

Inertial MEMS - ein Streifzug

V. Kempe

Sensorsysteme 2012, Lichtenwalde (Sachsen)

Gliederung

- 1 Wozu Trägheitssensoren?
- 2 Technologien
- 3 Beschleunigungssensoren
 - 1D - Sensoren
 - Multiaxiale Beschleunigungssensoren
- 4 Gyroskope
 - Grundprinzipien
 - Gyroskope mit elastischen Körperdeformationen
 - Starrkörper - Drehratensensoren
 - Multiaxiale Gyroskope und Wege in Richtung 6D-IMU
- 5 Ausblick
- 6 Anhang 1: Ein klein wenig Geschichte
- 7 Anhang 2: Ein bißchen Theorie

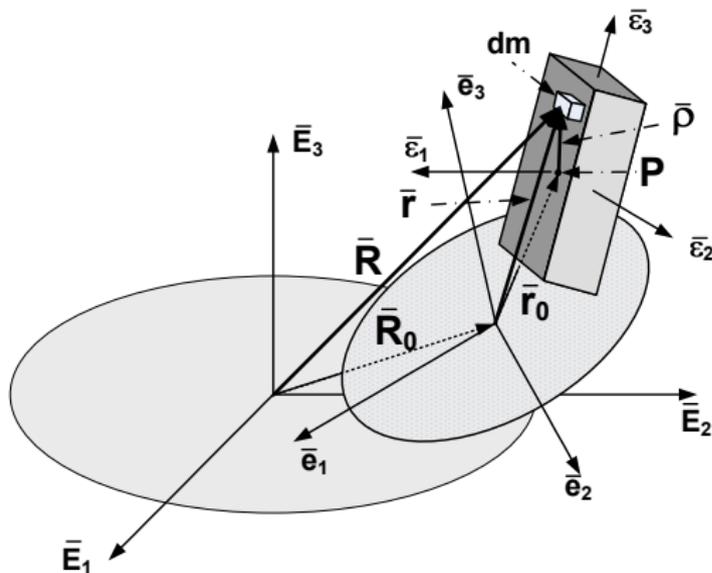
Gliederung

- 1 Wozu Trägheitssensoren?
- 2 Technologien
- 3 Beschleunigungssensoren
 - 1D - Sensoren
 - Multiaxiale Beschleunigungssensoren
- 4 Gyroskope
 - Grundprinzipien
 - Gyroskope mit elastischen Körperdeformationen
 - Starrkörper - Drehratensensoren
 - Multiaxiale Gyroskope und Wege in Richtung 6D-IMU
- 5 Ausblick
- 6 Anhang 1: Ein klein wenig Geschichte
- 7 Anhang 2: Ein bißchen Theorie

Was sind Trägheitssensoren? : Die Koordinatensysteme

Koordinatensysteme: Körper - Plattform - Inertialsystem

Plattformbeschleunigungen erzeugen Trägheitskräfte



Anwendungen

- **Automobil:** Sicherheitssensoren (ABS; Front und Seiten Airbag; Gurtkontrolle; ESP; Überschlag; Antischleudersysteme; Aufhängungskontrolle) und Navigationsunterstützung
- **Konsumgüter:** Kamera Stabilisierung; Festplattenschutz in PC; Gesten- und Bewegungserkennung z.B. in Bedienkonsolen (mobile phones, handsets, laptops, Spielkontroller - e.g. Nintendo Wii; Puppenanimation); Plattformstabilisierung (Segway); in-door und Fußgängernavigation
- **Medizin:** Aktivitätsmonitoring; Patiententransport
- **Industrie:** Vibrometrie; Bewegungskontrolle (e.g. Roboter); Überwachung von Transportsystemen und Gütern;
- **Aeronautik und Militär:** Navigation und Plattformstabilisierung

Σ : ~ 25 % des nahezu 14 Mrd \$ MEMS Marktes in 2012 

Gliederung

- 1 Wozu Trägheitssensoren?
- 2 **Technologien**
- 3 Beschleunigungssensoren
 - 1D - Sensoren
 - Multiaxiale Beschleunigungssensoren
- 4 Gyroskope
 - Grundprinzipien
 - Gyroskope mit elastischen Körperdeformationen
 - Starrkörper - Drehratensensoren
 - Multiaxiale Gyroskope und Wege in Richtung 6D-IMU
- 5 Ausblick
- 6 Anhang 1: Ein klein wenig Geschichte
- 7 Anhang 2: Ein bißchen Theorie

Dominante Technologien

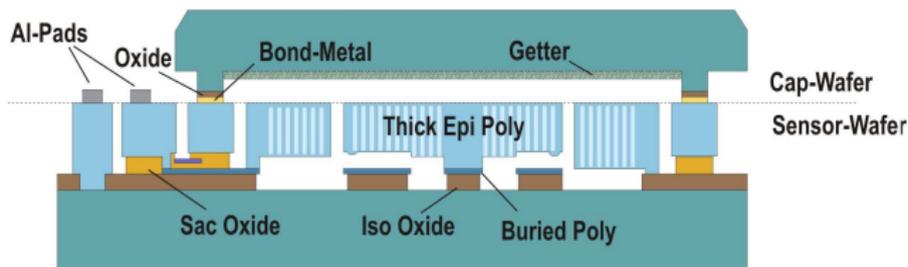
Trägheitssensor : ein verpacktes, kalibriertes und getestetes Produkt, das nahtlos in ein Meß- oder Steuerungssystem integriert werden kann

Technologien:

- Sensor-(**BMM**- z.B. Bosch Prozeß, **SMM und SOI**), Meßwandler-(piezoelektrisch, piezoresistive, kapazitive), und ASIC-Technologien
- zero-level Verpackung (**Wafer level bonding**)
- first level Verpackung
- Test und Kalibrierung (Drehtische, rotierende Testköpfe)

