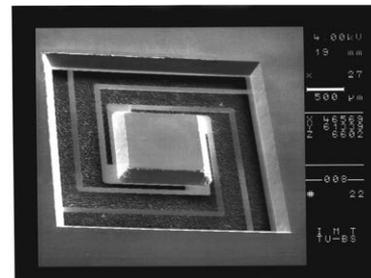


Robotik III: Sensoren in der Robotik

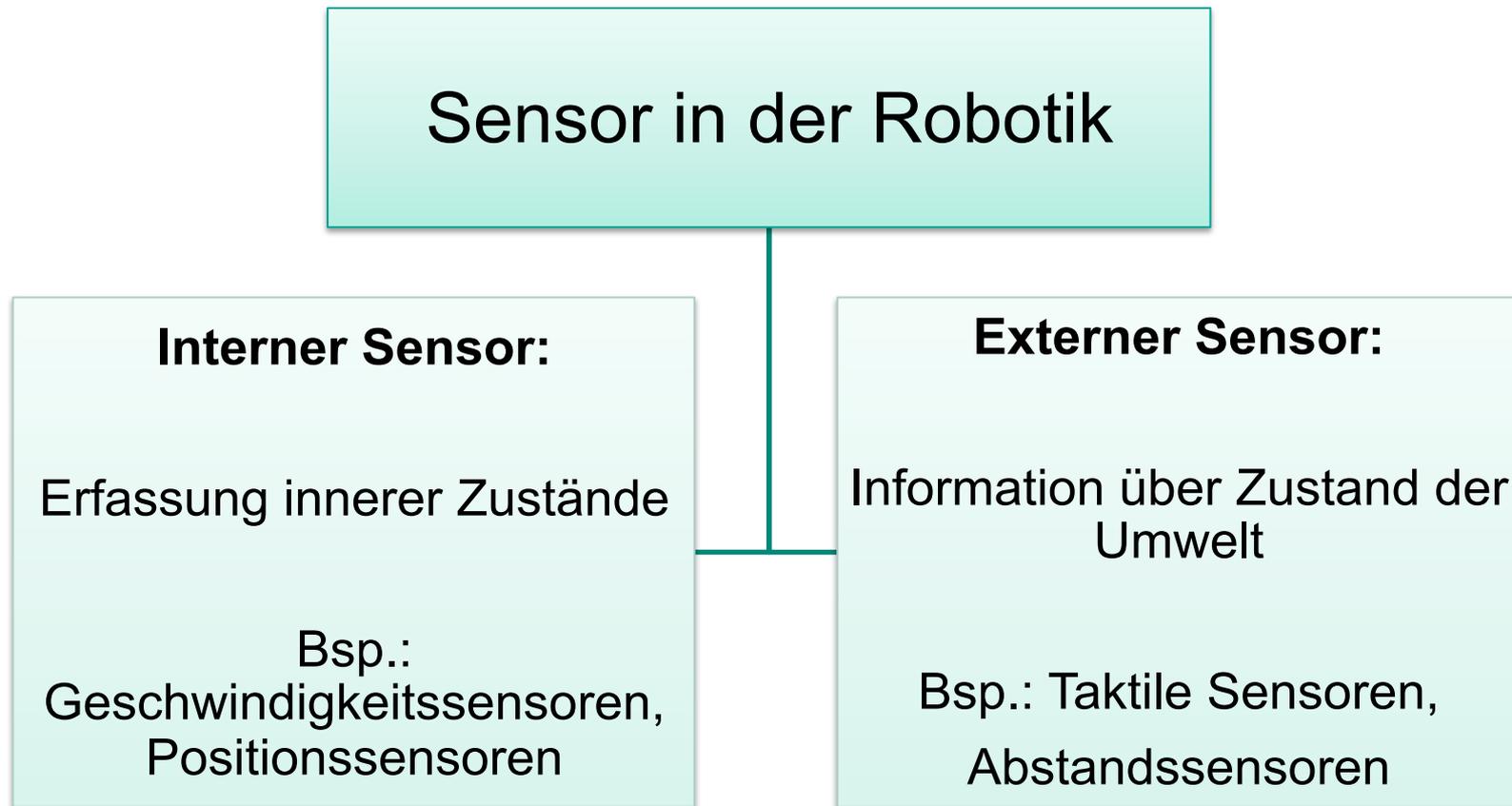
Interne Sensoren

Fakultät für Informatik, Institut für Anthropomatik und Robotik (IAR),
Humanoids and Intelligence Systems Lab (HIS) & High Performance Humanoid Technologies (H²T)



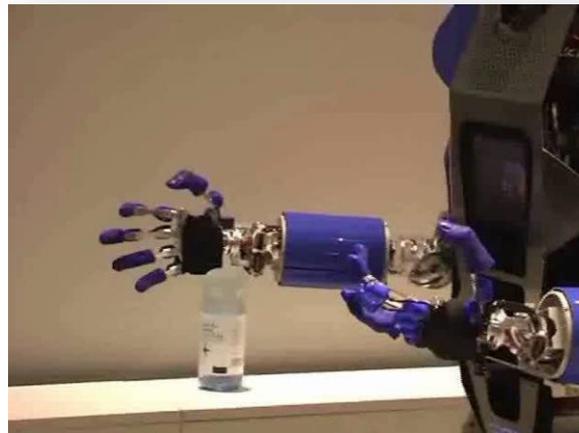
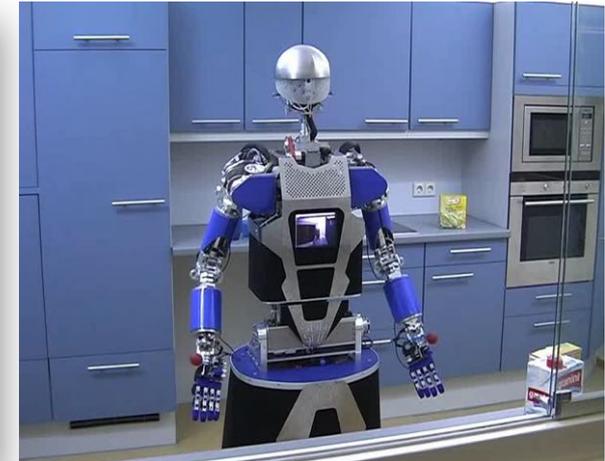
Sensortechnologie - Einführung in verschiedene Sensorarten

Klassifikation von Sensoren nach ihrer Funktionsweise:



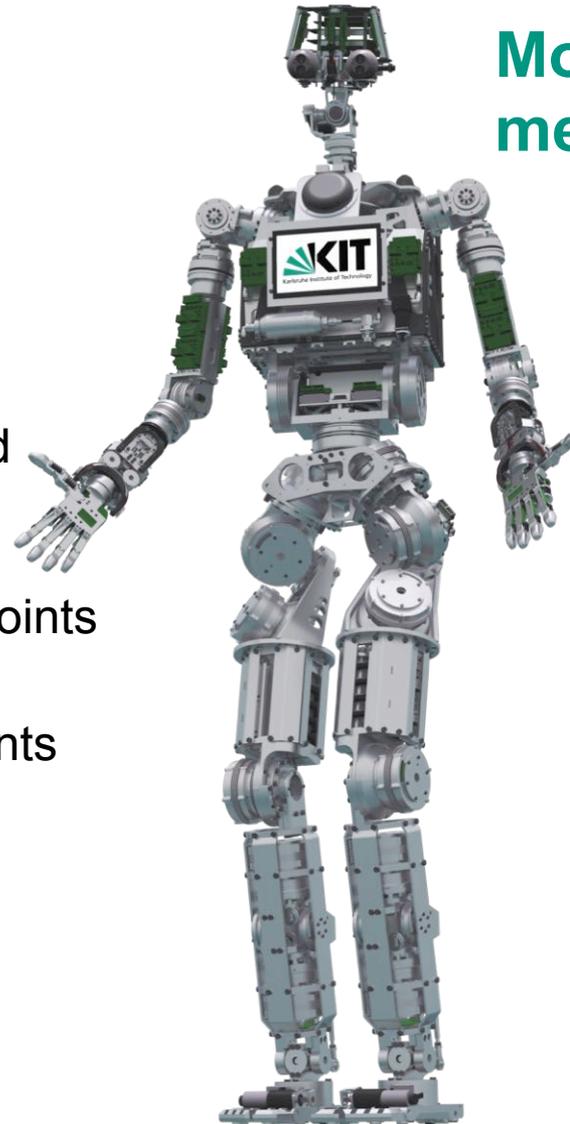
ARMAR-IIIa (2006) and ARMAR-IIIb (2008)

- 7 DOF head with foveated vision
 - 2 cameras in each eye
 - 6 microphones
- 7-DOF arms
 - Position, velocity and torque sensors
 - 6D FT-Sensors
 - Sensitive Skin
- 8-DOF Hands
 - Finger position sensors
 - Tactile sensors
- Holonomic mobile platform
 - 3 laser scanner



ARMAR-4 (2013)

- 238 Sensors
 - 4 Cameras
 - 6 Microphones
 - 4 6D-force-torque sensors
 - 2 IMUs
 - 128 position (incremental and absolute), torque and temperature sensors in arm, leg and hip joints
 - 18 position (incremental and absolute) sensors in head joints
 - 14 load cells in the feet
 - 22 encoders in hand joints
 - 20 pressure sensors in hand actuators
 - ...



