
Hochpräzises MEMS-Gyroskop

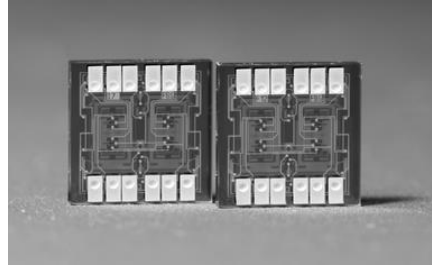
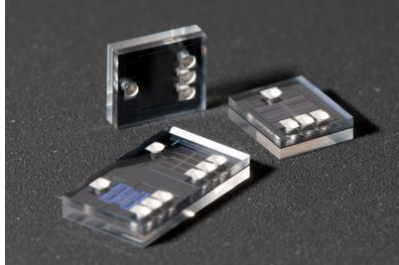
ENAS: Roman Forke, Alexey Shaporin,
Sebastian Weidlich, Alexander Tsapkolenko

ZfM: Karla Hiller, Susann Hahn, Matthias Küchler

EDC: Daniel Köhler, Stefan Konietzka, Tim Motl,
Holger Friese, Detlef Billep

Definition „MEMS Gyroskop“

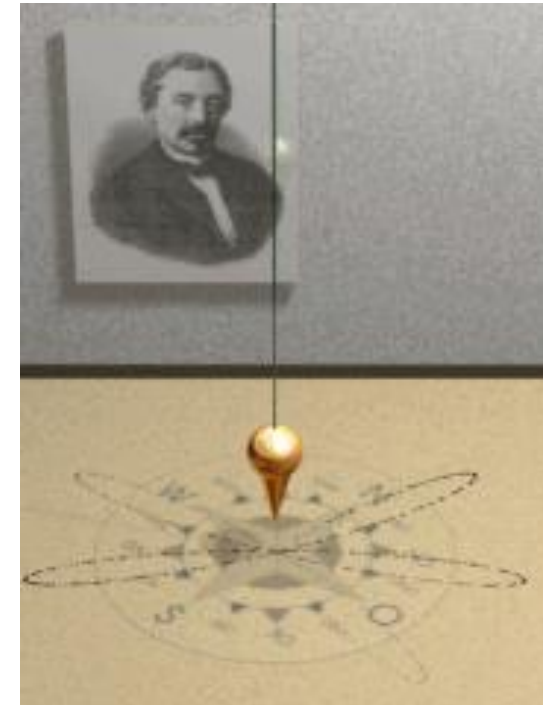
- MEMS = Mikro Elektro-Mechanisches System (kleinste Strukturen im μm -Bereich)



- Gyroskop = Inertialsensor zur Detektion der Drehgeschwindigkeit
- Ausnutzung der Corioliskraft

$$F_C = -2m(\Omega \times v)$$

- Corioliskraft (F_C) wirkt auf bewegte (v) Körper (m), die sich in einem übergeordneten System (Ω) drehen
- Typisches Beispiel: Foucault'sches Pendel



Source:
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Foucault_pendulum_animated.gif

Definition „hochpräzise“

engl.: high precision bzw.
high performance

Vorgabe von YOLE:

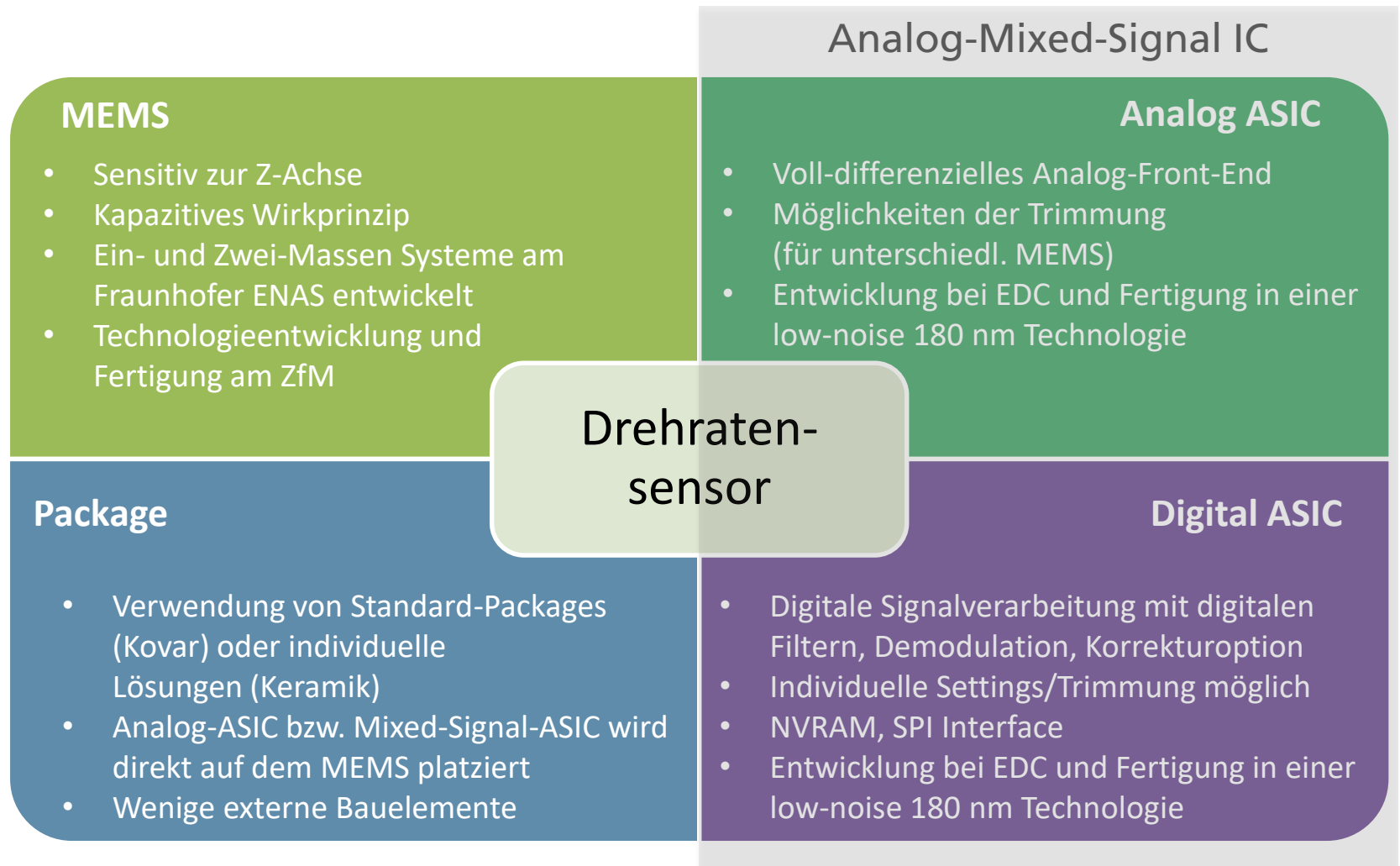
- Einordnung in unterschiedliche Bereiche anhand der Bias Stabilität als Hauptparameter der Sensoren
- Bias Stabilität bezeichnet eine Offset-Drift ohne Beschleunigung oder Drehrate
- Für „tactical grade“ IMUs werden Gyroskope mit einer Bias Stabilität von 0.1°/h bis 100°/h verwendet