Typisches Beispiel: Micromachining und Wafer level Bonding

Surface MicroMachining (SMM)



Surface MicroMachined Gyroskopstruktur

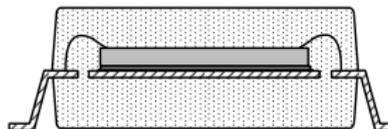
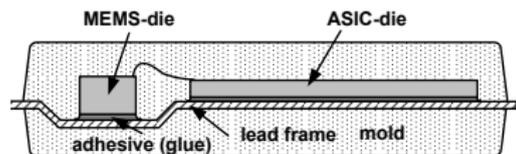
(SensorDynamics/ISIT)

First Level Verpackungstechnologien

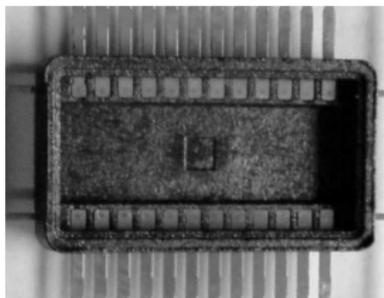
Hermetizität und Stressfreiheit !!!

Preisdruck forciert Plastikverpackungen für $-40 \div +125^{\circ}\text{C}$ und mehr

- Plastikumgossene Verpackung (overmolded package, e.g. SOIC)



- Vorgeformte Verpackung mit offener Kavität (premolded open cavity package)



Gliederung

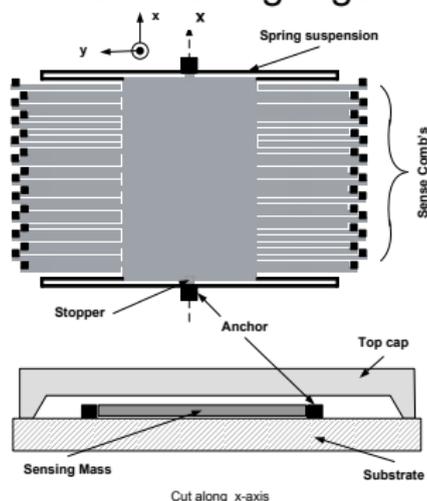
- 1 Wozu Trägheitssensoren?
- 2 Technologien
- 3 Beschleunigungssensoren**
 - 1D - Sensoren
 - Multiaxiale Beschleunigungssensoren
- 4 Gyroskope
 - Grundprinzipien
 - Gyroskope mit elastischen Körperdeformationen
 - Starrkörper - Drehratensensoren
 - Multiaxiale Gyroskope und Wege in Richtung 6D-IMU
- 5 Ausblick
- 6 Anhang 1: Ein klein wenig Geschichte
- 7 Anhang 2: Ein bißchen Theorie

Gliederung

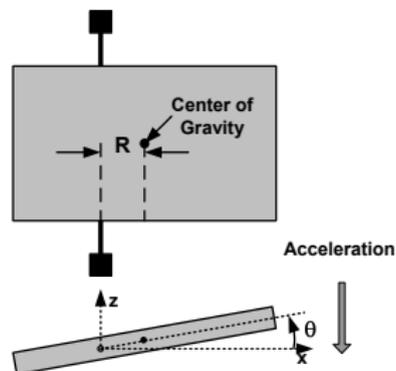
- 1 Wozu Trägheitssensoren?
- 2 Technologien
- 3 Beschleunigungssensoren**
 - **1D - Sensoren**
 - Multiaxiale Beschleunigungssensoren
- 4 Gyroskope
 - Grundprinzipien
 - Gyroskope mit elastischen Körperdeformationen
 - Starrkörper - Drehratensensoren
 - Multiaxiale Gyroskope und Wege in Richtung 6D-IMU
- 5 Ausblick
- 6 Anhang 1: Ein klein wenig Geschichte
- 7 Anhang 2: Ein bißchen Theorie

Feder-Masse Systeme - Beispiele

Linearer Beschleunigungssensor



Torsionaler Sensor

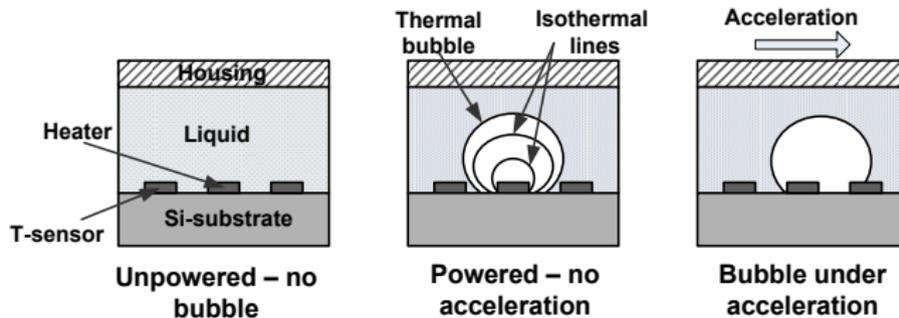


Dominant: piezoresistive und kapazitive Meßwandler

Seltener: Thermische Wandler, Resonanzbalken (z.B. [4]) und Tunneliodenübergänge (tunneling tip's)

Bubble accelerometer

Thermischer bubble Sensor



Empfindlichkeit: $\sim 1^\circ\text{C}/g$; Reaktionszeit: 60 msec

Ähnlich: Konvektionssensoren z.B. nach Luo et al. [6]B.

