

---

# Hochpräzises MEMS-Gyroskop

---

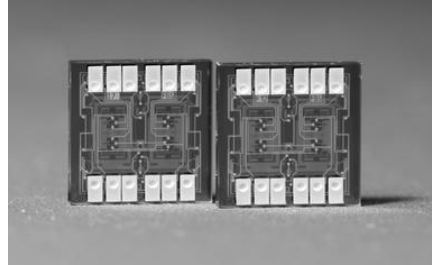
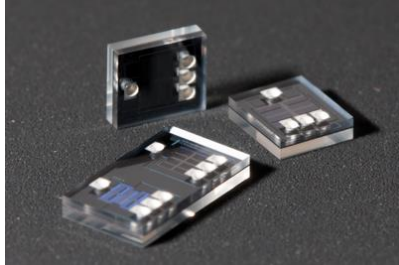
ENAS: Roman Forke, Alexey Shaporin,  
Sebastian Weidlich, Alexander Tsapkolenko

ZfM: Karla Hiller, Susann Hahn, Matthias Küchler

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

# Definition „MEMS Gyroskop“

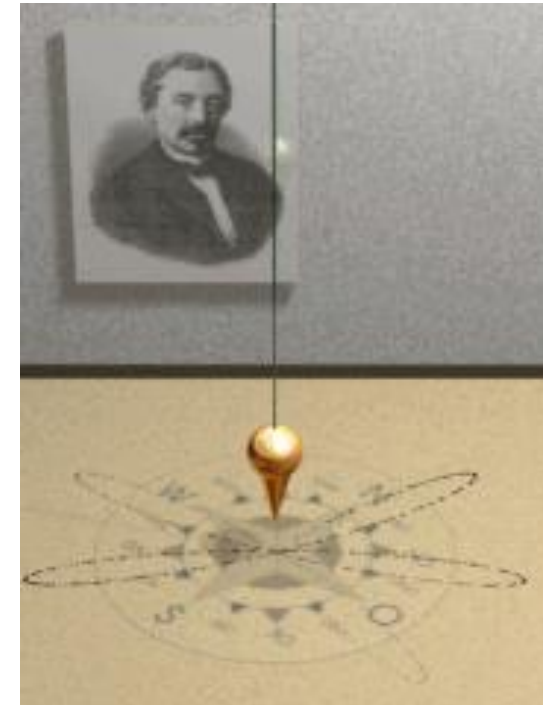
- MEMS = Mikro Elektro-Mechanisches System (kleinste Strukturen im  $\mu\text{m}$ -Bereich)



- 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 ( $\Omega$ ) drehen
- Typisches Beispiel: Foucault'sches Pendel



Source:  
[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Foucault\\_pendulum\\_animated.gif](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Foucault_pendulum_animated.gif)

# Definition „hochpräzise“

engl.: high precision bzw.  
high performance

Vorgabe von YOLE:

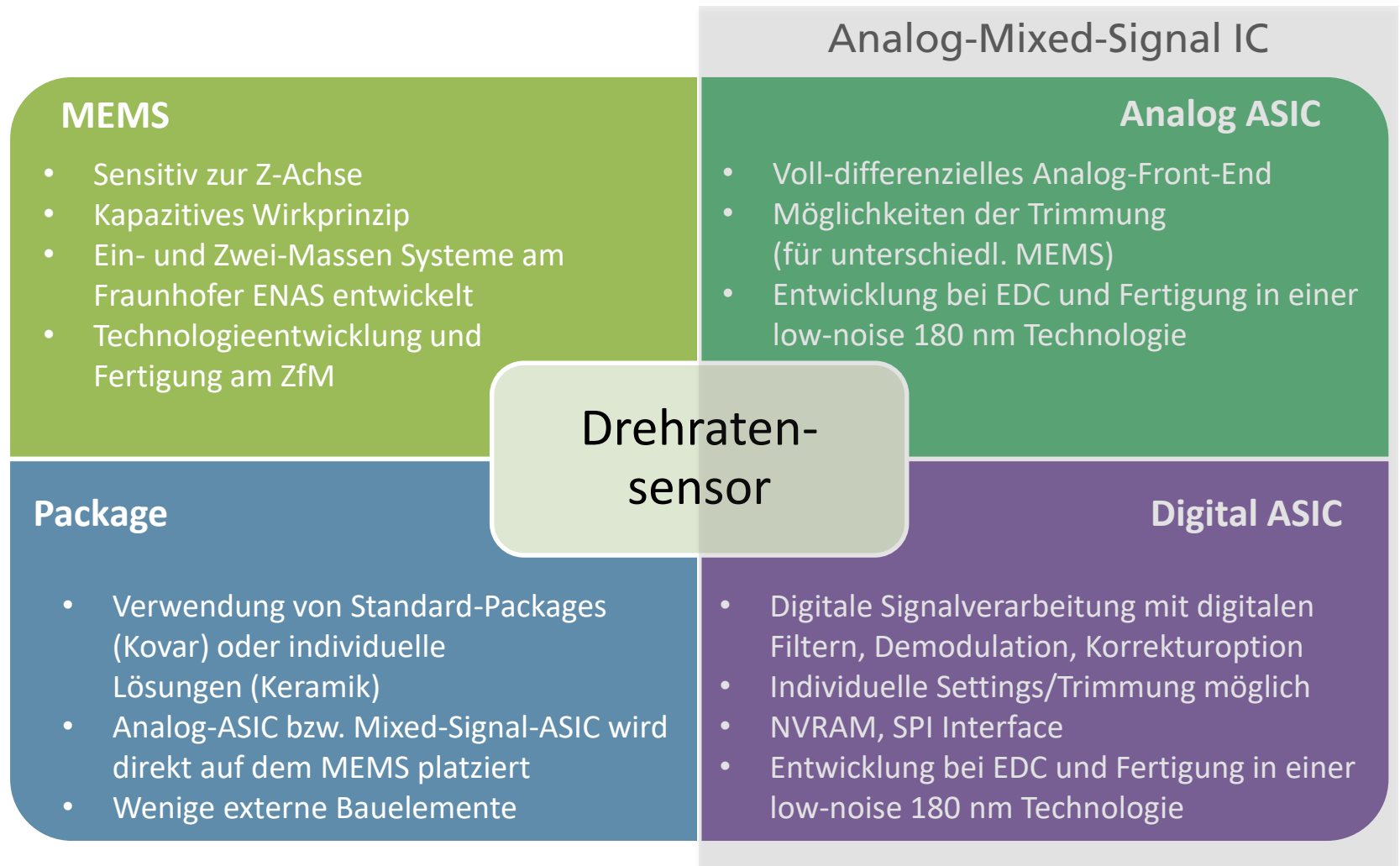
- Einordnung in unterschiedliche Bereiche anhand der Bias Stabilität als Hauptparameter der Sensoren
- Bias Stabilität bezeichnet eine Offset-Drift ohne Beschleunigung oder Drehrate
- Für „tactical grade“ IMUs werden Gyroskope mit einer Bias Stabilität von 0.1°/h bis 100°/h verwendet

## 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	
100µg	0,01°/h	Navigation
10µg	0,001°/h	Strategic
1µg	0,0001°/h	



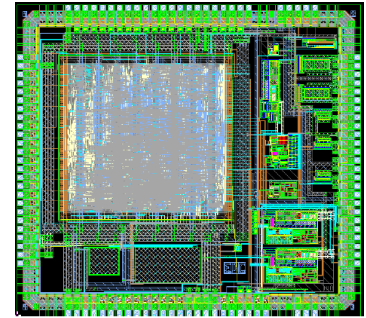
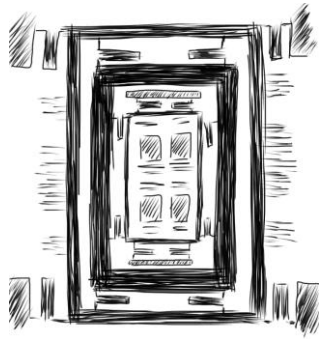
# Kernelemente eines Drehratensensors



# 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

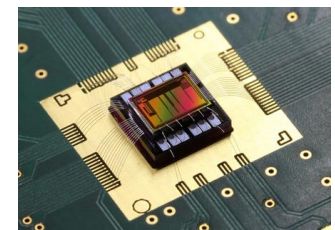
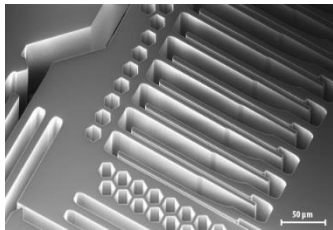
## ASIC

Schaltungsentwicklung  
Simulation  
Layout  
Fertigung  
Wafer-Level-Charakterisierung

Systemsimulation mit  
FEM/Layout Daten

## Package-Konzept

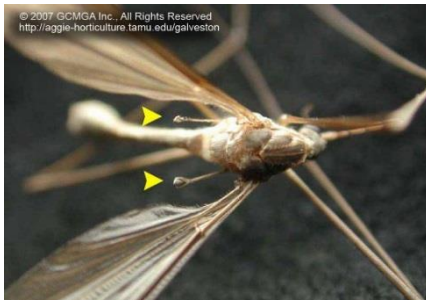
Aufbau in System-Packages  
System-Level-Charakterisierung