Definition of application grades

Accelerometer long term Bias Repeatability	Gyroscope Bias Stability	Corresponding Grade
10g	1°/s	Industrial
1mg	100°/h	
100mg	10°/h	Tactical
10mg	1°/h	
1mg	0,1°/h	
100ug	0,01°/h	Navigation
10µg	0,001°/h	Strategic
1µg	0,0001°/h	



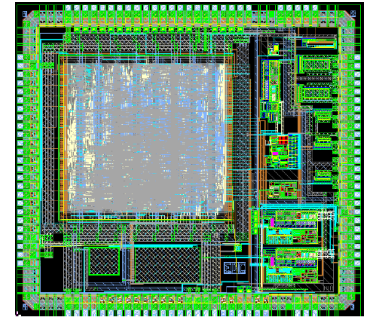
Kernelemente eines Drehratensensors



Entwicklung Drehratensensor ENAS/ZfM/EDC

- Arbeiten zu Vibrationsgyroskop seit Ende 2009
- Enge Zusammenarbeit zwischen ENAS, ZfM und EDC ermöglicht die Entwicklung eines kompletten Systems zur Detektion von Drehgeschwindigkeiten
- Dazu gehört die Entwicklung von:
 - Einem Systemkonzept
 - MEMS und Technologie
 - Analoger und digitaler ASICs
 - Testboards für ASIC- und Systemtests
 - Automatisierten Testprogrammen auf Waferlevel mit aktiven Probecard-Elektroniken
 - Verschiedenen Gehäusen
 - Automatisierten Tests am Drehtisch über Temperatur
 - Software zur Übertragung und Auswertung der Sensorsignale
 - Unterschiedlicher Scripte zur Auswertung und Analyse

Der Weg zum Sensorsystem



Systemkonzept

Festlegung von Detektions- und Auswerteprinzip
Betrachtung elektromechanischer Effekte
Systemsimulation des Konzepts

MEMS

Elektromechanische Auslegung
Design/Layout
Simulation
Fertigung
Wafer-Level-Charakterisierung

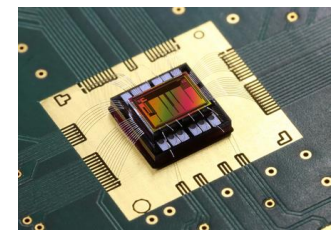
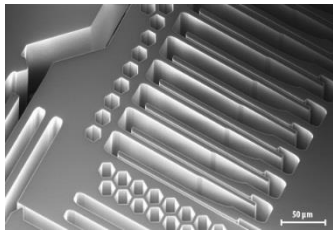
ASIC

Schaltungsentwicklung
Simulation
Layout
Fertigung
Wafer-Level-Charakterisierung

Systemsimulation mit
FEM/Layout Daten

Package-Konzept

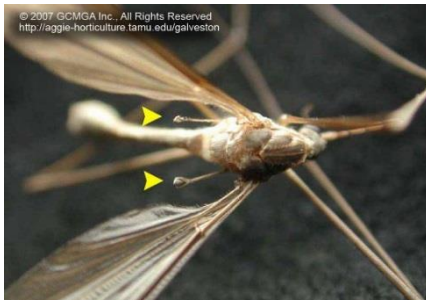
Aufbau in System-Packages
System-Level-Charakterisierung