Gliederung

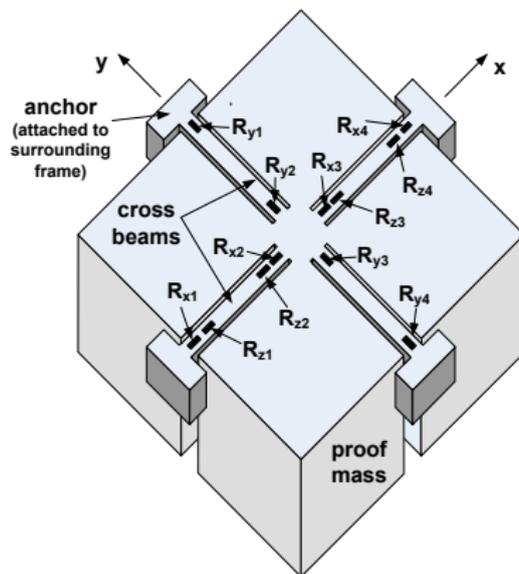
- 1 Wozu Trägheitssensoren?
- 2 Technologien
- 3 Beschleunigungssensoren**
 - 1D - Sensoren
 - Multiaxiale Beschleunigungssensoren**
- 4 Gyroskope
 - Grundprinzipien
 - Gyroskope mit elastischen Körperdeformationen
 - Starrkörper - Drehratensensoren
 - Multiaxiale Gyroskope und Wege in Richtung 6D-IMU
- 5 Ausblick
- 6 Anhang 1: Ein klein wenig Geschichte
- 7 Anhang 2: Ein bißchen Theorie

Multiaxiale Beschleunigungssensoren

Kommerziell dominant: Mehrkörpersysteme

Im Versuchsstadium: Einkörper - 3D Beschleunigungssensoren

z.B. mit piezoresistiven Meßwandler nach Amarasinghe et al., [9]



Erweiterungen in Richtung 6D Beschleunigungssensor

Gliederung

- 1 Wozu Trägheitssensoren?
- 2 Technologien
- 3 Beschleunigungssensoren
 - 1D - Sensoren
 - Multiaxiale Beschleunigungssensoren
- 4 Gyroskope**
 - Grundprinzipien
 - Gyroskope mit elastischen Körperdeformationen
 - Starrkörper - Drehratensensoren
 - Multiaxiale Gyroskope und Wege in Richtung 6D-IMU
- 5 Ausblick
- 6 Anhang 1: Ein klein wenig Geschichte
- 7 Anhang 2: Ein bißchen Theorie

Gliederung

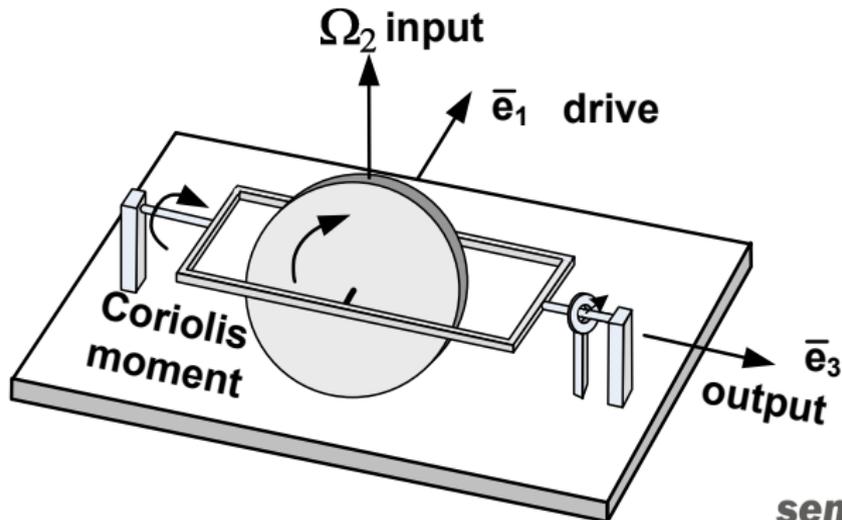
- 1 Wozu Trägheitssensoren?
- 2 Technologien
- 3 Beschleunigungssensoren
 - 1D - Sensoren
 - Multiaxiale Beschleunigungssensoren
- 4 Gyroskope**
 - Grundprinzipien**
 - Gyroskope mit elastischen Körperdeformationen
 - Starrkörper - Drehratensensoren
 - Multiaxiale Gyroskope und Wege in Richtung 6D-IMU
- 5 Ausblick
- 6 Anhang 1: Ein klein wenig Geschichte
- 7 Anhang 2: Ein bißchen Theorie

Grundprinzipien (s. Anhang 2)

Nutzung von Corioliskraft/moment $2m(\bar{\Omega} \times \bar{v})$ bzw. $2(\mathbb{J}^D \bar{\Omega} \times \bar{\omega})$

$$\mathbb{J}^D = \{J_{ij}^D\} = \int_V dm \begin{pmatrix} \rho_1^2 & \rho_1 \rho_2 & \rho_1 \rho_3 \\ \rho_1 \rho_2 & \rho_2^2 & \rho_2 \rho_3 \\ \rho_1 \rho_3 & \rho_2 \rho_3 & \rho_3^2 \end{pmatrix}; \rho_i - \text{Körperelementkoordinaten}$$

Der klassische Gyrostat



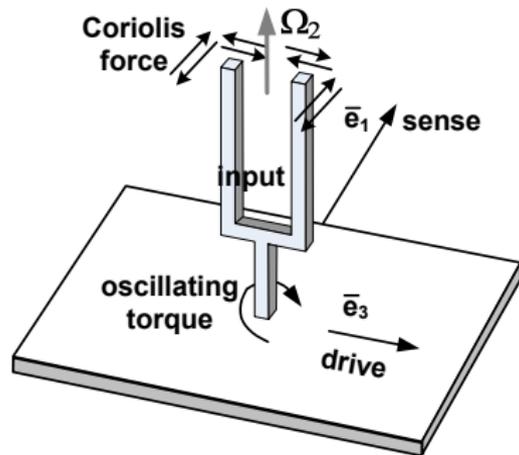
Gliederung

- 1 Wozu Trägheitssensoren?
- 2 Technologien
- 3 Beschleunigungssensoren
 - 1D - Sensoren
 - Multiaxiale Beschleunigungssensoren
- 4 Gyroskope**
 - Grundprinzipien
 - Gyroskope mit elastischen Körperdeformationen**
 - Starrkörper - Drehratensensoren
 - Multiaxiale Gyroskope und Wege in Richtung 6D-IMU
- 5 Ausblick
- 6 Anhang 1: Ein klein wenig Geschichte
- 7 Anhang 2: Ein bißchen Theorie