More than
mechatronics

ARMAR-IV

made@KIT

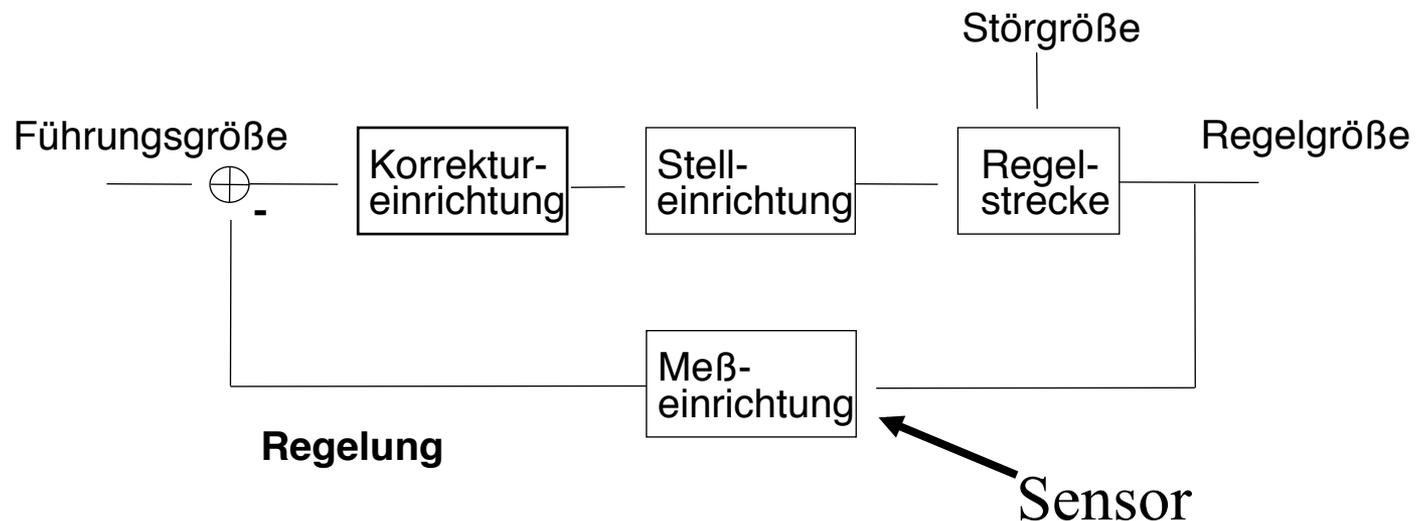
70 kg

170 cm

Interne Sensorik

- Erfassung **interner** Systemzustände
 - Position, Geschwindigkeit, Beschleunigung
 - Orientierung, Neigungswinkel, Kippwinkel
 - Kräfte (Dehnung, Torsion)

- Können der Regelung von Bewegungsvorgängen dienen
 - z.B. Motordrehzahl eines radgetriebenen Roboters



Charakteristisch Größen eines Sensors

- **Messbereich (range):** [min,max]
- **Auflösung (resolution) :** kleinstes Inkrement eines Signals, das detektiert werden kann
 - Ein inkrementell Encoder, der 1024 Impulse pro Umdrehung liefert hat eine Auflösung von
$$1 \text{ Umdrehung} / 1024 \text{ Impulse} \times 360 \text{ Grad} / 1 \text{ Umdrehung} = 0,3516 \text{ grad} / \text{Impuls}$$
- **Empfindlichkeit (Sensitivity):** Änderung des Ausgangs in Abhängigkeit von Änderung des Eingangs
 - Ein Sensor mit linearen Verhalten hat eine konstante Empfindlichkeit über den gesamten Messbereich

Charakteristisch Größen eines Sensors

- **Fehler (Error):** Differenz zwischen gemessenen Wert und tatsächlichem Wert
 - Systematische Fehler (bias)
 - Genauigkeitsfehler (zufällige) Fehler
- **Wiederholgenauigkeit (Repeatability):** Fähigkeit identisches Output beim gleichem Input zu liefern
- **Linearität und Genauigkeit (Linearity and Accuracy):**
 - Genauigkeit \sim Fehler eines Sensors: Ein sehr genauer Sensor produziert sehr kleine Fehler
 - Oft wird die Genauigkeit durch die Linearität des Sensors ausgedrückt

Interne Sensoren

Interne Sensoren

Positionssensor

Geschwindigkeits-
sensor

Be-
schleunigungs-
sensor

INS
(Inertial Navigation
System)

Potentiometer

Tachogenerator

Piezoresistiv

Gyroskop

Optische
Codierer

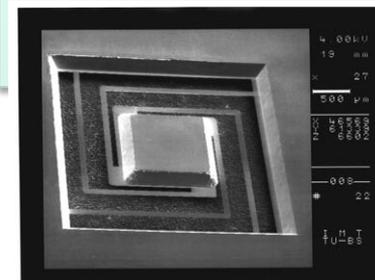
Optische
Codierer

Piezoelektrisch

Mikromechan.
Vibrationskreisel



Quelle: <http://ah-electronics.de/ah-sensoren/ahs06810baac.pdf>

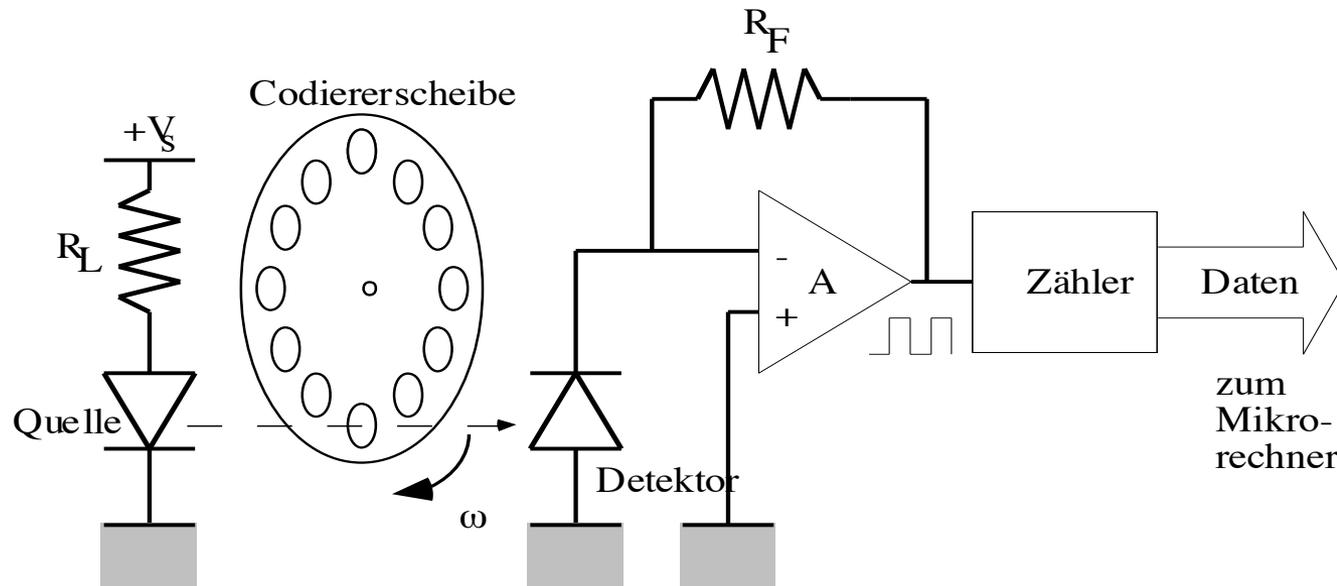


Optische Codierer

- Information über Position von rotatorischen oder translatorischen Gelenken oder über die relative Position eines Fahrzeuges