MEMS Design für Drehratensensor

Vorbild Natur

- Vibrationsgyroskope arbeiten nach dem gleichen Prinzip wie die Halteren (Schwingkölbchen) bei Insekten
- Ausnutzung der Corioliskraft



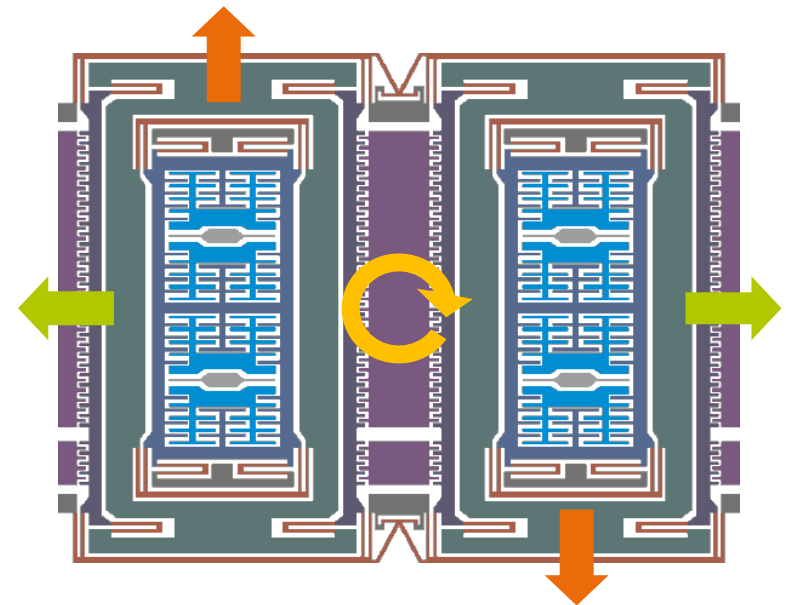
$$F_C = -2m(\Omega \times v)$$



YouTube: BBC - Life on Earth

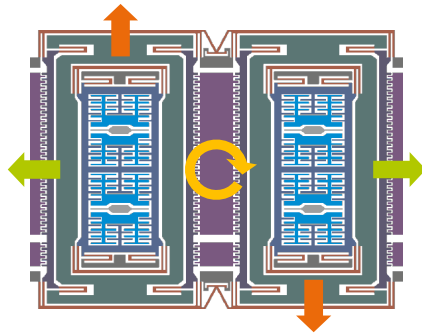


Primärschwingung (Drive Mode)
Drehung um z
Sekundärschwingung (Sense Mode)



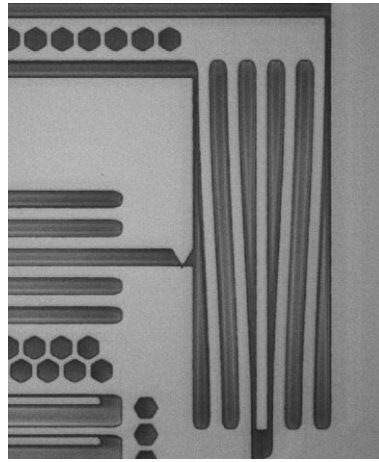
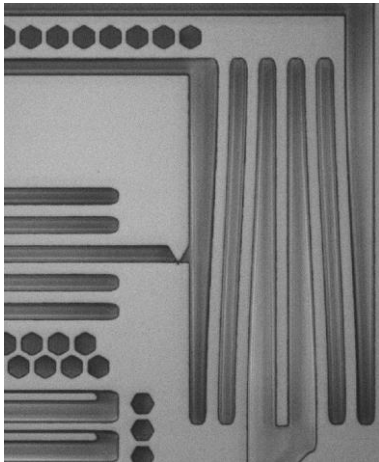
MEMS Design für Drehratensensor

- Antriebsbewegung bis zu $20\ \mu\text{m}$
- Detektionsbewegung $0,2\ \text{pm}$ bis $140\ \text{nm}$



Antriebsbewegung ist $100.000\ \times$ größer als die Detektionsbewegung

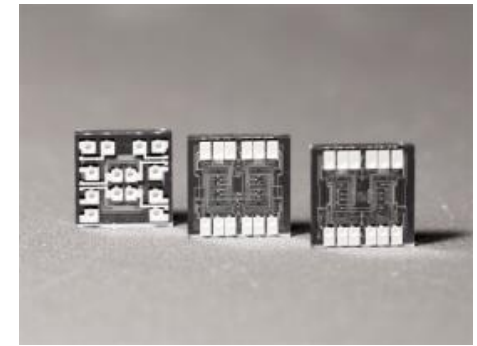
zum Vergleich:
Atomdurchmesser von Wasserstoff $\sim 100\ \text{pm}$