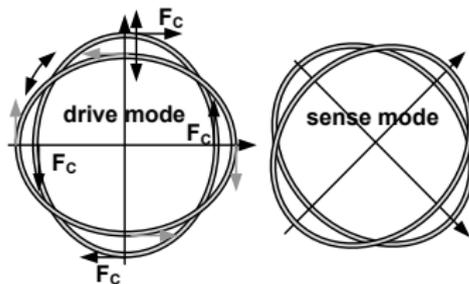
Elastische Vibrationsgyroskope

Meist mit degenerierten Modi ($f_{Drive} = f_{Sense}$)

Stimmgabel



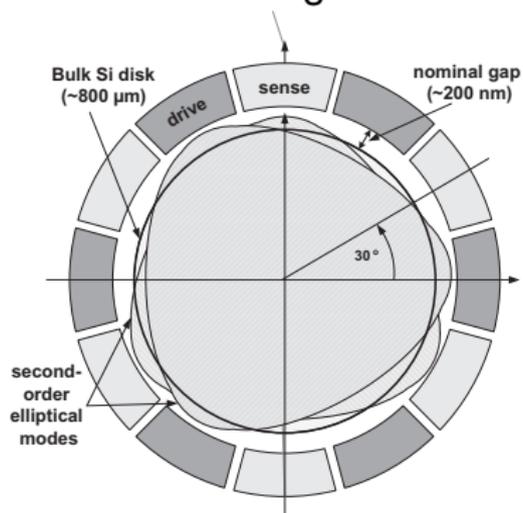
Vibrierender Ring



Ähnlich: Vibrierende Saite, vibrierender Balken

Bulk acoustic-wave Gyroskop (nach Johari et al. [16])

Hochfrequente Auslenkungen im nm-Bereich !!!!



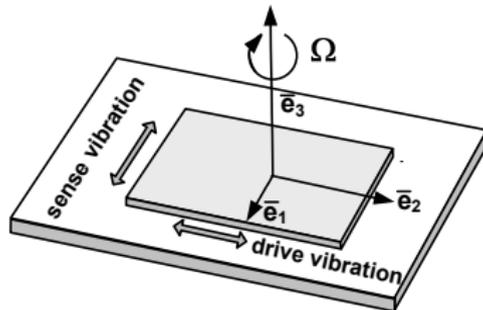
Gliederung

- 1 Wozu Trägheitssensoren?
- 2 Technologien
- 3 Beschleunigungssensoren
 - 1D - Sensoren
 - Multiaxiale Beschleunigungssensoren
- 4 Gyroskope**
 - Grundprinzipien
 - Gyroskope mit elastischen Körperdeformationen
 - Starrkörper - Drehratensensoren**
 - Multiaxiale Gyroskope und Wege in Richtung 6D-IMU
- 5 Ausblick
- 6 Anhang 1: Ein klein wenig Geschichte
- 7 Anhang 2: Ein bißchen Theorie

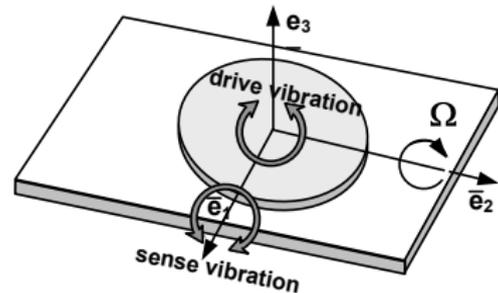
Starrkörper - Vibrationsgyroskope

Meist mit nicht degenerierten Modi ($f_{Drive} = f_{Sense} + \Delta f$)