# MEMS Design für Drehratensensor

## Vorbild Natur

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



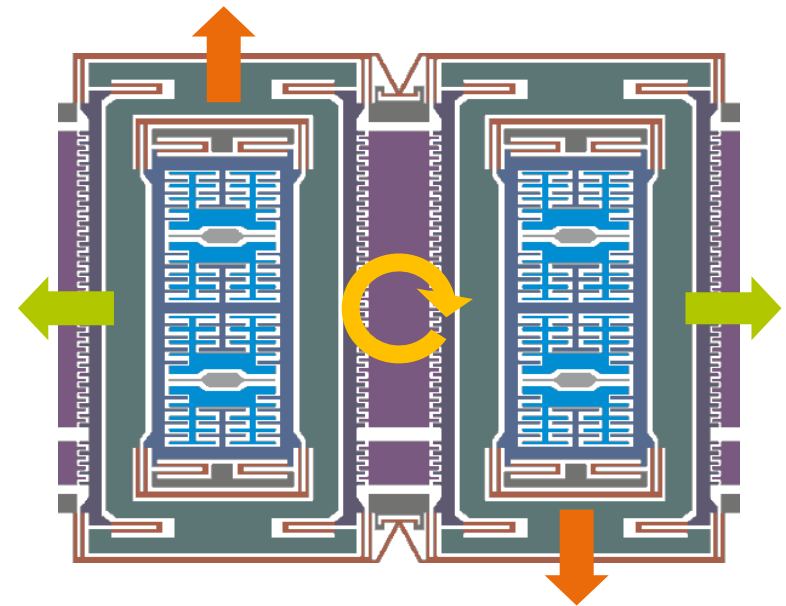
$$F_C = -2m(\Omega \times v)$$



YouTube: BBC - Life on Earth



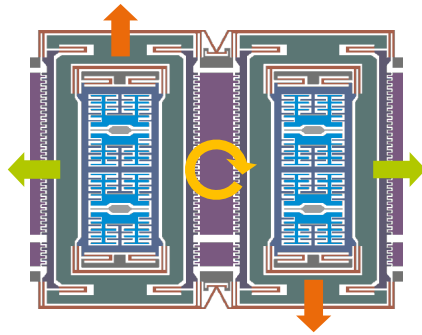
Primärschwingung (Drive Mode)  
Drehung um z  
Sekundärschwingung (Sense Mode)





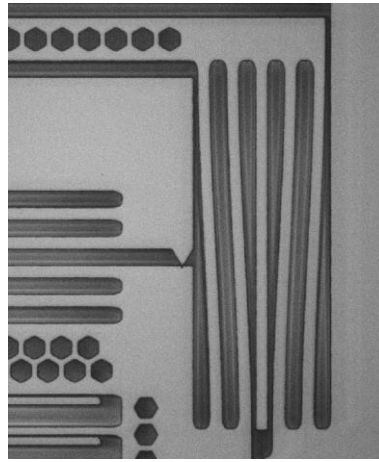
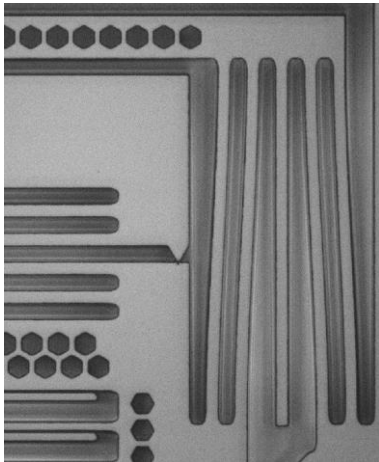
# MEMS Design für Drehratensensor