MEMS Technologie

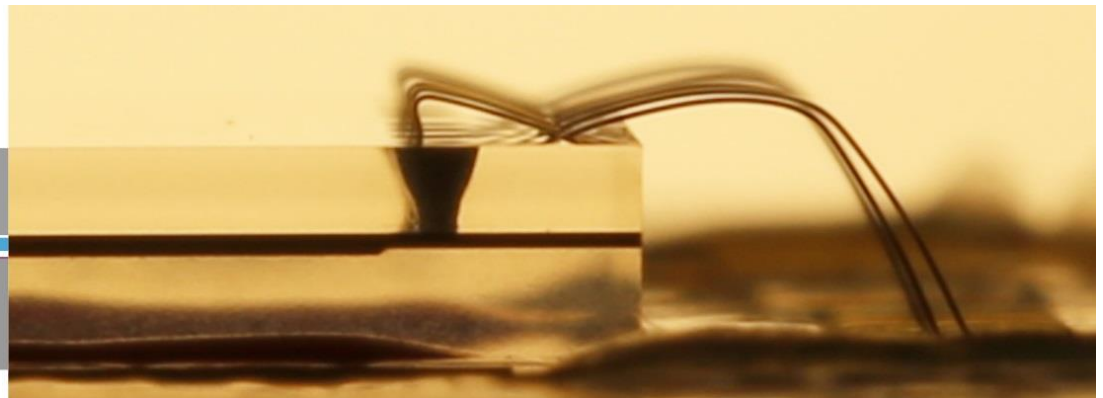
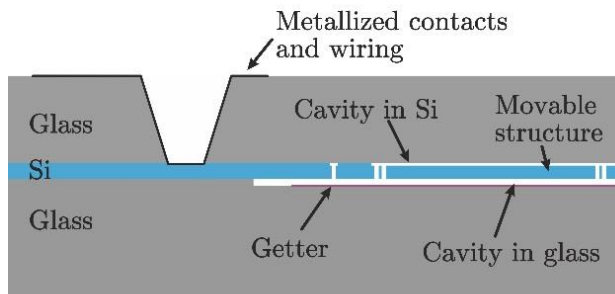
BDRIE (Bonding and Deep Reactive Ion Etching)

- HAR Technologie
 - 50 μm Strukturhöhe
 - 1.8 μm Spaltbreite
- Hermetisches Wafer-Level-Packaging
- Sehr niedriger Innendruck durch Getter-Material (0.01 ... 0.1 mbar)



MEMS Chips

- Drei "Verdrahtungsebenen"
 - Silizium
 - Innere Metallisierung
 - Äußere Metallisierung



Anwendungsgebiete

Zum Beispiel:

- Stabilisierung von (Flug-)Geräten
- Plattform-Stabilisierung
- Navigationsunterstützung



Kamera-Stabilisierung



Plattform-Stabilisierung

Quelle: YouTube

Beispiele für Drehraten (Drehgeschwindigkeiten)

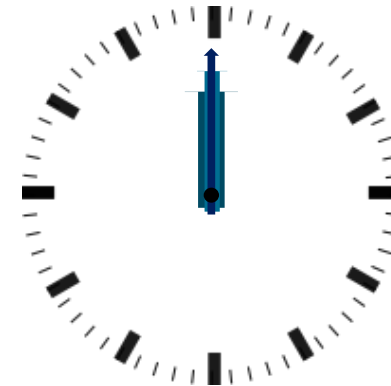
- ESP Sensor bis zu 100 °/s

Beispiel analoge Uhr

- Sekundenzeiger: 6 °/s
- Minutenzeiger: 0,1 °/s
- Stundenzeiger: 0,0083 °/s (30 °/h)
- Erde: 0,00417 °/s (15 °/h)



Foto: dpa

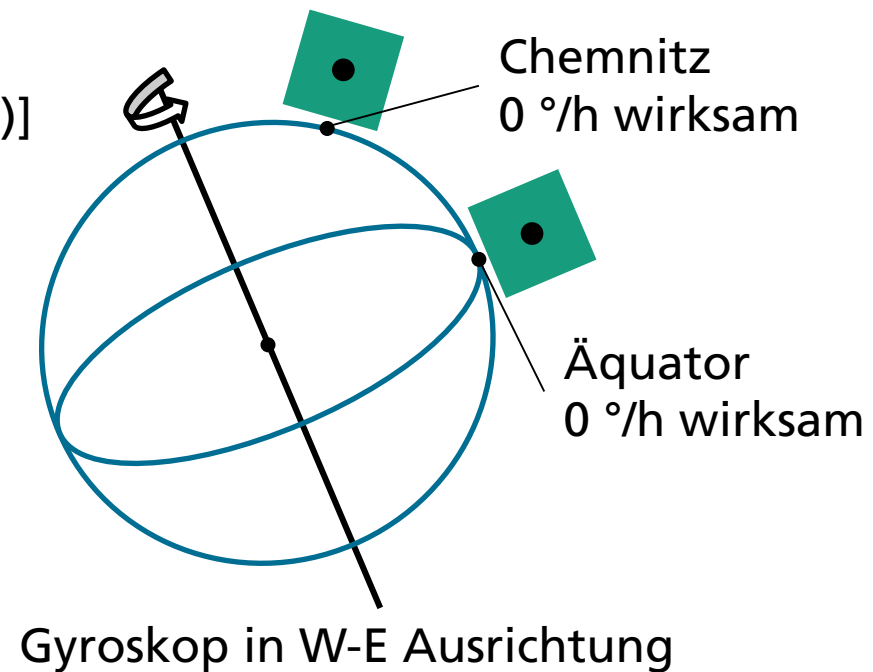
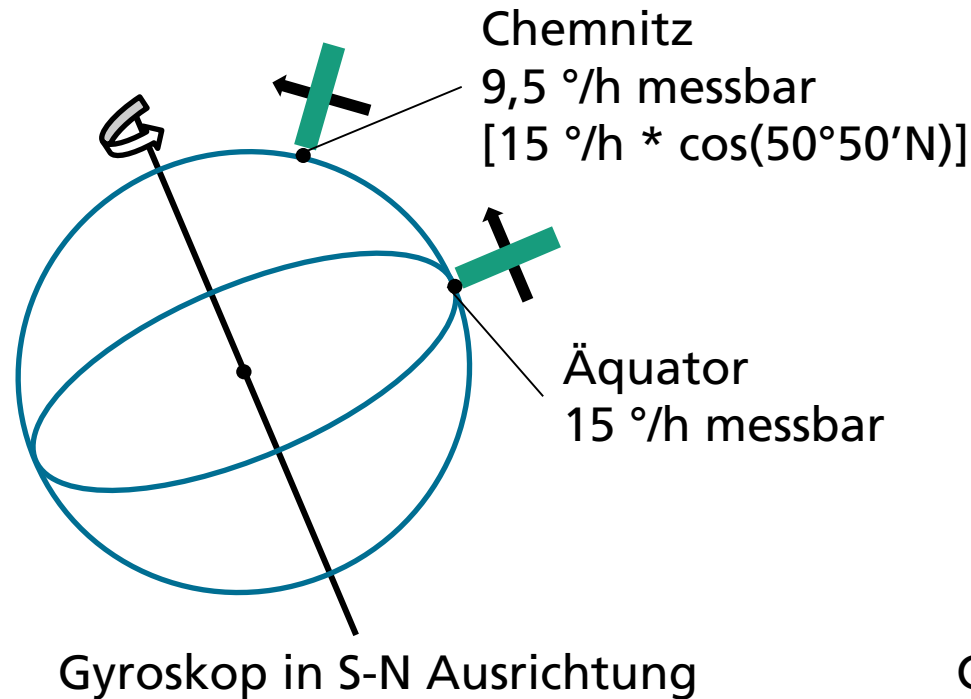