- Bauarten:
 - Inkrementelle Encoder
 - Absolute Encoder

Inkrementelle optische Codierer

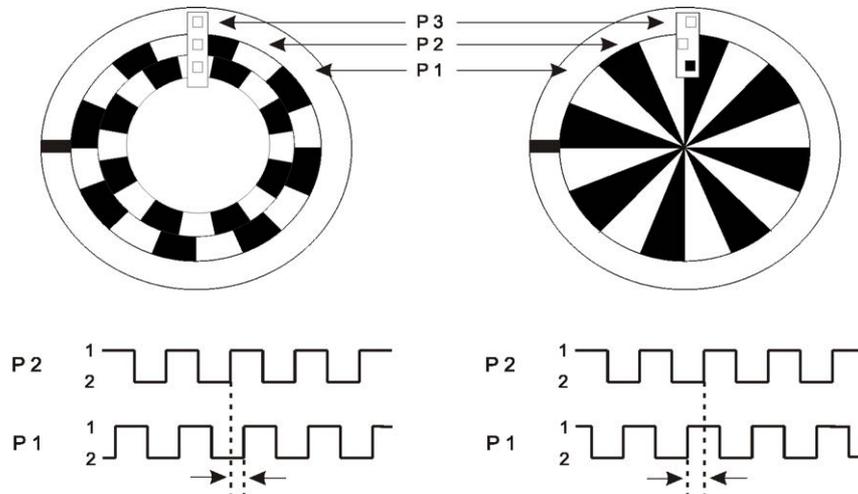


■ Prinzip:

- Lichtstrahl wird auf Photodetektor ausgerichtet,
- auf einer Scheibe angebrachtes codiertes Muster (Code) unterbricht periodisch den Strahl (Scheibe mit durchsichtigen und undurchsichtigen Stellen)
- die Unterbrechungen werden gemessen und evtl. der Code festgestellt

Optische Codierer I (Inkrementell)

Inkrementell



Vorteile: einfache Kodierscheiben, einfache Zählung

Nachteile: Startposition unbekannt (Kalibrierung notwendig)

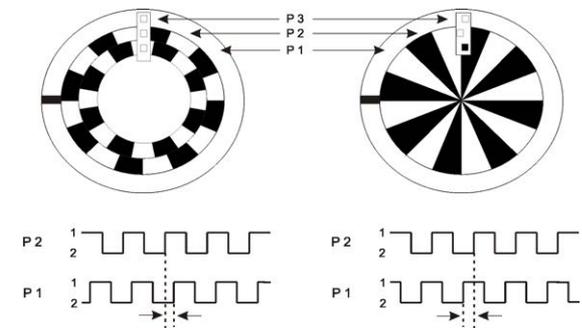
Optische Codierer I (Inkrementell)

1-spurige Codierscheibe (Winkel)

- Spur P1
- Anzahl der Impulse \sim gefahrener Winkel
 - Bei kontrollierter Fahrt: ok
 - Bei Störeinfluss: Richtung der Störung?



Regelung nicht möglich aber für Steuerung geeignet

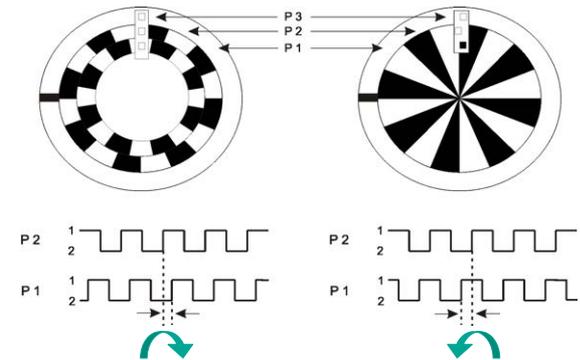


Optische Codierer I (Inkrementell)

2-spurige Codierscheibe (Winkel und Richtung)

- Spur P1 und P2
- Prinzip: versetzte Dioden bzw. Codes
 - Phasenverschiebung (gewöhnlich $90^\circ/270^\circ$) zwischen Diodensignalen
 - Richtung aus Phasenverschiebung
 - Regelung möglich

- Problem: Initialisierung/Wiederaanfahren (Position unbekannt?)
 - ➔ Kalibrierung notwendig, aber nicht unmöglich

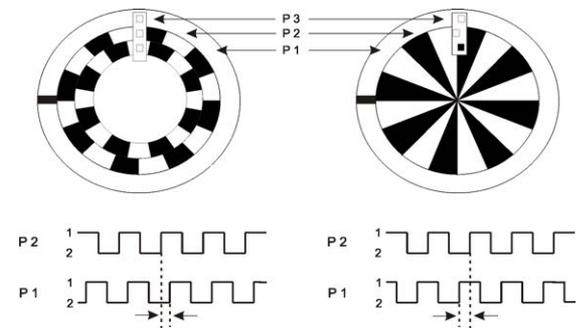


Optische Codierer I (Inkrementell)

3-spurige Codierscheibe (Winkel, Richtung, Anfang/Ende)

 zusätzlich Anfang/Ende-Markierung

- Spur P3
- Kontrolliertes Fahren in Initialposition (falls 1 Umdrehung genügt)
- Initialisierung der Regelgrößen

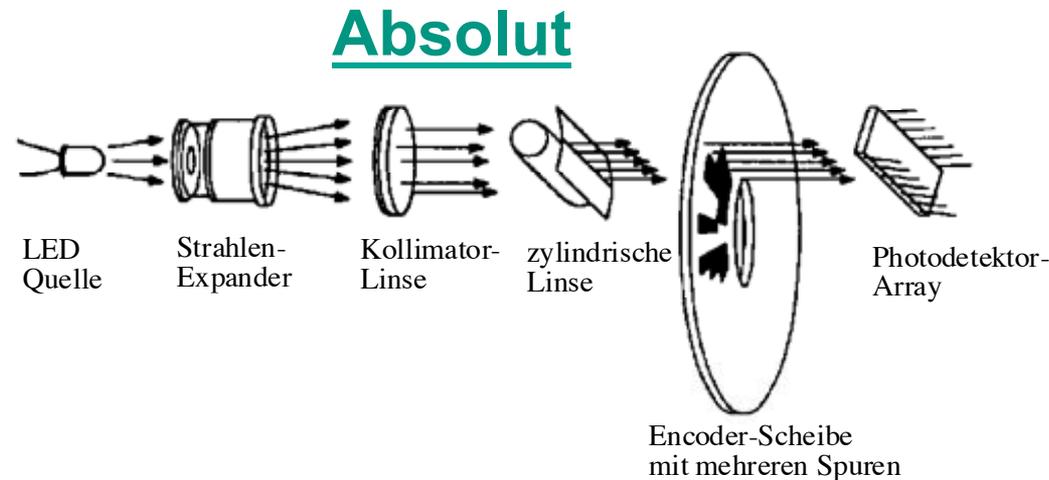


Problem

- Beim Stromausfall gehen alle Positionssensoren verloren, so dass eine Kalibrierung nach jedem Systemstart notwendig ist
- Aus diesem Grund müssen die Gelenke von ARMAR-III bei jedem Start initialisiert werden
 - Fahren jedes Gelenks bis zum Anschlag
 - Fahren in eine vordefinierte Position



Optische Codierer II (Absolut)