Linearer MEMS-gyro

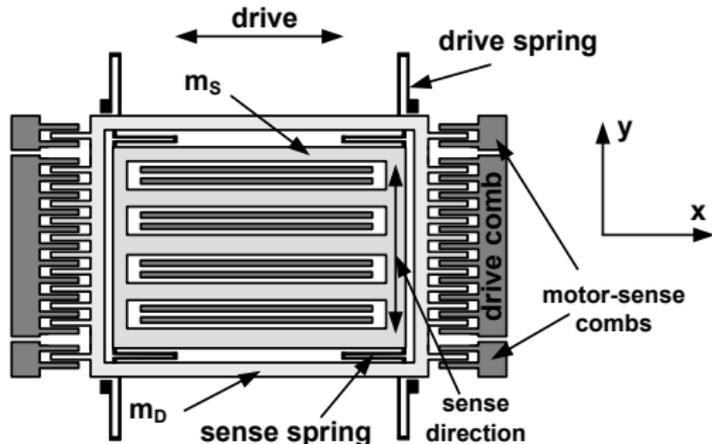


Torsionaler MEMS-gyro



Starrkörper - Drehratensensoren

Z-Gyroskop mit zwei FHG und zwei linear vibrierenden Massen

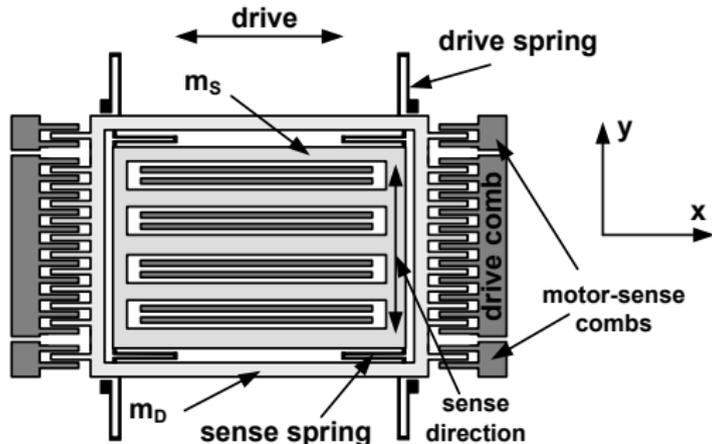


Challenges: Auflösung bis $0.001 \text{ } ^\circ/\text{sec}$; Nullpunkt-Stabilität bis $0.0001 - 0.01 \text{ } ^\circ/\text{hr}$

Achtung: Beschleunigungsempfindlich!!!! \Rightarrow Tuning fork arrangements

Starrkörper - Drehratensensoren

Z-Gyroskop mit zwei FHG und zwei linear vibrierenden Massen

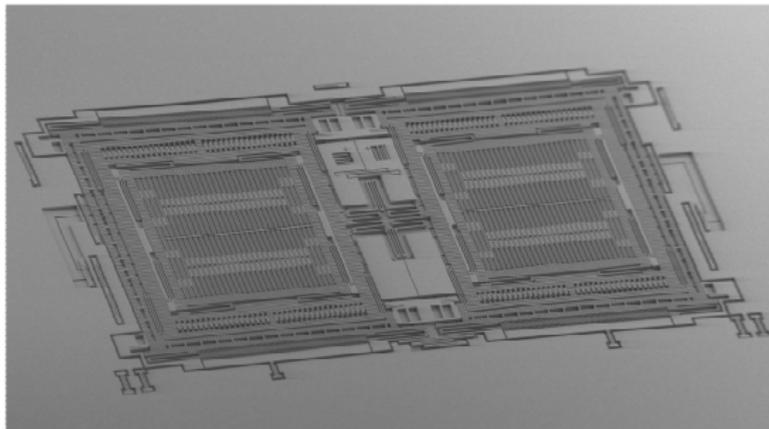


Challenges: Auflösung bis $0.001 \text{ } ^\circ/\text{sec}$; Nullpunkt-Stabilität bis $0.0001 - 0.01 \text{ } ^\circ/\text{hr}$

Achtung: Beschleunigungsempfindlich!!!! \Rightarrow Tuning fork arrangements

Modenentkopplung und g-Unterdrückung

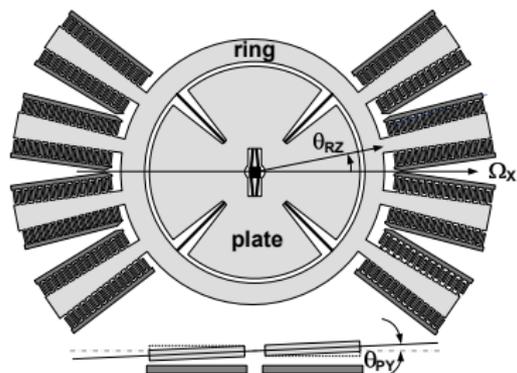
Doppelt entkoppelte Tuning Fork Coriolis-frame Architektur



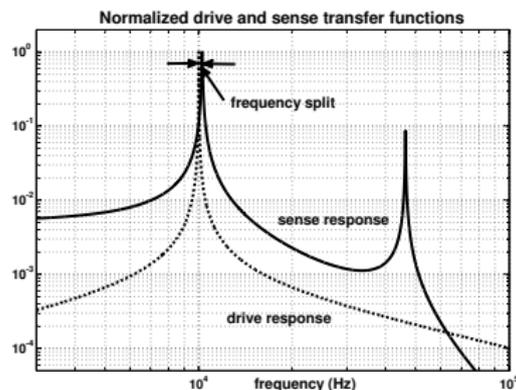
Bosch's MM3 Gyroskop (Courtesy of Bosch GmbH)

Noise floor: $< 0.003^\circ / \text{sec} / \sqrt{\text{Hz}}$; Bias instability: $< 3^\circ / \text{hour}$

Entkoppeltes Torsionalgyroskop mit drei FHG [13]



Am Substrat aufgehängter Sense-
frame trägt Drive - frame



Sense und Drive-
Übertragungsfunktionen

Gefertigt von SensorDynamics AG

(Auflösung $< 0.02^\circ / \text{sec} / \sqrt{\text{Hz}}$)