Überlegungen zur Messung der Erddrehrate

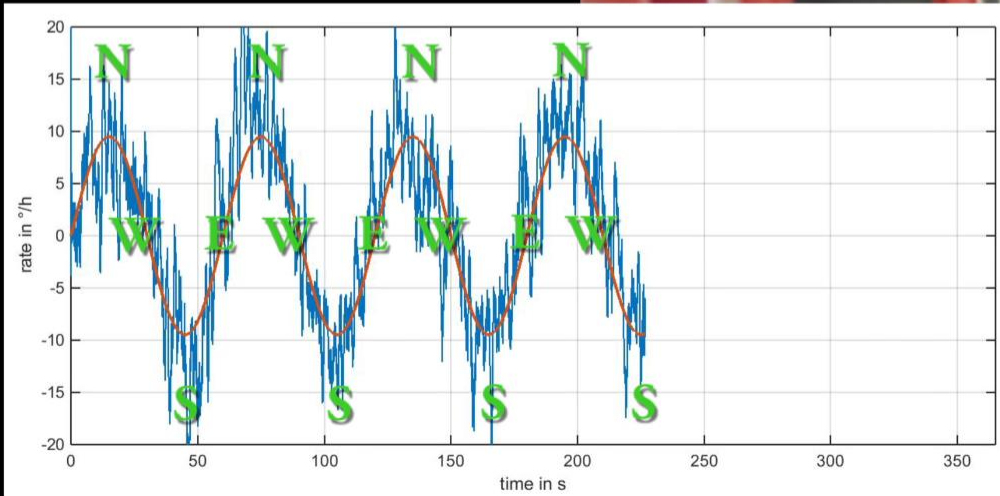
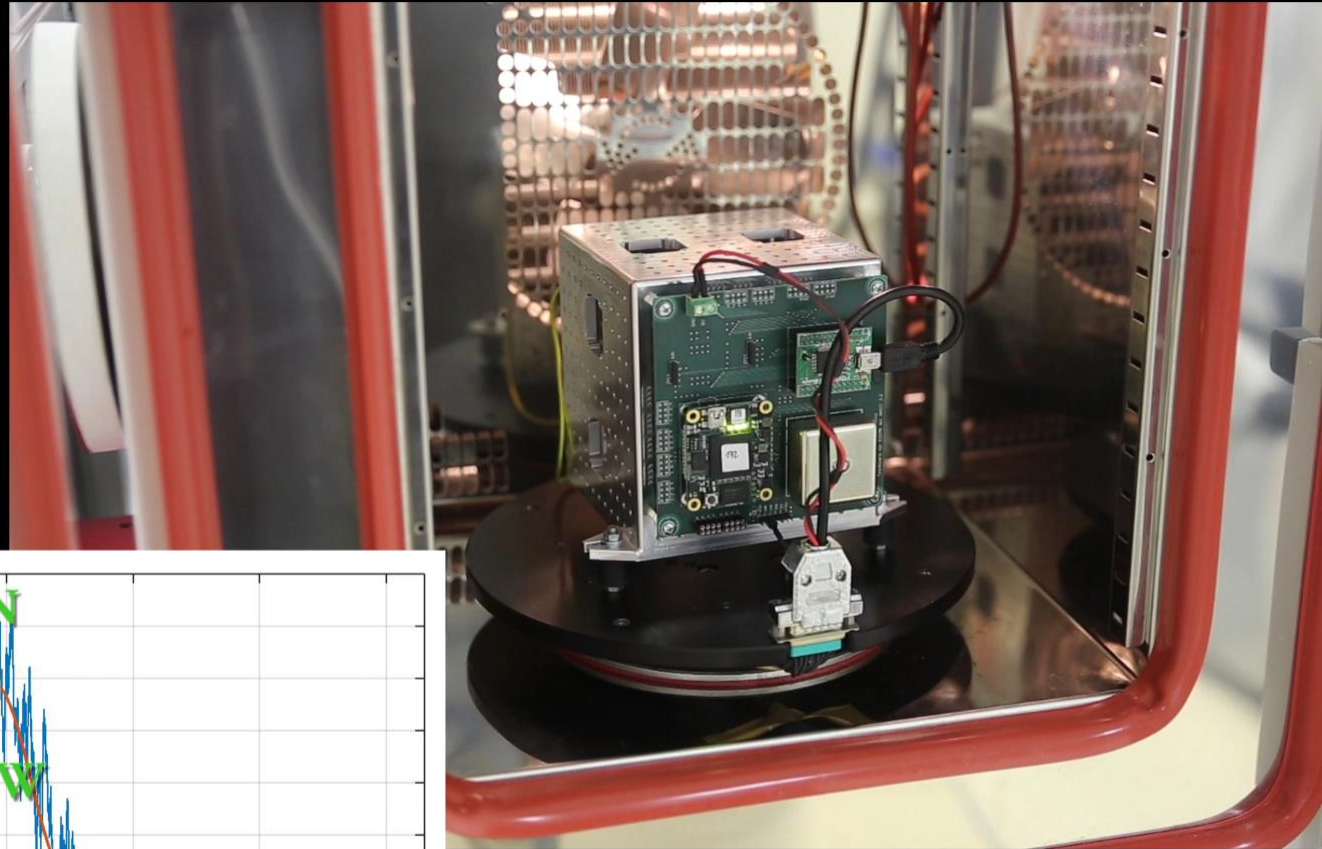
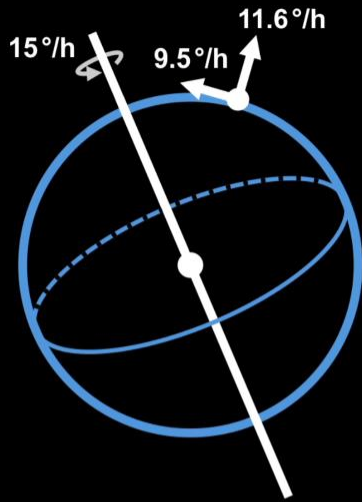
- Die Erde dreht sich ca. eine Umdrehung pro Tag, das sind 15 °/h bzw. ca. 0,004 °/s