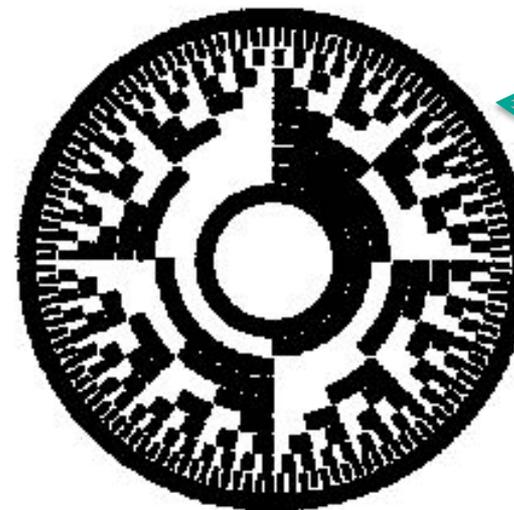
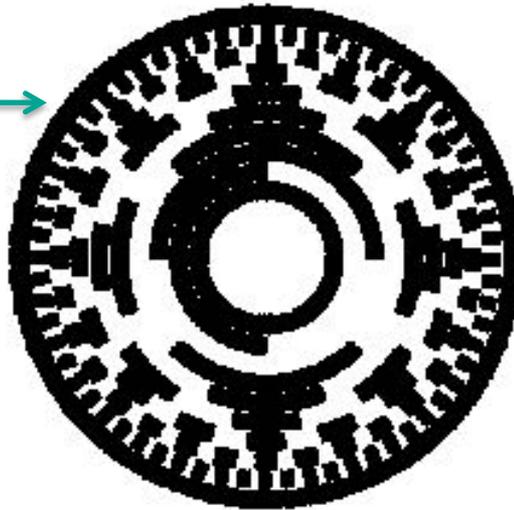


- Position absolut codiert, d.h. **jederzeit bekannt; keine Initialisierung**
- Statt serielle Bitströme (wie bei inkrementellen Sensoren) werden parallele Wortsignale mit einem Wortmuster (**Code**) für jeder Achsenposition geliefert
- **Vorteile:** direktes Ablesen der Gelenkposition, kein Datenverlust durch Stromausfall
- **Nachteile:** aufwendiger Aufbau

Optische Codierer III

Codes für absolute Codierer

Gray-Code: →
fehlertolerant
(nur ein Bit
Differenz an
jedem Punkt
der Skala)



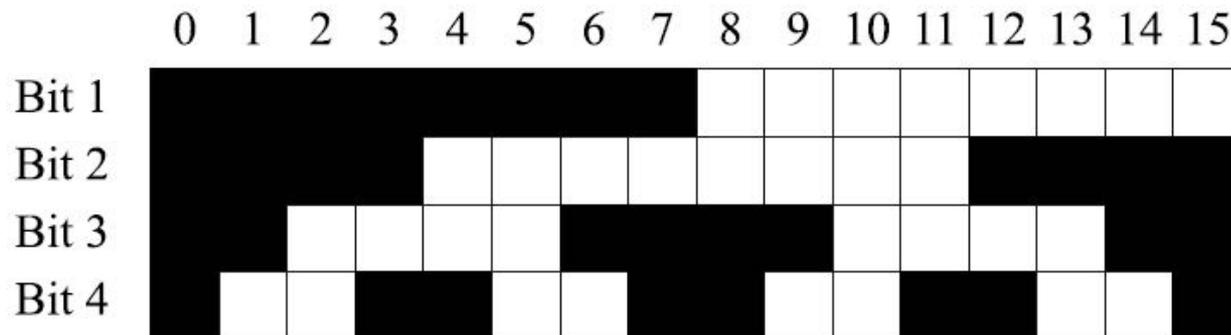
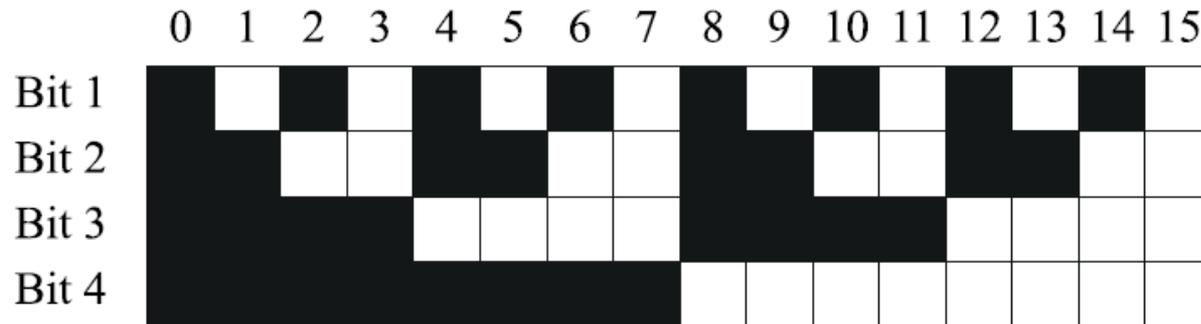
← Binärcode

Unterschied zum inkrementellen Codierer:

Jede quantifizierte Achsposition erhält ein individuelles Wortmuster

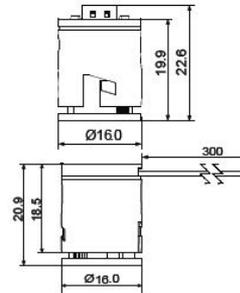
Gray-Code für Positionssensoren

Oben: Binärcode, Unten: Gray Code



Optische Codierer – Beispiele

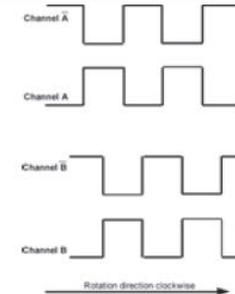
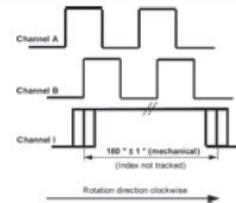
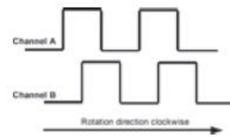
optischer Encoder		ME16	ME22	AE30
Ø x Länge	d _{mr} x l / mm	16 x 22,6		
Ø x Länge radialer Kabelausgang	d _{mr} x l / mm	16 x 20,9		
Breite x Länge x Höhe	b x l x h / mm			



Elektrischer Anschluss		Molex Stecker Kontakte 4x 50079-80 Gehäuse 1x 51021-040 oder radialer Kabelausgang
Impulszahl pro Umdrehung	Z / cpr	75 bis 200
Ausgangssignal		A- / B- Kanal 2 Rechteckimpulse, 90° Phasenversatz, TTL-kompatibel, Quadratur möglich