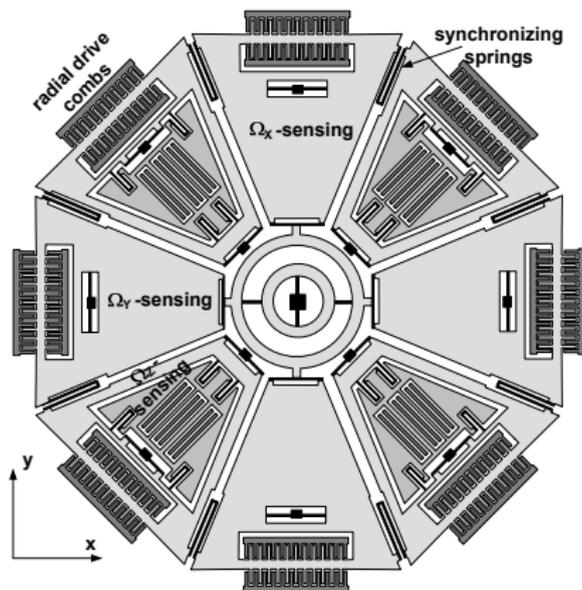
sensordynamics
ITZBOB · GRAZ · PISA

Gliederung

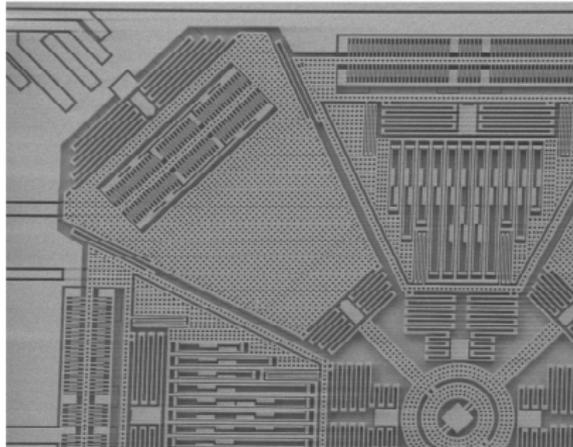
- 1 Wozu Trägheitssensoren?
- 2 Technologien
- 3 Beschleunigungssensoren
 - 1D - Sensoren
 - Multiaxiale Beschleunigungssensoren
- 4 Gyroskope**
 - Grundprinzipien
 - Gyroskope mit elastischen Körperdeformationen
 - Starrkörper - Drehratensensoren
 - Multiaxiale Gyroskope und Wege in Richtung 6D-IMU**
- 5 Ausblick
- 6 Anhang 1: Ein klein wenig Geschichte
- 7 Anhang 2: Ein bißchen Theorie

Voll entkoppeltes 3D Gyroskop mit synchroner Radialerregung

Gefertigt von SensorDynamics AG nach Kempe [17]



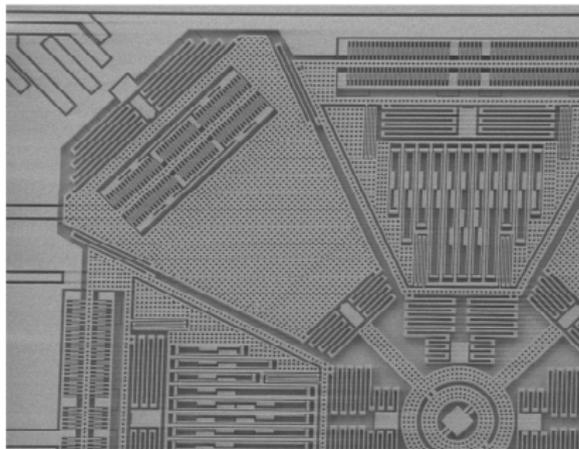
Voll entkoppeltes 3D Gyroskop mit synchroner Radialerregung - Detail



SMM-acht-Segment Gyroskop - Detail

- Exzellente Kreuz-Kopplungsunempfindlichkeit
- noise floor: $0.03^\circ / \text{sec} / \sqrt{\text{Hz}}$

Voll entkoppeltes 3D Gyroskop mit synchroner Radialerregung - Detail



SMM-acht-Segment Gyroskop - Detail

- Exzellente Kreuz-Kopplungsunempfindlichkeit
- noise floor: $0.03^\circ / \text{sec} / \sqrt{\text{Hz}}$

Gliederung

- 1 Wozu Trägheitssensoren?
- 2 Technologien
- 3 Beschleunigungssensoren
 - 1D - Sensoren
 - Multiaxiale Beschleunigungssensoren
- 4 Gyroskope
 - Grundprinzipien
 - Gyroskope mit elastischen Körperdeformationen
 - Starrkörper - Drehratensensoren
 - Multiaxiale Gyroskope und Wege in Richtung 6D-IMU
- 5 Ausblick**
- 6 Anhang 1: Ein klein wenig Geschichte
- 7 Anhang 2: Ein bißchen Theorie

Trends und Verbesserungen

- Nutzung neuer Prinzipien wie z.B. bulk acoustic wave Gyros, Konvektionsgyroskope etc.
- Verbesserung der Bias-Stabilität
- Leistungsverbesserung in Richtung inertial-grade Gyroskope
- Mehr-Achsen Detektion ↔ 6D-IMU
- Verschmelzung mit anderen Sensoren (Hall-Sensoren, T-Sensoren, Drucksensoren usw.)

Gliederung

- 1 Wozu Trägheitssensoren?
- 2 Technologien
- 3 Beschleunigungssensoren
 - 1D - Sensoren
 - Multiaxiale Beschleunigungssensoren
- 4 Gyroskope
 - Grundprinzipien
 - Gyroskope mit elastischen Körperdeformationen
 - Starrkörper - Drehratensensoren
 - Multiaxiale Gyroskope und Wege in Richtung 6D-IMU
- 5 Ausblick
- 6 Anhang 1: Ein klein wenig Geschichte**
- 7 Anhang 2: Ein bißchen Theorie

Beschleunigungssensoren im Rückblick

- ~1900: Beschleunigungsschalter
- 1920: Erster kommerzieller Beschleunigungssensor
Kohle-Ringwiderstände (B. McCullom and O.S.Peters, [1])
- ~1938: Dehnmeßstreifen als Transducer
- Ende der 40er: miniaturisierte piezoelektrische und piezoresistive Sensoren
- ~ 1975: erster batch-gefertigter Si-Beschleunigungssensor mit piezoresistiven Meßwandler (L.M. Roylance and J.A. Angell, [2])
- nach 1980: breite Kommerzialisierung
- z.B. ~1990: 50 g kapazitiver Beschleunigungssensor von Analog Devices