Blue Marble, NASA 2012



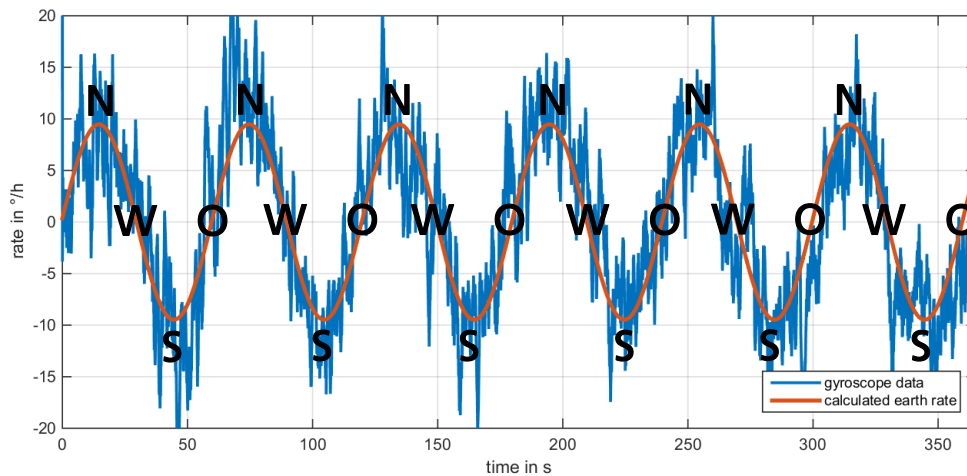
Messung der wirksamen Erddrehrate



Pointing South

Messung der Erddrehrate
Bearbeiter: Roman Forke
Datum: 07.12.2015
Ort: Chemnitz, 50°50'N