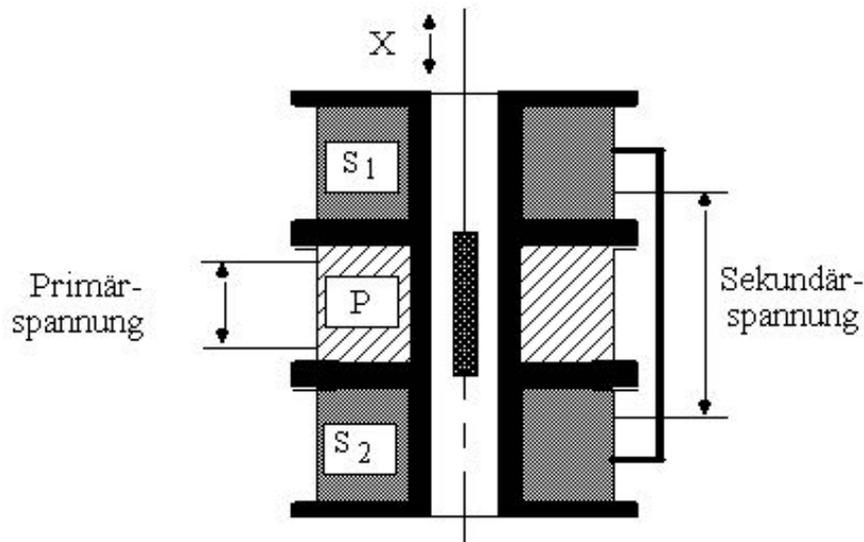


Quelle: <http://all-electronics.de/all/resources/6ce6810b8ac.pdf>



Differentialtransformator I

Linearer Differentialtransformator



Eine Primärspule P, zwei Sekundärspulen S1 und S2

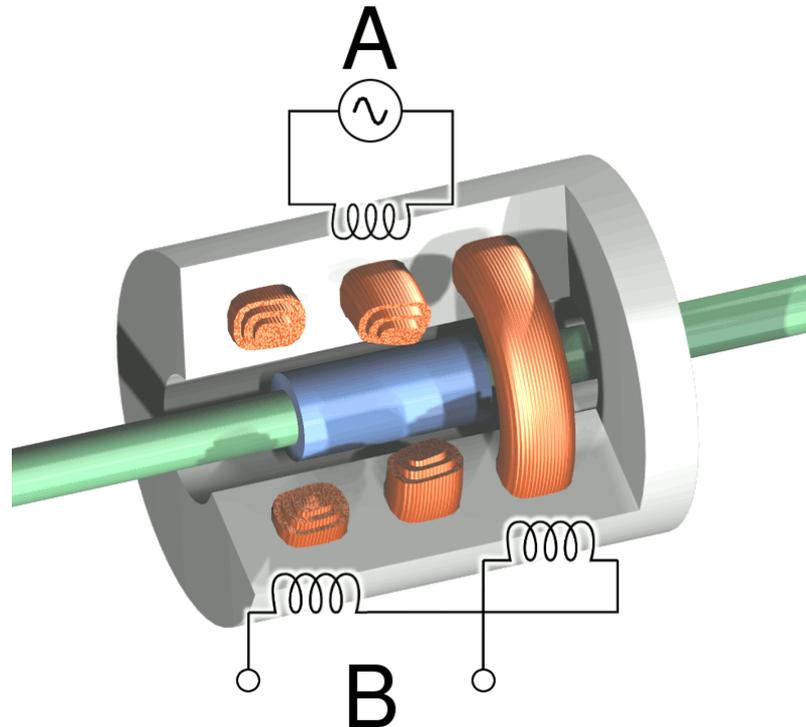
S1 und S2 sind kreuzförmig verbunden (siehe nächste Folie)

Spule P induziert auf S1 und S2 eine Wechselspannung

Magnet bewegt sich innerhalb des Wickelkörpers

- Effektive Ausgangsgröße: Differenz zwischen den Sekundärspannungen
- Mittelstellung des Magneten: Aufhebung der Spannungen and den sekundären Spulen, Ausgangsspannung null

Linearer Differentialtransformator



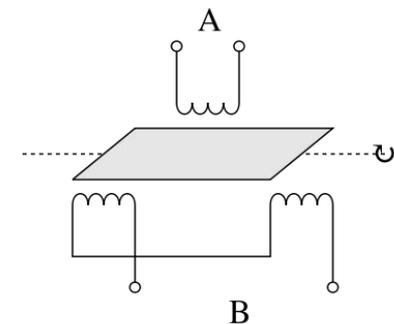
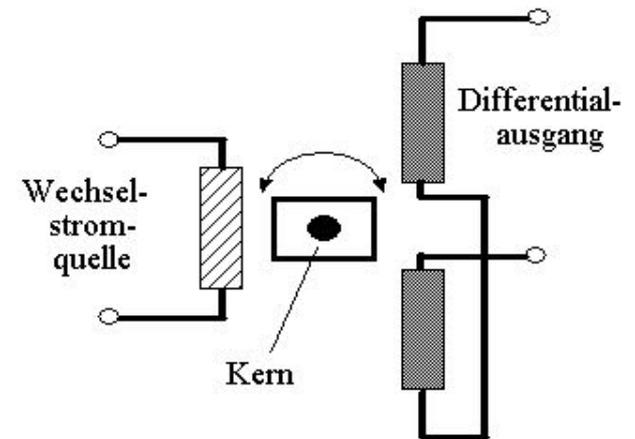
<https://de.wikipedia.org/wiki/Differentialtransformator>

Differentialtransformator II

Rotatorischer Differentialtransformator

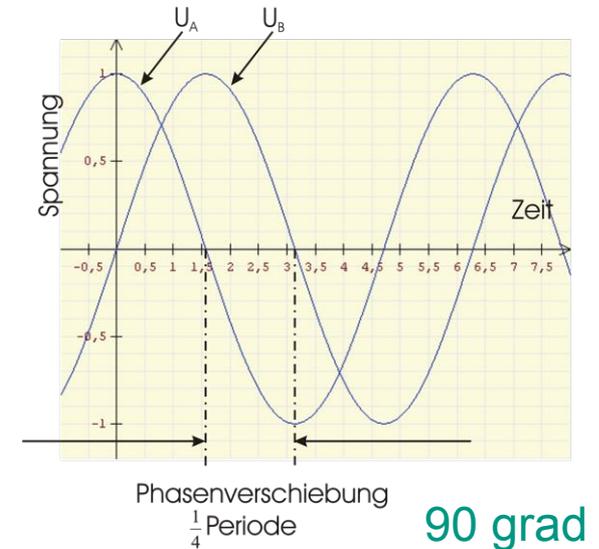
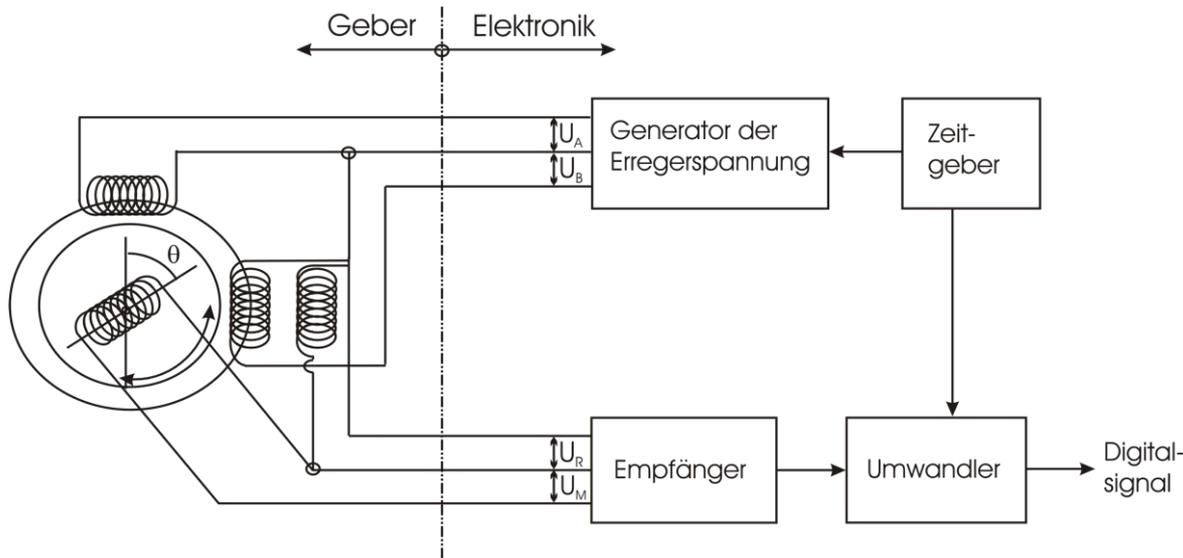
- Ähnlicher Effekt durch Drehung eines Kerns
- Spannung des Differentialausgangs proportional zur Auslenkung des Kerns aus Nullposition

Phasenverschiebung der Ausgangsspannung gibt Richtung der Auslenkung an



<https://de.wikipedia.org/wiki/Differentialtransformator>

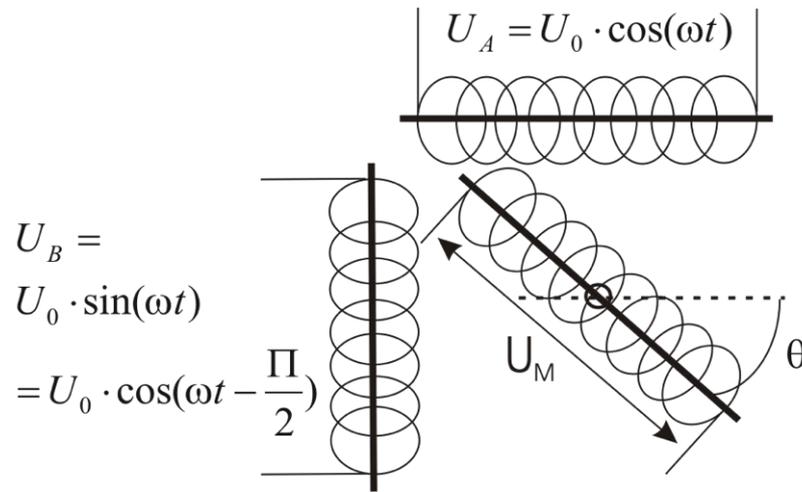
Resolver



Ausgabe: Induzierte Spannung U_M besitzt Phasenverschiebung zur Eingangsspannung U_A , die proportional zur Winkelstellung des Rotors ist