Gyroskope und ihre Vorläufer

- Antike: yo-yo ähnliche Spiele, rotierende Zeremonie-Scheiben
- 1817: Johann Gottfried Friedrich von Bohnenberger's Erdpräzessions-Kreiseldemonstrator (Gyroskop)
- 1835: Gaspard-Gustave Coriolis führt die Corioliskraft ein
- 1851: Foucaults Pendel mit Pendelebenenendrehung von $360^\circ \sin\varphi / \text{day}$ (1661: Vivianis Pendel)
- vor 1990: Spinnräder zur Stabilisierung von Torpedos und Munition

Gyroskope in der Moderne

- 1904: Patent von Hermann Anschuetz-Kaempfe (Kreiselkompass)—
Intuition und Wissenschaft !!!!
- ~ 1960: Kreiselkompass Inertialnavigation, Plattformstabilisierung
- 1960-1990: Miniaturisierung und neue Prinzipien (vibrierende Saiten,
Stimmgabeln, vibrierende Schalen und Zylinder)
- Ende der 70er Jahre: Optisches Gyroskop (Sagnac effect)
- Nutzung von mikroelektronischen Batch-Prozessen für
Einzelkomponenten (Quarzstimmgabel, Ring-Gyroskope)
- 1991: Charles Draper Lab realisiert das erste MEMS-Gyroskop

Gliederung

- 1 Wozu Trägheitssensoren?
- 2 Technologien
- 3 Beschleunigungssensoren
 - 1D - Sensoren
 - Multiaxiale Beschleunigungssensoren
- 4 Gyroskope
 - Grundprinzipien
 - Gyroskope mit elastischen Körperdeformationen
 - Starrkörper - Drehratensensoren
 - Multiaxiale Gyroskope und Wege in Richtung 6D-IMU
- 5 Ausblick
- 6 Anhang 1: Ein klein wenig Geschichte
- 7 Anhang 2: Ein bißchen Theorie

Dynamische Gleichungen bei Platformbeschleunigung

Schwerpunktbewegung eines federnd aufgehängten Körpers

$$\mathbf{m} \ddot{\bar{\mathbf{r}}}_0 + \mathbf{C} \dot{\bar{\mathbf{r}}}_0 = \bar{\mathbf{F}} (-\mathbf{K}\bar{\mathbf{r}}_0) + \mathbf{m} \bar{\mathbf{a}} + \bar{\mathbf{N}}_B.$$

$\bar{\mathbf{r}}_0$ - Schwerpunktkoordinaten

\mathbf{m} - body mass

\mathbf{C} - Dämpfungsmatrix

\mathbf{K} - Matrix der Federkonstanten

$\bar{\mathbf{N}}_B$ - Brown'sches Rauschen

Dynamische Gyroskopgleichungen bei Platfordrehung - 1

Schwerpunktbelegung

$$m[\ddot{\bar{\mathbf{r}}}_0 + 2\bar{\boldsymbol{\Omega}} \times \dot{\bar{\mathbf{r}}}_0 + \bar{\boldsymbol{\Omega}} \times (\bar{\boldsymbol{\Omega}} \times \bar{\mathbf{r}}_0) + \dot{\bar{\boldsymbol{\Omega}}} \times \bar{\mathbf{r}}_0] = \bar{\mathbf{F}} (\bar{\mathbf{F}}_D - \mathbf{K}\bar{\mathbf{r}}_0) + \bar{\mathbf{N}}_B$$

$\bar{\boldsymbol{\Omega}}$ - Plattform-Winkelgeschwindigkeit (Drehrate)

$-2\bar{\boldsymbol{\Omega}} \times \dot{\bar{\mathbf{r}}}_0$ - Corioliskraft; **phasenverschoben zu $\dot{\bar{\mathbf{r}}}_0$**

Dynamische Gyroskopgleichungen bei Platfordrehung - 2

Drehbewegung um Schwerpunkt

$$\mathbb{J} \dot{\bar{\omega}} + 2(\mathbb{J}^D \bar{\Omega} \times \bar{\omega}) + \bar{\omega} \times \mathbb{J} \bar{\omega} + \bar{\Omega} \times \mathbb{J} \bar{\Omega} + \mathbb{J} \dot{\bar{\Omega}} = \bar{M}_C (\bar{M}_D - \mathbf{K} \bar{\theta}) + \bar{N}_B.$$

z.B. y-Komponentengleichung für einen sym. Körper

$$J_2 \dot{\omega}_2 + 2J_3^D \Omega_3 \omega_1 - 2J_1^D \Omega_1 \omega_3 - (J_1^D - J_3^D)(\omega_1 \omega_3 + \Omega_1 \Omega_3) + J_2 \dot{\Omega}_2 = M_2$$

$\dot{\bar{\Omega}}$ - Plattform-Winkelbeschleunigung; $\bar{\omega} = \dot{\bar{\theta}}$; $\bar{\rho}$ - Körperkoordinaten-Vektor

$\mathbb{J}^D = \int_V dm \bar{\rho} \bar{\rho}^T$ - Dyadischer Momententensor;

$$\mathbf{J}^D = \{J_{ij}^D\} = \int_V dm \begin{pmatrix} \rho_1^2 & \rho_1 \rho_2 & \rho_1 \rho_3 \\ \rho_1 \rho_2 & \rho_2^2 & \rho_2 \rho_3 \\ \rho_1 \rho_3 & \rho_2 \rho_3 & \rho_3^2 \end{pmatrix}$$

Wie man es nicht machen soll !

Was sagt die

Intuition ?