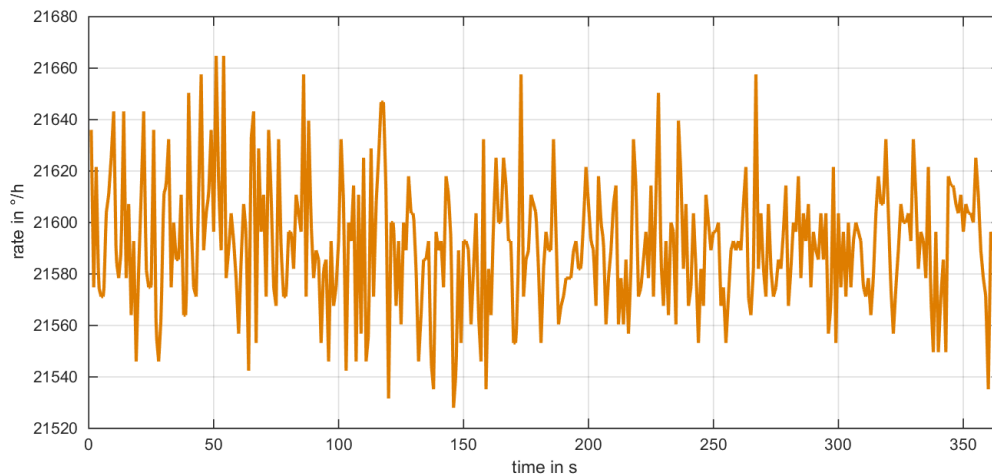
Messung der wirksamen Erddrehrate



0 + 20 °/h

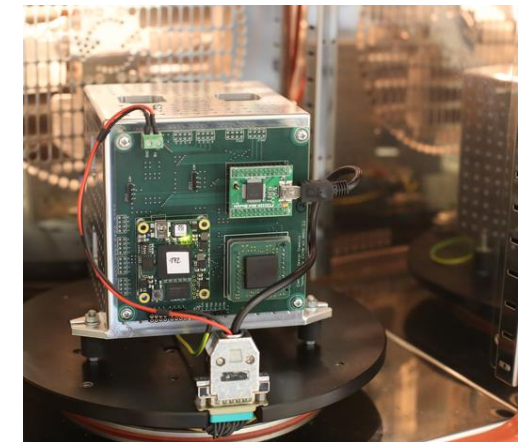
Messdaten von Gyrosystem
mit gleitender
Mittelwertbildung über 1 s

0 - 20 °/h



6 °/s + 80 °/h

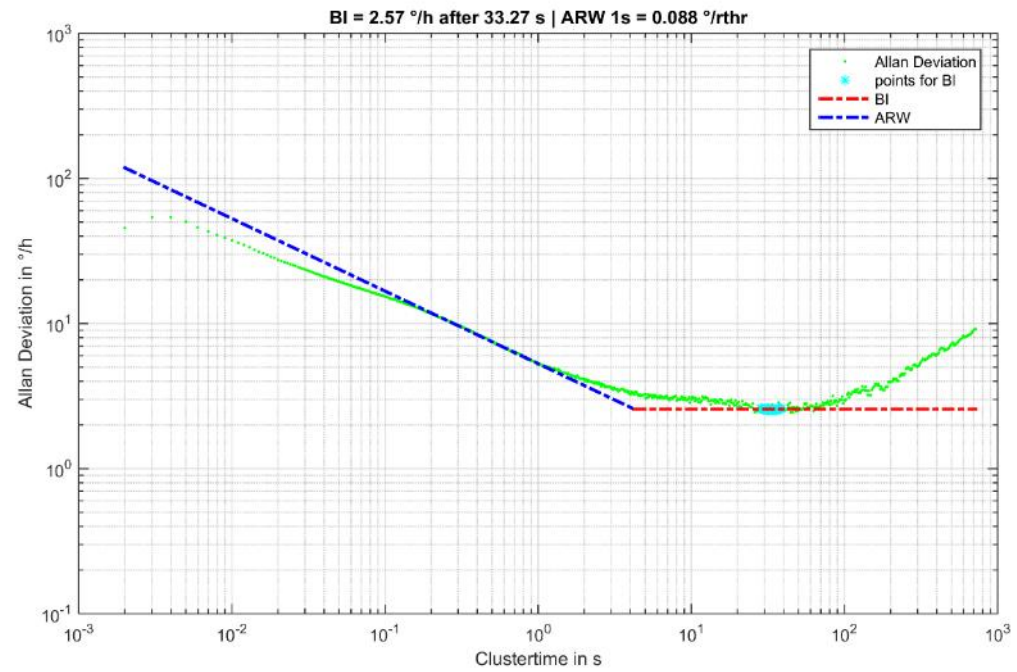
6 °/s - 80 °/h



Daten vom Drehtisch
konstante Drehgeschwindigkeit
von 6 °/s bzw. 5,99 °/s ± 25 °/h