Vorteile: geringe Störanfälligkeit gegenüber elektrischem Rauschen

Resolver



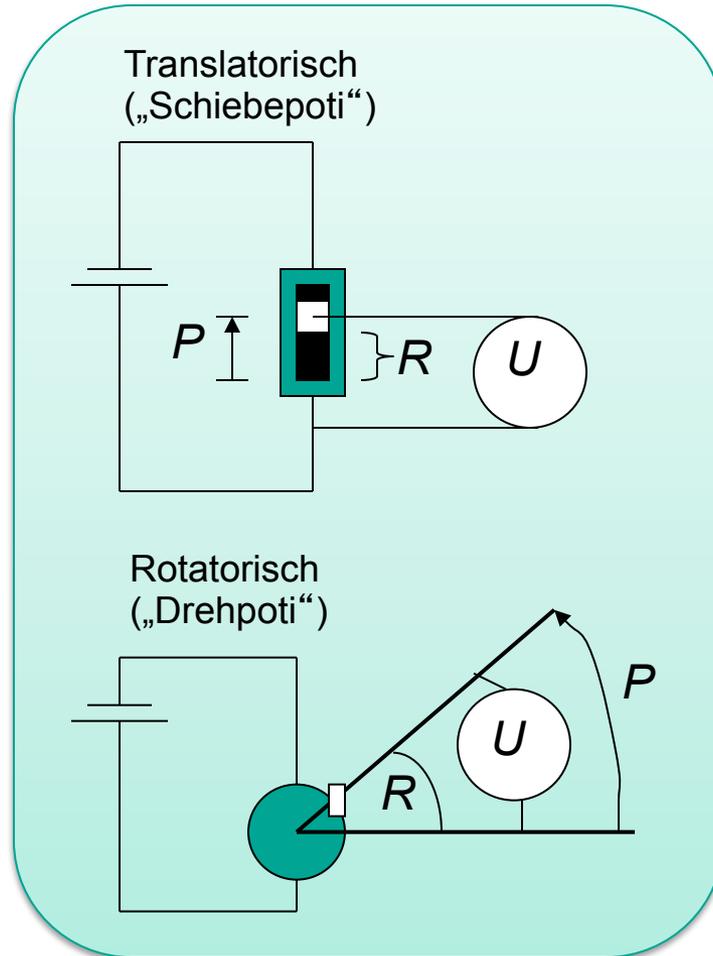
$$\begin{aligned}
 U_M &= U_A \cdot \cos(\theta) + U_B \cdot \sin(\theta) \\
 &= U_0 \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos(\theta) + U_0 \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin(\theta) \\
 &= U_0 \cdot \cos(\theta - \omega t) \\
 &= U_0 \cdot \cos(\omega t - \theta)
 \end{aligned}$$

Messspannung = Eingangsspannung
um Winkel phasenverschoben

Drehwinkel = Phasenverschiebung

Potentiometer I

Elektronisches Widerstandsbauelement, Widerstandswert mechanisch veränderbar, Spannungsteiler

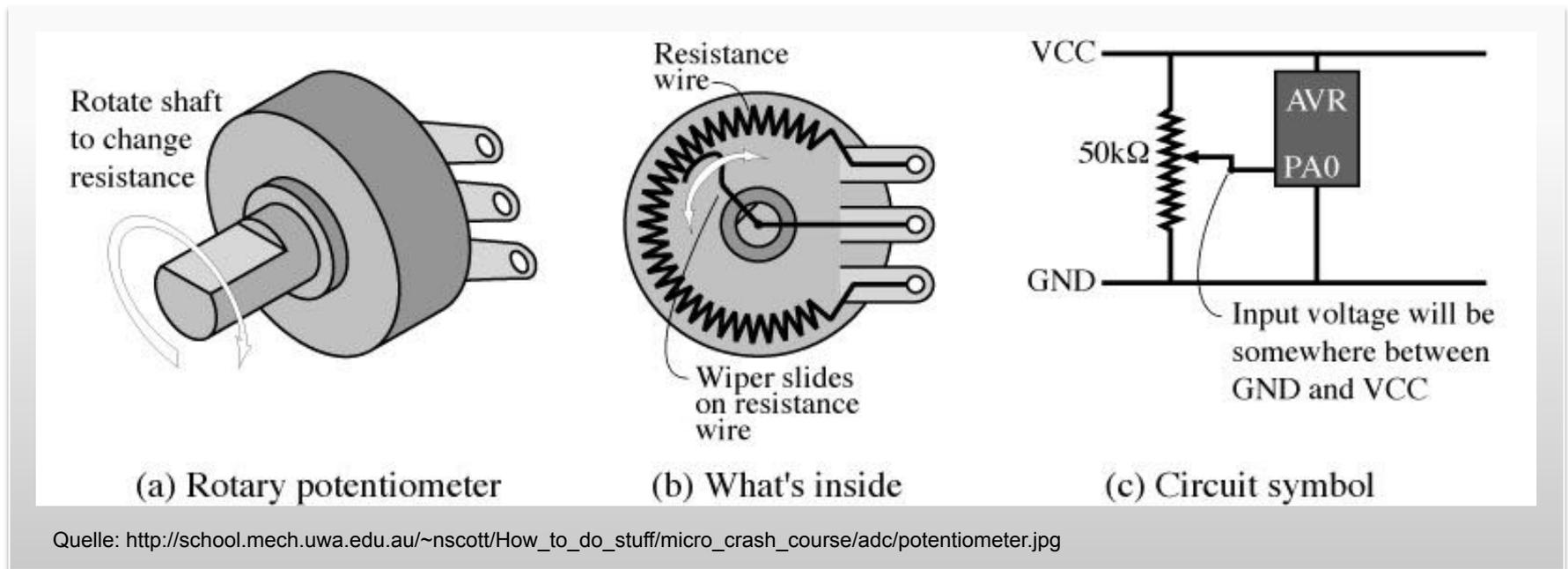


- Lineare Position oder Drehposition
- Messung der abgefallenen Spannung U oder des Widerstands R , dann
 - $U = (R/R_{ges}) * U_{ges}$
mit R_{ges} als Gesamtwiderstand und U_{ges} als Gesamtspannung
- Widerstand proportional zur Position P

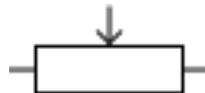
$$R \sim P$$

➔ $U \sim P$

Potentiometer II

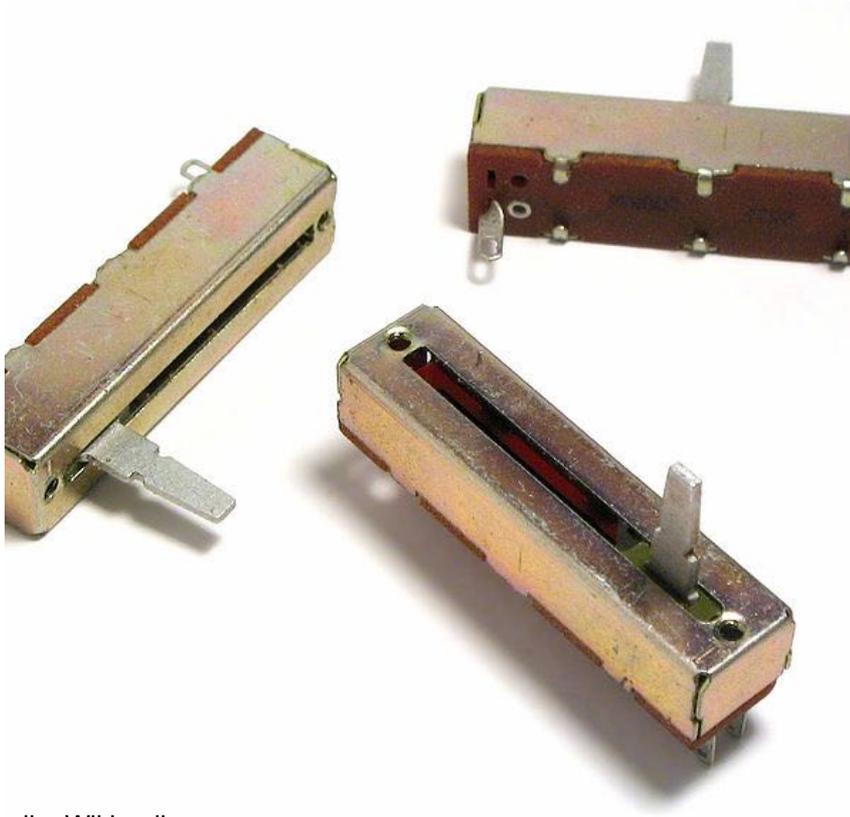


Schaltsymbol



Potentiometer – Beispiele

■ Schiebepotentiometer



Quelle: Wikipedia

■ Drehknopfpotentiometer



Quelle: Wikipedia

Interne Sensoren

Interne Sensoren

Positionssensor

Geschwindigkeits-
sensor

Be-
schleunigungs-
sensor

INS
(Inertial Navigation
System)