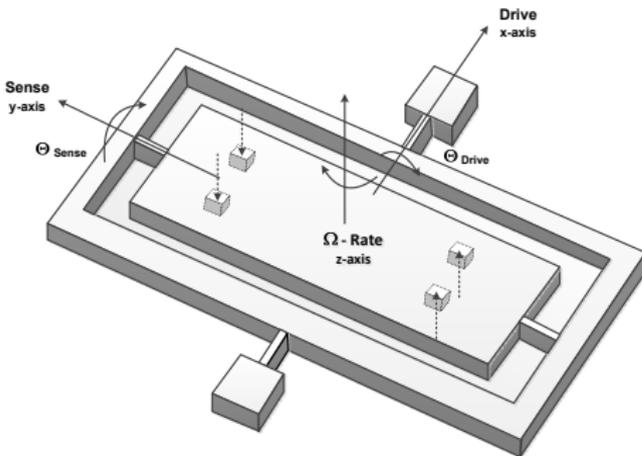
⇒

Coriolismoment
(Empfindlichkeit)

proportional
Plattenhöhe !!

(nicht Platten-
breite)

⇒ **MINIMAL**



$$J_y^{Sense} \ddot{\theta}_{Sense} + C_y^{Sense} \dot{\theta}_y + K_y^{Sense} = ([-]J_z^{Sense} + J_y^{Sense} - [+]J_x^{Sense}) \Omega_z \dot{\theta}_{Drive}$$

$$= 2 \int_{V_{Sense}} \rho \mathbf{x}^2 dV \Omega_z \dot{\theta}_{Drive} \text{ [Acer and Shkel], falsch}$$

$$= 2 \int_{V_{Sense}} \rho \mathbf{z}^2 dV \Omega_z \dot{\theta}_{Drive} \text{ [Kempe], korrekt}$$

sensordynamics
ITZHOE · GRAZ · PISA

For Further Reading I



[1] B. McCullom and O.S. Peters,
A new electric telemeter,
Technology Papers National Bureau of Standards, 1924, vol. 17, number 247,



[2] L. M. Roylance and J. A. Angell,
A batch-fabricated silicon accelerometer,
IEEE Trans. Electron. Devices, 1979, vol. ED-26, pp. 1911-1917,



[3] R. Knechtel,
Glass frit bonding - an universal technology for wafer level encapsulation and packaging,
Symposium on Design, Test, Integration and Packaging of MEMS/MOEMS (DTIP'2005),
Montreux, Switzerland, 2004, pp.77-82



[4] Clark T.-C. Nguyen and Roger T. Howe,
CMOS micromechanical resonant oscillator,
IEEE International Electron Devices Meeting, Washington, D.C., 1993, pp. 199-202



[5] Howard K. Rockstad and T. K. Tang and K. Reynolds and T. W. Kenny and W. J. Kaiser
and Thomas B. Gabrielson,
A miniature, high-sensitivity, electron tunneling accelerometer,
Sensors and Actuators A, 1996, vol. 53, pp. 227-231

For Further Reading II



[6] X. B. Luo and Y. J. Yang and F. Zheng and Z. X. Li and Z. Y. Guo,
An optimized micromachined convective accelerometer with no proof mass,
Journal of Micromechanics and Microengineering, 2001, vol.11, No.5, pp.504-508



[7] Peitao Dong and Xinxin Li and Heng Yang and Haifei Bao and Wei Zhou and Shengyi Li
and Songlin Feng,
High-performance monolithic triaxial piezoresistive shock accelerometers,
Sensors and Actuators A 141, 2008, pp.339-346



[8] Junseok Chae and Haluk Kulah and Khalil Najafi,
A monolithic three-axis micro-g micromachined silicon capacitive accelerometer,
Journal of Microelectromechanical Systems, 2005, vol. 14, No.2; pp.235-242



[9] Ranjith Amarasinghe and Dzung Viet Dao and Toshiyuki Toriyama and Susumu
Sagiyama,
Simulation, fabrication and chracterization of a three-axis piezoresistive accelerometer,
Smart Materials and Structures, 2006, vol. 15, pp.1691-1699



[10] Ranjith Amarasinghe and Dzung Viet Dao and Toshiyuki Toriyama and Susumu
Sagiyama,
Development of miniaturized 6-axis accelerometer utilizing piezoresistive sensing elements,

Sensors and Actuators A 134, 2007, pp.310-320

For Further Reading III



[11] W.A. Clark

Micromachined z-axis vibratory rate gyroscope

United States Patent 5,992,233



[12] Said Emre Alper and Kivanc Azgin and Tayfun Akin

A high-performance silicon-on-insulator MEMS gyroscope operating at atmospheric pressure

Sensors and Actuators A 135, 2007, pp.34-42



[13] John William Reeds and Ying Wen Hsu and Phu Cu Dao

MEMS sensor with single central anchor and motion-limiting connection geometry

Patent US 6,513,380 B2, 2003



[14] James D. John and Thurai Vinay

Novel concept of a single-mass adaptively controlled triaxial angular rate sensor

IEEE Sensors Journal, 2006, vol.6, No.3; pp.588-595



[15] Yoshiyuki Watanabe and Toshiaki Mitsui and Takashi Mineta and Yoshiyuki Matsu and Kazuhiro Okada

SOI micromachined 5-axis motion sensor using resonant electrostatic drive and non-resonant capacitive detection mode

Sensors and Actuators A, 2006, vol.130-131, pp.116-123

For Further Reading IV



[16] Johari, H., and Ayazi, F.

Capacitive bulk acoustic wave silicon disc gyroscope

International Electron Device Meeting, 2006. IEDM '06, San Francisco, pp.1-4



[17] Volker Kempe

Mikro-Gyroskop zur Ermittlung von Rotationsbewegungen um eine x- und/oder y- sowie z-Achse

Patent Application DE 10 2009 001 244 A1, September 2010



Jobst Broelmann

Intuition und Wissenschaft in der Kreiseltechnik 1750 bis 1930

Deutsches Museum, 2002.



V. Kempe

Inertial MEMS.

Cambridge University Press, January 2011.



Acar, C. and Shkel, A.

MEMS Vibratory Gyroscopes

Springer, 1st edition., 2009 .

Read with care (some fundamental errors)