- 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  $\sim 100\ \text{pm}$

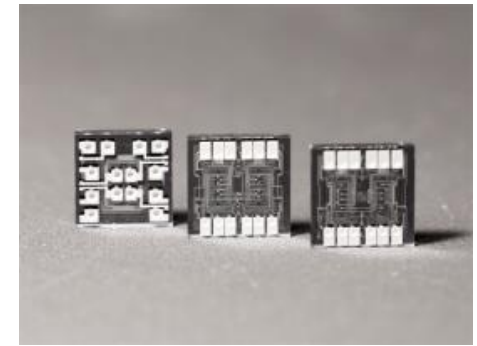




# MEMS Technologie

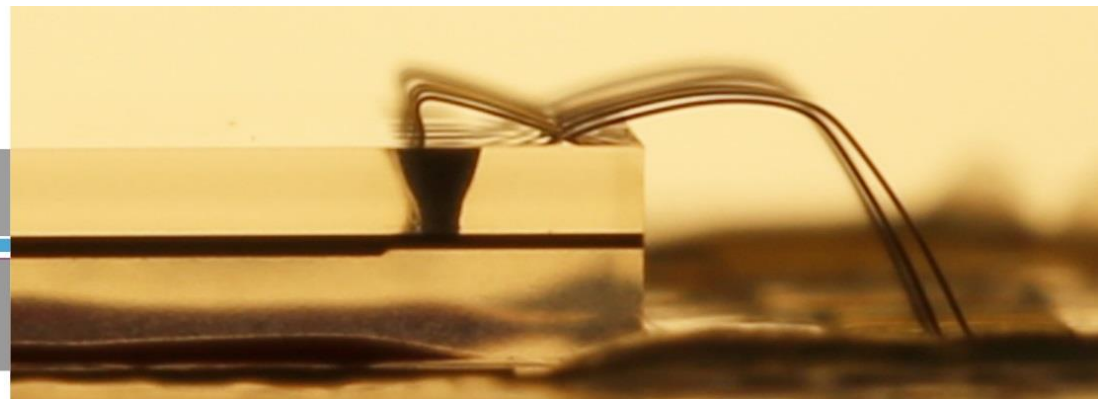
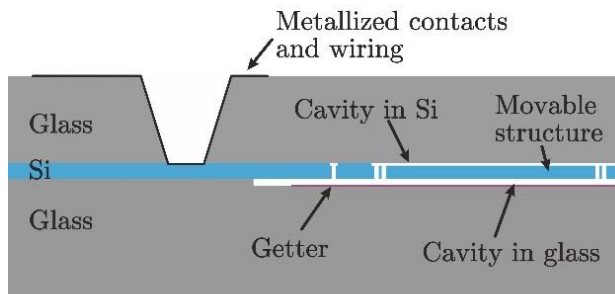
## BDRIE (Bonding and Deep Reactive Ion Etching)

- HAR Technologie
  - 50  $\mu\text{m}$  Strukturhöhe
  - 1.8  $\mu\text{m}$  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)

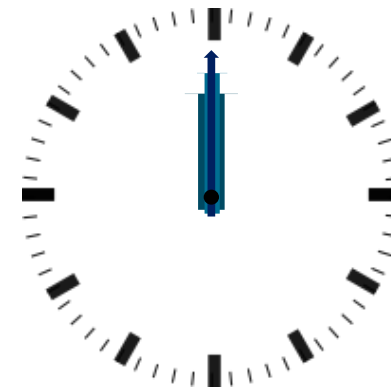
- ESP Sensor bis zu 100 °/s

## Beispiel analoge Uhr

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



Foto: dpa

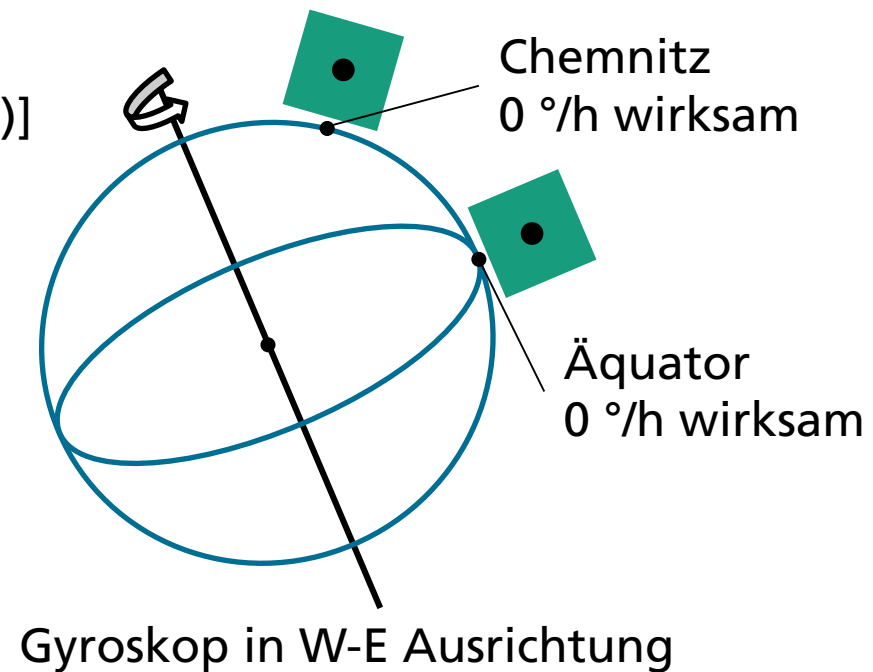
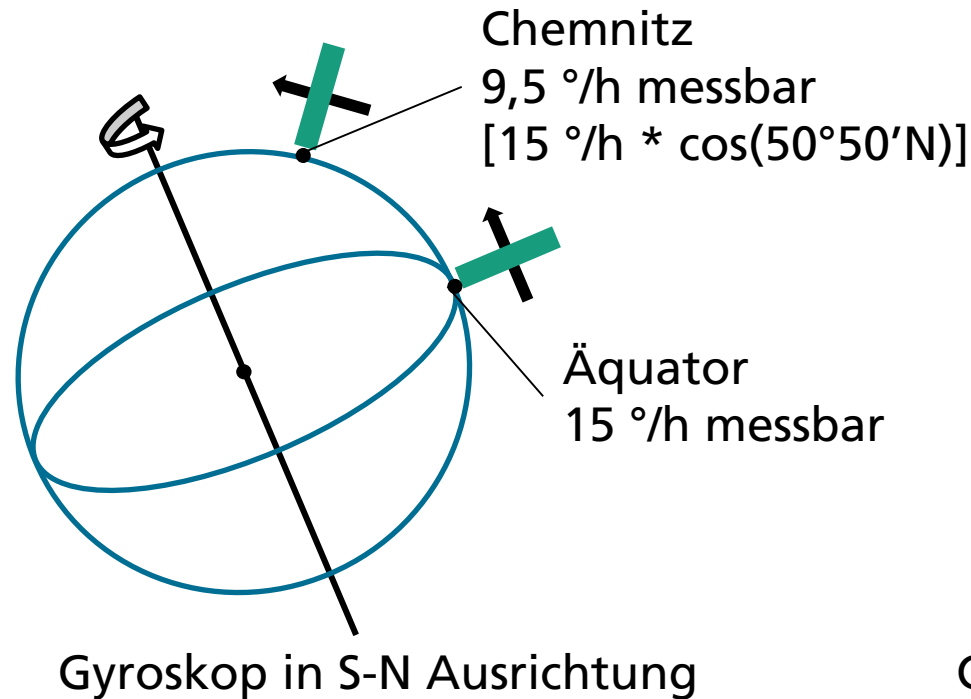


