber schon jetzt den Rahmen der Darstellung von Grundprinzipien.

Neben den 1D-Drehratensensoren haben sich 2D- und 3D-Gyroskope einen festen Platz in der Produktpalette der inertial MEMS erobert. Dabei handelt es sich überwiegend um Systeme mit synchronem Antrieb von drei mechanisch gekoppelten Teilsystemen wie z.B. beim 3D-Gyroskop für Konsumgüteranwendungen von ST Miroelectronics (Italien) oder beim 3D-Drehratensensor von SensorDynamics AG (jetzt Maxim) (s. z.B [Kempe, 2010]).

Schlußbemerkungen

Wie die meisten technischen Disziplinen zeichnet sich das Teilgebiet der mikroelektromechanischen Trägheitssensoren durch enorme Breite und Multidisziplinarität und engste Verflechtung von Forschung und Industrialisierung aus. Obwohl in den letzten beiden Jahrzehnten eine ge-

wisse Reife erzielt wurde, sind neue Impulse aus der Verschmelzung der inertial MEMS mit anderen Sensorsystemen zu erwarten als auch aus einzelnen Teildisziplinen wie Verpackung, Materialeigenschaften, neue mikro- und nanomechanische Wirkungsprinzipien und Kinematik gekoppelter Systeme.

Literatur

- Cenk Acar. Robust micromachined vibratory gyroscopes, Ph.D.thesis, section 6.3 gyroscope dynamics. *University of California, Irvine*, 2004.
- Cenk Acar and Andrei Shkel. *MEMS Vibratory Gyroscopes, sections 2.1.2 Torsional gyroscopes and 4.3.1 Torsional suspension systems*. Springer, 1st edition, 2009.
- Scott G. Adams, James Groves, Donato Cardarelli, Raymond Carroll, and Charles R. Dauwalter. Electrically decoupled silicon gyroscope. *Patent US 6,626,039 B1*, September 2003.
- M. Aikele, K. Bauer, W. Ficker, F. Neubauer, U. Prechtel, J. Schalk, and H. Seidel. Resonant accelerometer with self-test. *Sensors and Actuators A*, 92:161–167, 2001.
- Ranjith Amarasinghe, Dzung Viet Dao, Toshiyuki Toriyama, and Susumu Sagiyama. Simulation, fabrication and characterization of a three-axis piezoresistive accelerometer. *Smart Materials and Structures*, 15:1691–1699, 2006.
- Ranjith Amarasinghe, Dzung Viet Dao, Toshiyuki Toriyama, and Susumu Sagiyama. Development of miniaturized 6-axis accelerometer utilizing piezoresistive sensing elements. *Sensors and Actuators A*, 134:310–320, 2007.
- Analog Devices. ADXL50 - monolithic accelerometer with signal conditioning. *Data sheet Analog Devices, Norwood, MA*, 1993.
- F. Ayazi and K. Najafi. Design and fabrication of a high performance polysilicon vibrating ring gyroscope. *Proc.IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop (MEMS'98), Heidelberg, Germany*, pages 621–626, Feb. 1998.
- M. Brandl and V. Kempe. High performance accelerometer based on CMOS technologies with low cost add-ons. *14th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2001), Interlaken, January 21-25 2001*, pages 6–9, January 2001.
- Jobst Broelmann. *Intuition und Wissenschaft in der Kreiseltechnik 1750 - 1930*. Deutsches Museum, 2002. ISBN ISBN 3-924183-87-2.
- Chr. Burrer and J. Esteve. A novel resonant silicon accelerometer in bulk-micromachining technology. *Sensors and Actuators A*, 46-47:185–189, 1995.
- Peitao Dong, Xinxin Li, Heng Yang, Haifei Bao, Wei Zhou, Shengyi Li, and Songlin Feng. High-performance monolithic triaxial piezoresistive shock accelerometers. *Sensors and Actuators A*, pages 339–346, 2008.
- Peter Ernst. MEMS gyroscopes for automotive applications. *AMAA 2007, Berlin, May 9-10, 2007*, May 2007.

- V. Ferrari, A. Ghisla, D. Marioli, and A. Taroni. Silicon resonant accelerometer with electronic compensation of input-output cross-talk. *Sensors and Actuators A*, 123-124:258–266, 2005.
- Sami Franssila. *Introduction to Microfabrication*. John Wiley, 1st edition, 2004.
- K. Funk, H. Emmerich, A. Schilp, M. Offenberg, R. Neul, and F. Larmer. A surface micromachined silicon gyroscope using a thick polysilicon layer. *12th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS '99, Orlando, FL, 17-21 January 1999*, pages 57–60, January 1999.
- Thomas B. Gabrielson. Mechanical-thermal noise in micromachined acoustic and vibration sensors. *IEEE Transactions on Electronic Devices*, 40(5):903–909, May 1993.
- John A. Geen. Micromachined device with rotationally vibrated masses. *Patent US 5,869,760*, February 1999.
- W. Geiger, B. Folkmer, J. Merz, H. Sandmaier, and W. Lang. A new silicon rate gyroscope. *Sensors and Actuators A*, 73:45–51, 1999.
- W. Geiger, W. U. Butt, A. Gaisser, J. French, M. Braxmeier, T. Link, A. Kohne, P. Nommensen, H. Sandmeier, W. Lang, and H. Sandmeier. Decoupled microgyros and the design principle DAVED. *Sensors and Actuators A*, 95:239–249, 2002.
- Wolfram Geiger and Walter Lang. Rotation speed sensor and rotation speed sensor system. *Patent WO 02/16871 A1*, February 2002.
- P. Greiff, B. Boxenhorn, T. King, and L. Niles. Silicon monolithic micromechanical gyroscope. *Proc. of the IEEE 1991 International Conference on Solid State Sensors and Actuators, San Francisco*, pages 966–968, June 1991.
- I. Hopkin. Performance and design of a silicon micromachined gyro. *Proc. Symp. Gyro Technology, Stuttgart, Germany*, pages 1.0–1.10, 1997.
- G. W. Hunt and A. E. W. Hobbs. Development of an accurate tuning-fork gyroscope. *Symposium on Gyros, Proc. of the Institute of Mechanical Engineers, (London), 1964-65*, 179(3 E), 1964.
- H. Johari and F. Ayazi. Capacitive bulk acoustic wave silicon disc gyroscopes. *International Electron Device Meeting, 2006. IEDM '06, San Francisco, pp. 1-4*, 2006.
- V. Kempe. Mikro-Gyroskop zur Ermittlung von Rotationsbewegungen um eine x- und/oder y- sowie z-Achse. *Patent Application DE 10 2009 001 244 A1, Publication date 2.9.2010*, September 2010.
- Volker Kempe. *Inertial MEMS*. Cambridge University Press, 2011.
- A. M. Leung, J. Jones, E. Czyzewska, J. Chen, and M. Pascal. Micromachined accelerometer with no proof mass. *Technical Digest of International Electron Device Meeting, 1997*, pages 899–902, 1997.
- X. B. Luo, Y. J. Yang, F. Zheng, Z. X. Li, and Z. Y. Guo. An optimized micromachined convective accelerometer with no proof mass. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 11(5):504–508, 2001.