Potentiometer

Tachogenerator

Piezoresistiv

Gyroskop

Optische
Codierer

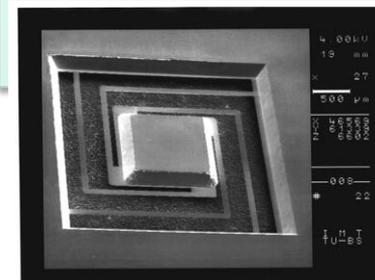
Optische
Codierer

Piezoelektrisch

Mikromechan.
Vibrationskreisel



Quelle: <http://ah.electronic.de/ah/electronic/ah/electronic/ah/electronic.pdf>



Geschwindigkeitssensoren I

- Gleichstromtachogenerator

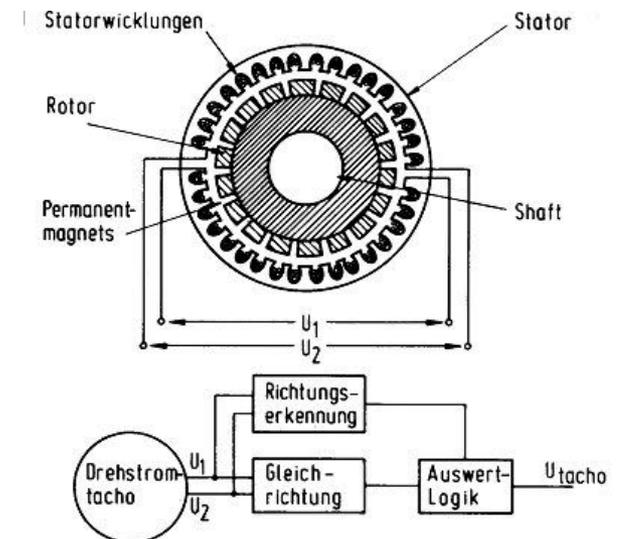
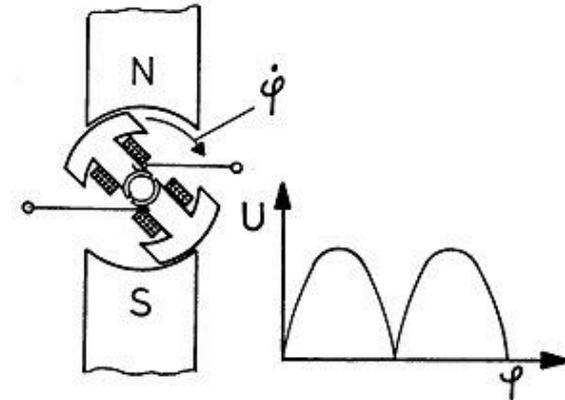
- Ausgangsspannung V_0
- Winkelgeschwindigkeit ω_s

$$V_0 = K_t \cdot \omega_s$$

- **Arbeitsprinzip:**
elektromagnetische Induktion
(Faradays Gesetz)
- Ausgangsspannung in großen
Bereichen proportional zu
Geschwindigkeit

- Wechselstromtachogenerator

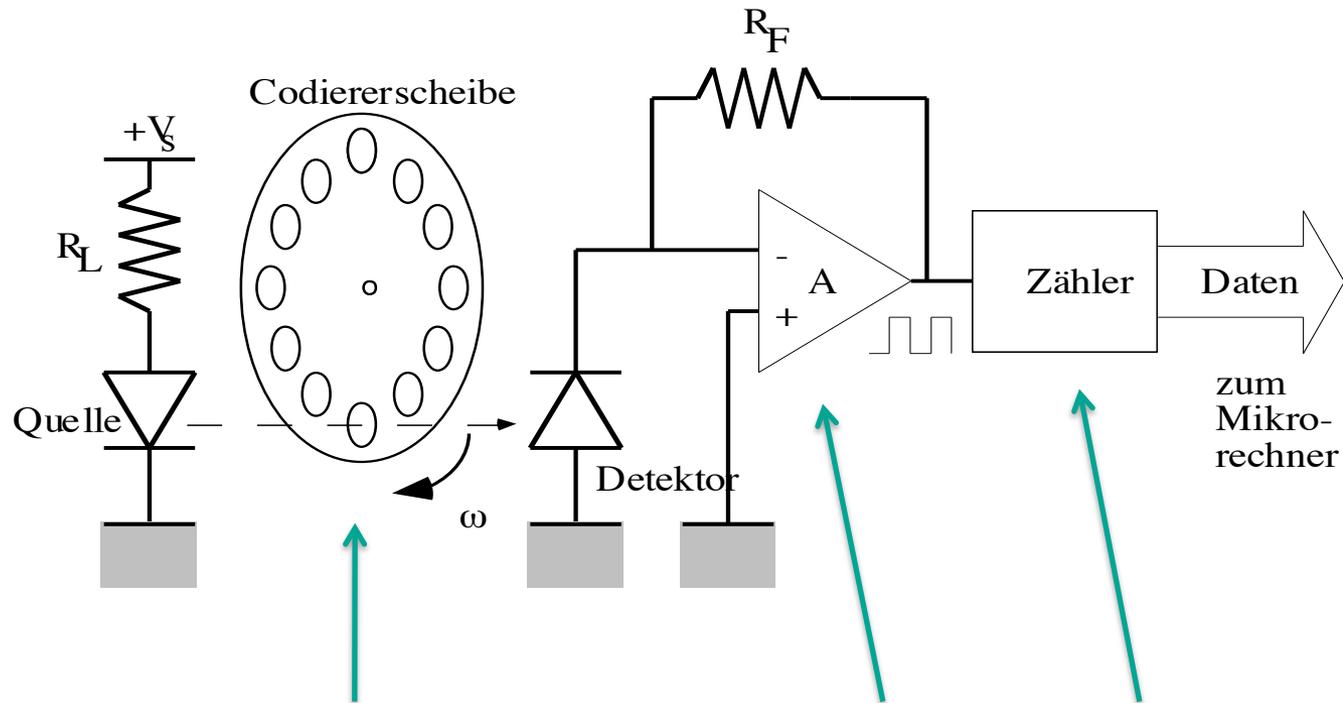
- Gleichrichtung erforderlich



Quelle: http://www.vfmz.com/service/fluid_lexikon/t/entry_tachogenerator_1494.html

Geschwindigkeitssensoren II

- Tachometer auf Basis eines opt. Codierers



Bauteile: inkrementeller Codierer, Ausgangsverstärker, digitaler Zähler

- Frequenz der gemessenen Impulse prop. zu Geschwindigkeit

Interne Sensoren

Interne Sensoren

Positionssensor

Geschwindigkeits-sensor

Be-schleunigungs-sensor

INS
(Inertial Navigation System)

Potentiometer

Optische Codierer

Tacho-generator

Optische Codierer

Piezoresistiv

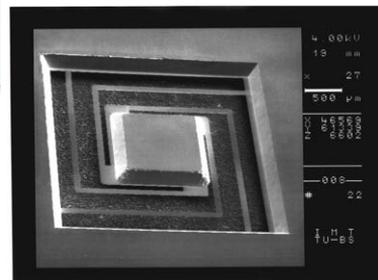
Piezoelektrisch

Gyroskop

Mikromechan. Vibrationskreisel



Quelle: <http://el-electronics.de/lehre/curriculum/06/10/06/01.pdf>



Beschleunigungssensoren

- Beschleunigung ist nur durch Wirkung auf träge Masse messbar
- „Inertia“: griechisch für das Beharrungsvermögen, die Trägheit
- Anwendung:
Airbag, Pre-Crash Seismik, Neigungsmessung, Vibrationsmessung,
HDD-Headcrash-Vermeidung, Stabilisierung von Flugzeugen,
Videospiele (Wii), Handys

Die Messprinzipien I

■ Wegmessung an Feder-Masse-System

➔ häufigstes Messprinzip

- Ausschlagsverfahren → Messung des Federwegs (ausgelöst durch Masseträgheit)
- Kompensationsverfahren → Messung der Kraft zum Halten der Feder in Mittellage/Nulllage