# Überlegungen zur Messung der Erddrehrate

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

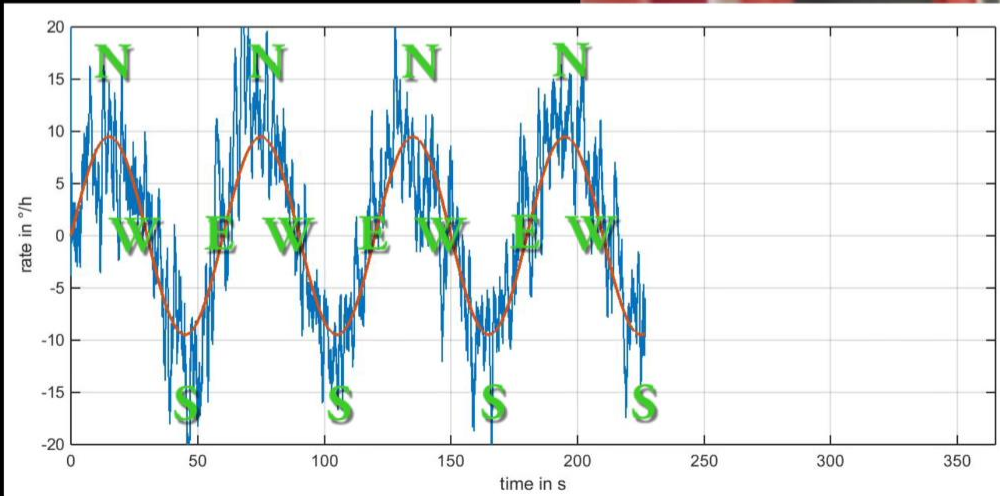
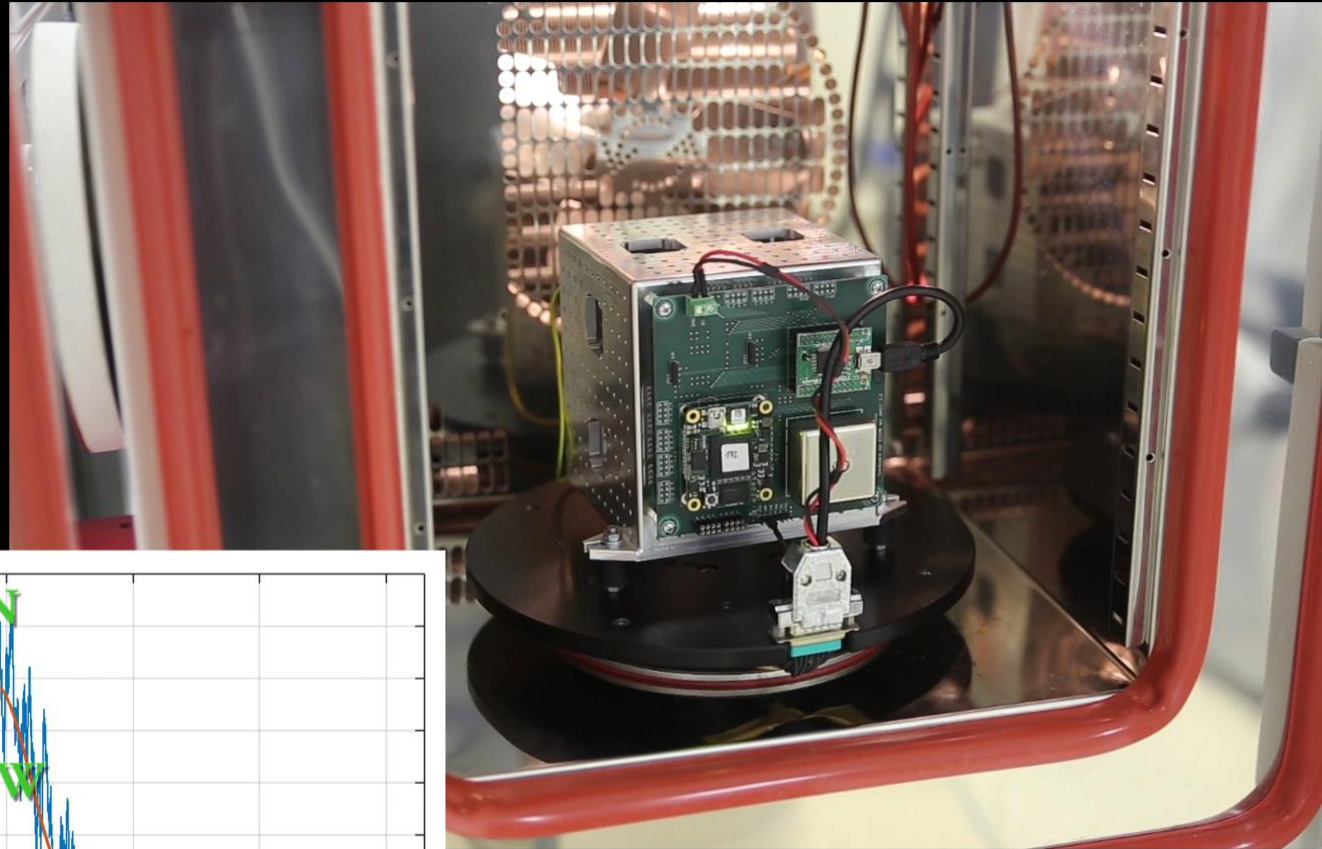
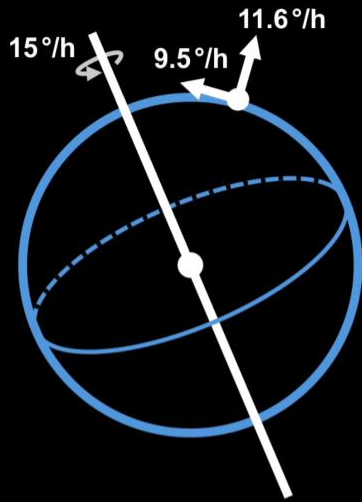