- A. M. Madni, L. A. Wan, and S. Hammons. A micro-electromechanical quartz rotational rate sensor for inertial applications. *Proc. IEEE Aerospace Applications Conference, Aspen, Co, February 1996*, 2:315–332, 1996.
- Asad M. Madni, Lynn E. Costlow, and Stuart J. Knowles. Common design techniques for bei gyrochip quartz rate sensors for both automotive and aerospace/defense markets. *IEEE Sensors Journal*, 3:2569–578, 2003.
- Marc J. Madou. *Fundamentals of Microfabrication*. CRC Press, 2nd edition, 2002.
- B. McCullom and O. S. Peters. A new electric telemeter. *Technology Papers National Bureau of Standards*, 17(247), January 4 1924.
- Per Ohlckers, Reidar Holm, Henrik Jakobsen, Terje Kvisteroy, Gjermund Kittilsland, Andre Larsen, Martin Nese, Svein M. Nilsen, and Alain Ferber. An integrated resonant accelerometer microsystem for automotive applications. *Sensors and Actuators A*, 66:99–104, 1998.
- Michael W. Putty and Khalil Najafi. A micromachined vibrating ring gyroscope. *Proceedings of the Solid-State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head, South Carolina, June 13-16, 1994*, pages 213–220, June 1994.
- W. H. Quick. Theory of the vibrating string as an angular motion sensor. *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, pages 523–534, Sept 1964.
- John W. Reeds and Ying W. Hsu. Angular rate sensor having a sense element constrained to motion about a single axis and flexibly attached to a rotary drive mass. *International Patent Application WO 02/103364 A2*, December 2002.
- John William Reeds, Ying Wen Hsu, and Phu Cu Dao. MEMS sensor with single central anchor and motion-limiting connection geometry. *Patent US 6,513,380 B2*, February 2003.
- Trey A. Roessig, Roger T. Howe, Albert P. Pisano, and James H. Smith. Surface-micromachined resonant accelerometer. *IEEE International Conference on Solid-State Sensors and Actuators, Transducer'97, Chicago, 16-19 June 1997*, pages 859–862, 1997.
- L. M. Roylance and J. A. Angell. A batch-fabricated silicon accelerometer. *IEEE Trans. Electron. Devices*, ED-26:1911–1917, Dec 1979.
- B. Schell. 100 years of Anschuetz gyro compasses - 100 years of innovations in nautical technology. *Symposium Gyro Technology 2005, Stuttgart, Germany*, 1-20, 2005.
- Ashwin A. Seshia, Moorthi Palniapan, Trey A. Roessig, Roger T. Howe, Roland W. Gooch, Thomas R. Schimert, and Stephen Montague. A vacuum packaged surface micromachined resonant accelerometer. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 11(6):784–793, December 2002.
- A. M. Shkel. Micromachined gyroscopes: challenges, design solutions, and opportunities. *Smart Structure and Materials 2001: Smart Electronics and MEMS; Proceedings of SPIE*, 4334: 74–85, 2001. Editor:V.K.Varandan.
- J. Soderkvist. Design of solid-state gyroscopic sensor made of quartz. *Sensors Actuators A*, 21/23:293–296, 1990.

- M. Weinberg, J. Bernstein, S. Cho, A. T. King, A. Kourepenis, P. Ward, and J. Sohn. A micromachined comb-drive tuning fork gyroscope for commercial applications. *Proc. Sensor Expo, Cleveland, OH*, pages 187–193, 1994.
- Rainer Willig, Andreas Thomae, Burkhard Kuhlmann, Joerg Hauer, Udo-Martin Gomez, Siegbert Goetz, Christian Doering, Michael Fehrenbach, Wolfram Bauer, Udo Bischof, Reinhard Neul, Karsten Funk, Markus Lutz, Gerhard Wucher, and Jochen Franz. Rotation rate sensor. *US Patent 6,705,164 B2*, March 2004.
- N. Yazdi, F. Ayazy, and K. Najafi. Micromachined inertial sensors. *Proceedings of the IEEE*, 86(8):1640–1659, August 1998.

[09.10.13]

Anschrift des Autors:

Prof. Dr. Volker Kempe
Lindengasse 6c, 8501 Lieboch, Österreich
volker.kempe@inode.at