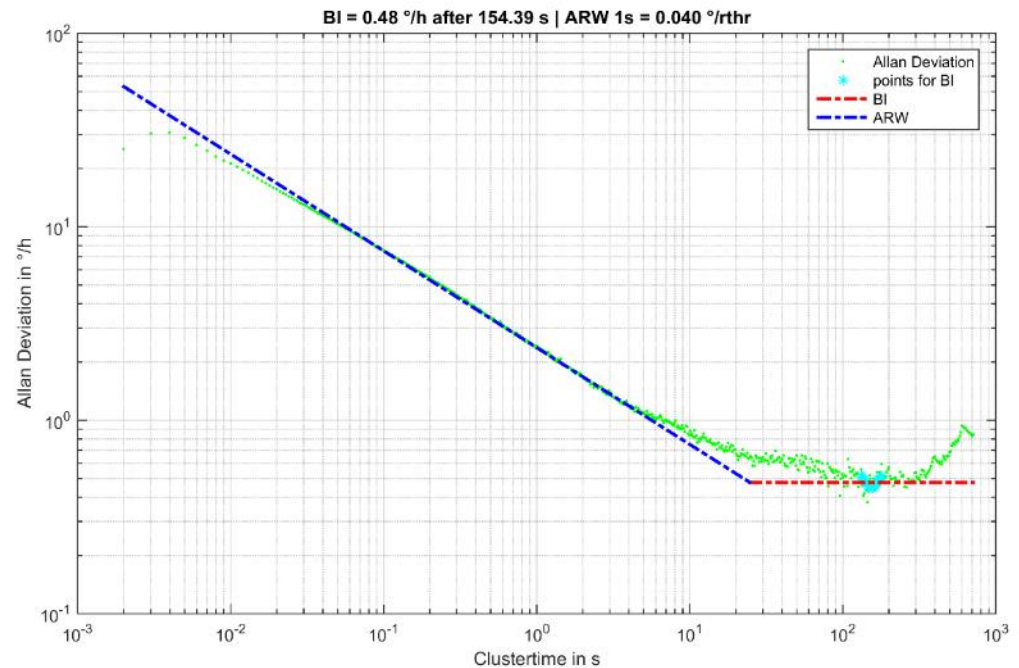
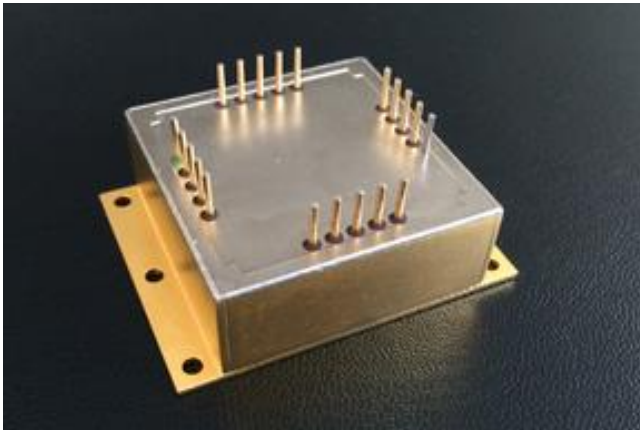
Messergebnisse FG4 CLDCC68

- BI 2.6 °/h ARW 0.09 °/√h
- Short term bias $1\sigma = 9$ °/h
- Scale Factor = 1407 LSB/dps
- 2 ASICs (analog + digital)



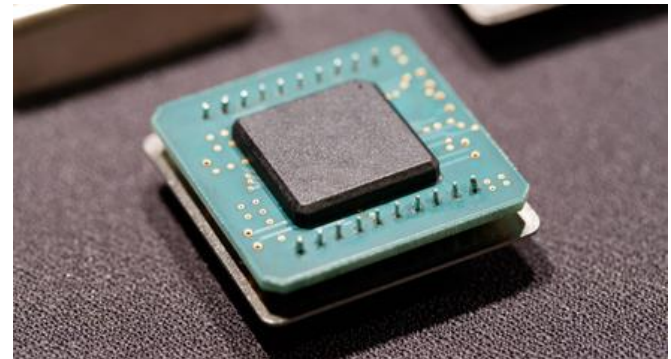
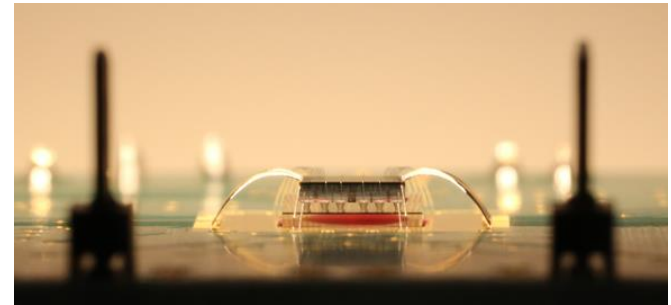
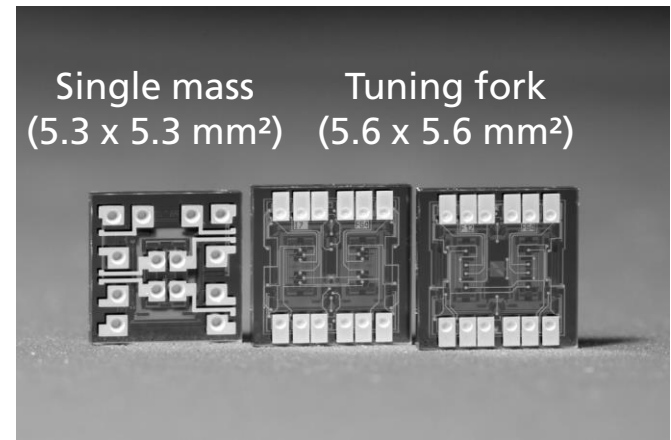
Messergebnisse FG5 Kovar

- BI 0.5 °/h ARW 0.04 °/√h
- Short term bias $1\sigma = 3$ °/h
- Scale Factor = 1234 LSB/dps
- 2 ASICs (analog + digital)



Zusammenfassung

- Zwei-Massen (tuning fork) Gyrosystem
- Bias Instability und Angle Random Walk im Bereich der führenden Wettbewerber
- Short Term Bias Stability von 3..5 °/h wesentlich kleiner als bei Tronics (30 °/h)
- Messbereich bis 500 °/s
- Umfassende Charakterisierungskonzepte und automatisierte Messungen
- Wafer-Level Charakterisierung der MEMS im System mit ASIC-Probecard
- Einsatz für z.B. Stabilisierungsaufgaben, Navigationsunterstützung, ...



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