Blue Marble, NASA 2012





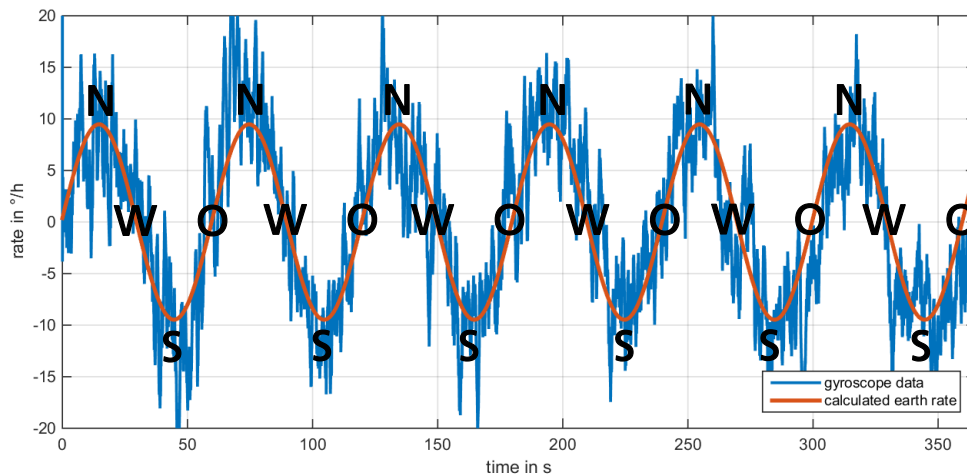
# Messung der wirksamen Erddrehrate



## Pointing South

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

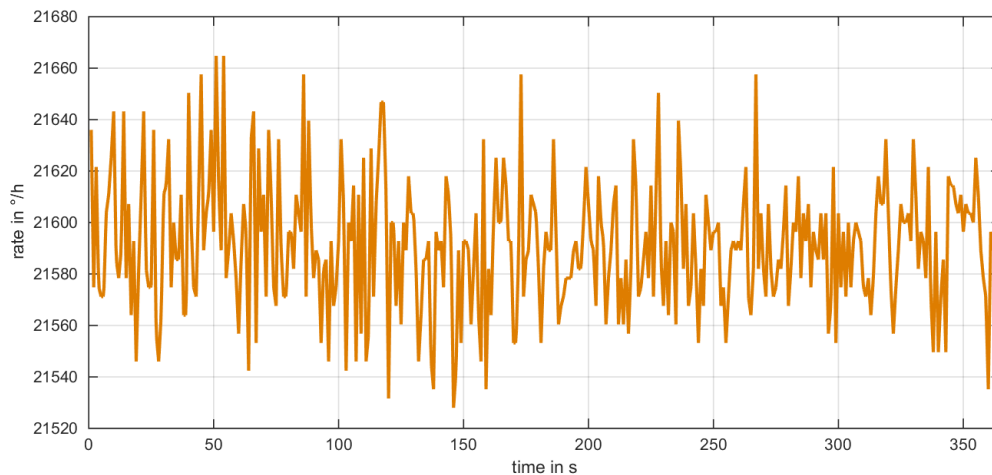
# Messung der wirksamen Erddrehrate



0 + 20 °/h

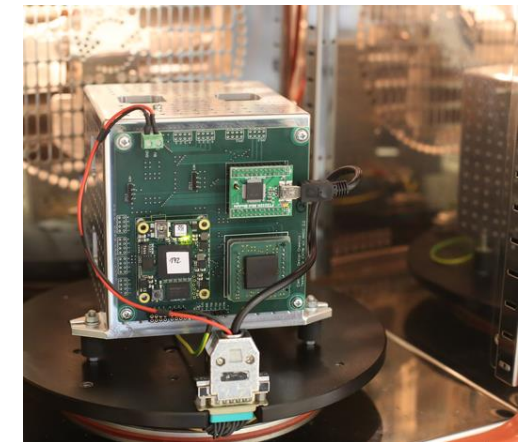
Messdaten von Gyrosystem  
mit gleitender  
Mittelwertbildung über 1 s

0 - 20 °/h



6 °/s + 80 °/h

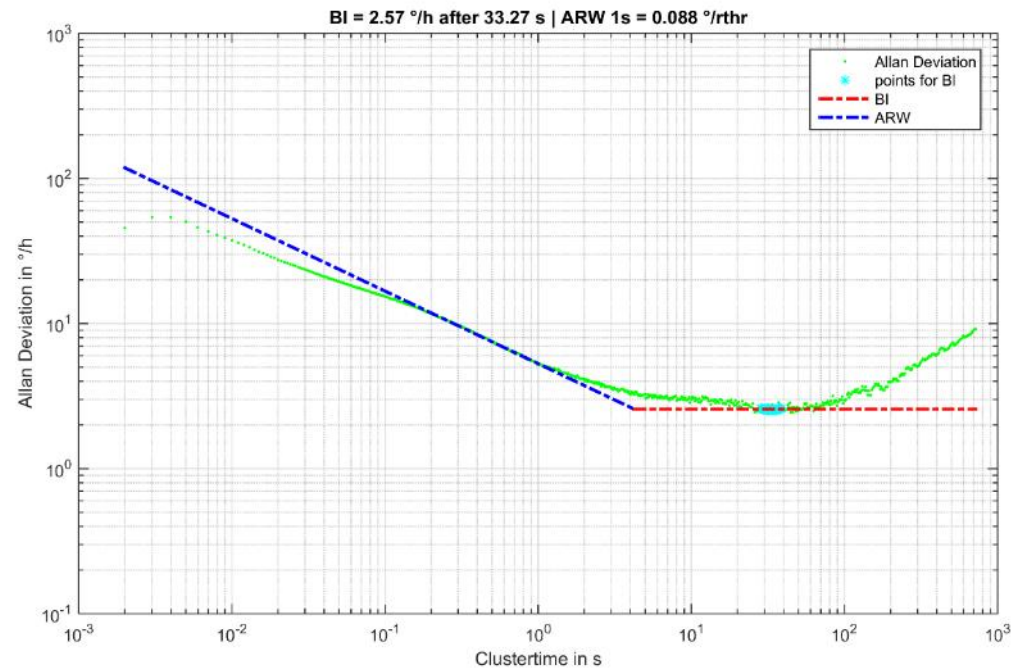
6 °/s - 80 °/h



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

# Messergebnisse FG4 CLDCC68

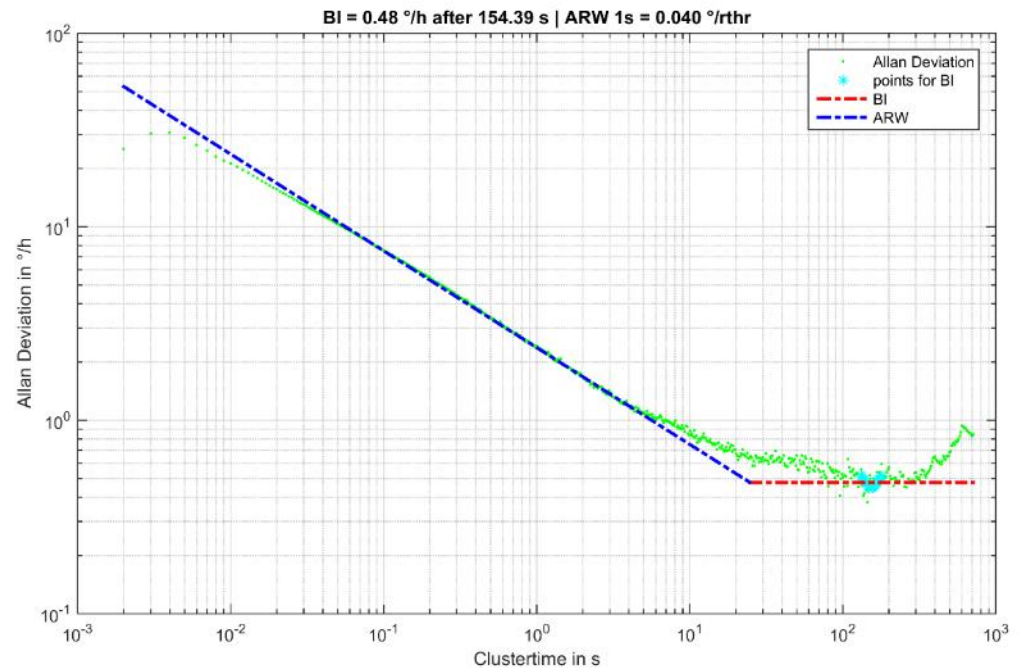
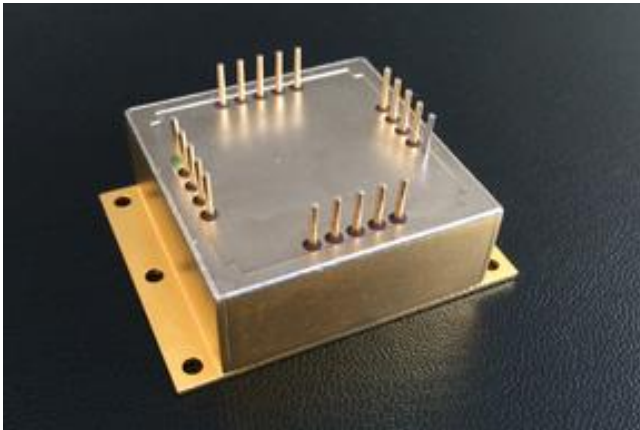
- BI 2.6 °/h ARW 0.09 °/√h
- Short term bias  $1\sigma = 9$  °/h
- Scale Factor = 1407 LSB/dps
- 2 ASICs (analog + digital)





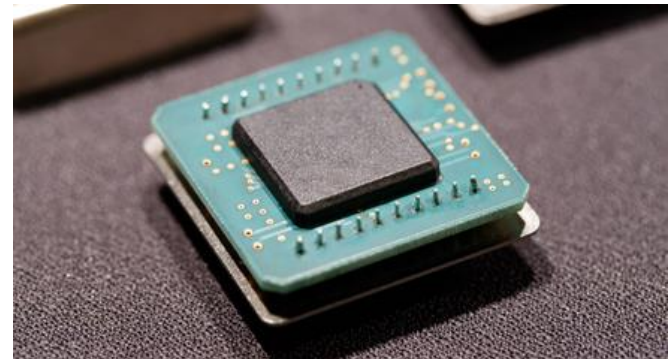
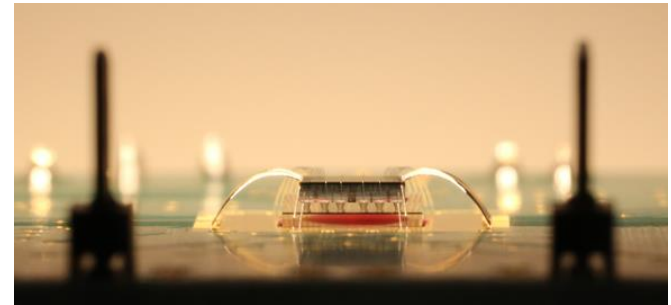
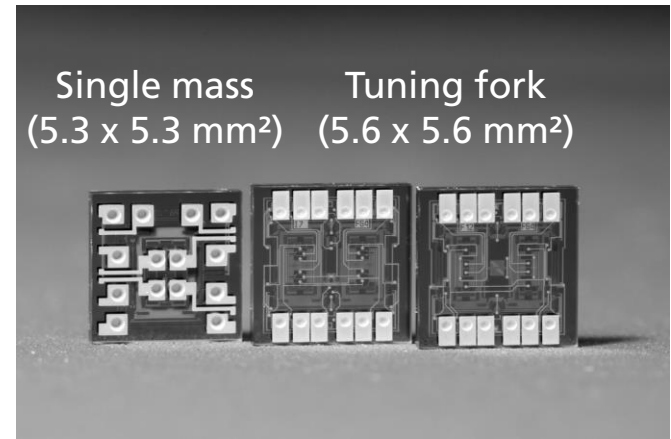
# Messergebnisse FG5 Kovar

- 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