Die Messprinzipien II

Alternative Messprinzipien

- Geschwindigkeitsmessung an viskos gedämpfter Masse
 - Gut geeignet für Stoßmessungen wg. Überlastsicherheit

- Weg-Zeit-Messung bei frei schwebenden Körpern
 - Geeignet für sehr hohe Auflösungen, 10^{-9} - 10^{-11} g
 - z.B. für Messungen an Satelliten

(über die Zeit hinweg wird immer wieder der zurückgelegte Weg gemessen,
 $a = \dot{v} = \ddot{s}$)

Alle folgenden Sensorprinzipien zur Beschleunigungsmessung beziehen sich auf Feder-Masse-Systeme

Damped spring-mass system

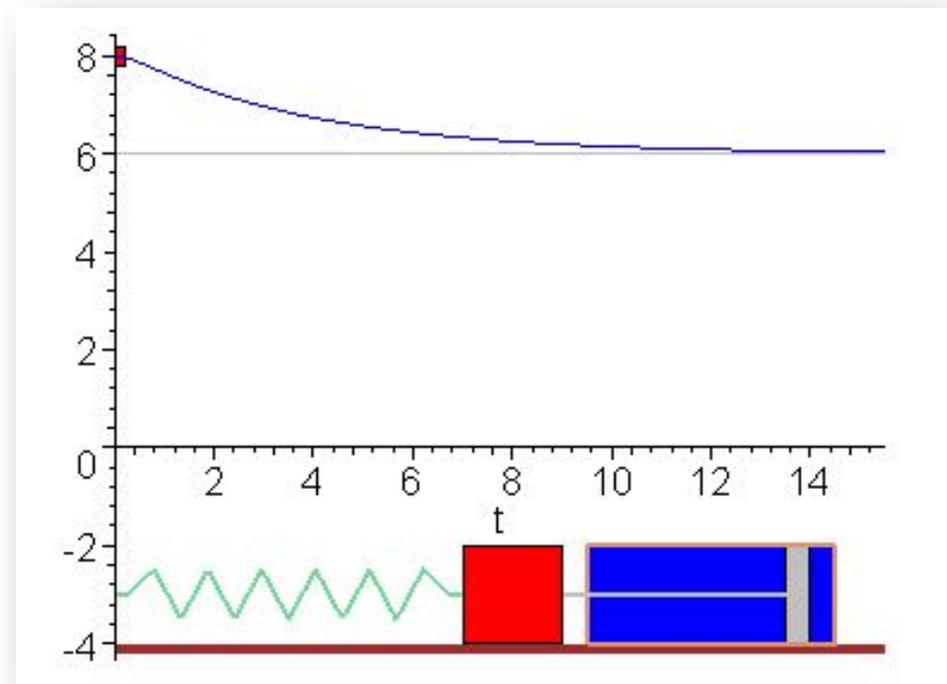
$$x = K(g - x) - Dx$$

Spring term: goal attractor
 Damping term: limits acceleration

g : goal
 x : current position
 D : damping constant
 K : spring constant

- 2nd order ordinary differential equation (ODE)
- Globally stable attractor system
 - Converges to g

Siehe Vorlesung „Mechano-Informatik in der Robotik“

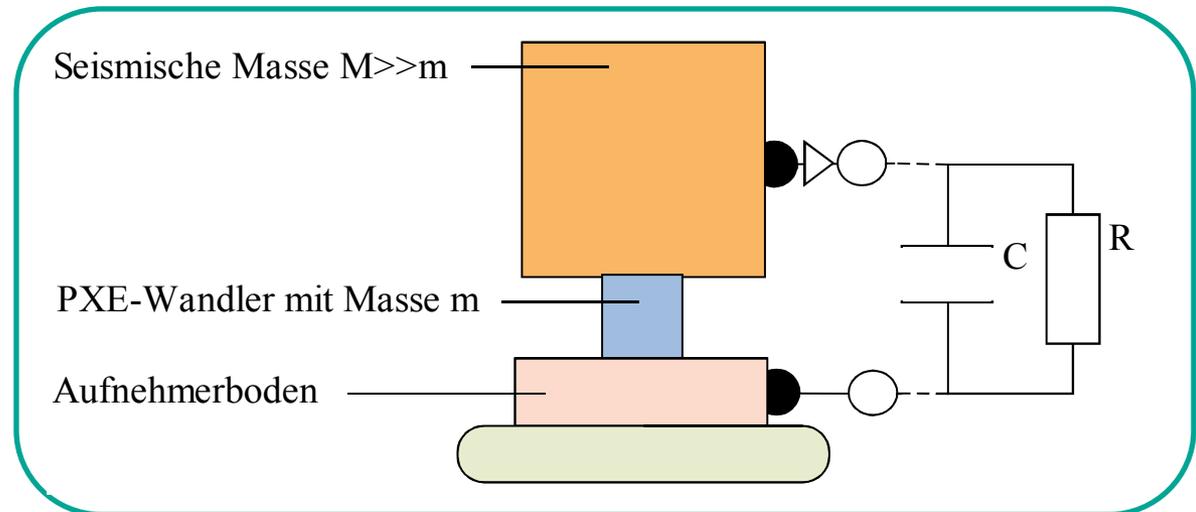


Piezoelektrische Beschleunigungssensoren

Messprinzip: Seismische Masse (Testmasse mit definiertem Wert)

Werkstoff PXE mit piezoelektrischen Eigenschaften

- Piezokeramischer Wandler verbindet freischwingende Masse M mit Aufnehmerboden
- Beschleunigung wirkt als Kraft über der Masse M
- Ausgangsspannung abhängig von Beschleunigung

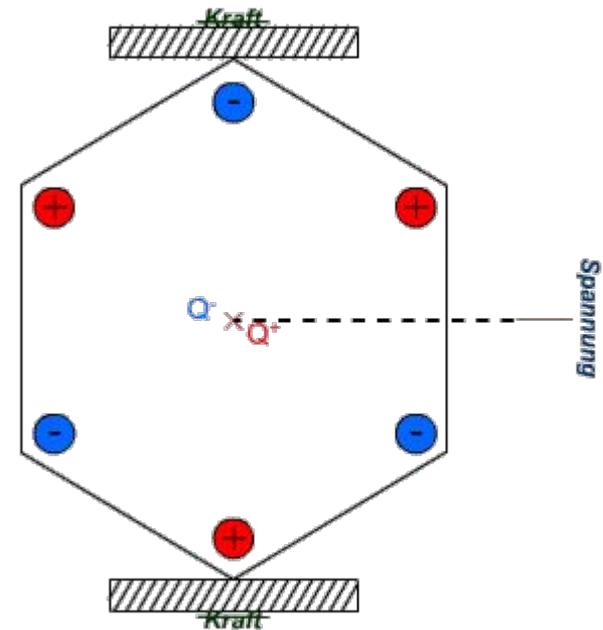


Piezoelektrischer Sensor I

- 1880 Jacques & Pierre Curie: Turmalinkristalle
- Piezoelektrischer Effekt:
wird ein piezoelektrisches Material mechanisch belastet, treten durch Verformung der Elementarzellen an dessen Oberfläche elektrische Ladungen auf.
- Umwandlung in proportionale Spannung über integrierten Verstärker/
Elektrometerverstärker
 - Keine statischen Beschleunigungen (wg. Leckströmen/
Ladungsverlusten)
 - Keine langsam veränderlichen Beschleunigungen (gleiche Ursache)
 - Nur differentielle Messung (Messung von Änderungen) möglich

Piezoelektrischer Effekt

- Druck sorgt für Verschiebung der Ladungsschwerpunkte
- Verschiebung erzeugt Dipol- bzw. elektrische Spannung



Quelle: Wikipedia

Piezoelektrischer Sensor III

■ Aufbau und Anwendung piezoelektrischer Sensoren

Bei der Entwicklung der Sensoren kann durch den Schnitt des Materials aus drei auftretenden Effekten gewählt werden:

- Transversaleffekt
- Longitudinaleffekt
- Schereffekt (nicht behandelt)

Für piezoelektrische Sensoren kommen im Wesentlichen entweder einkristalline Materialien (z.B. Quarze) oder piezoelektrische Keramiken (z.B. PZT-Keramik) in Frage.

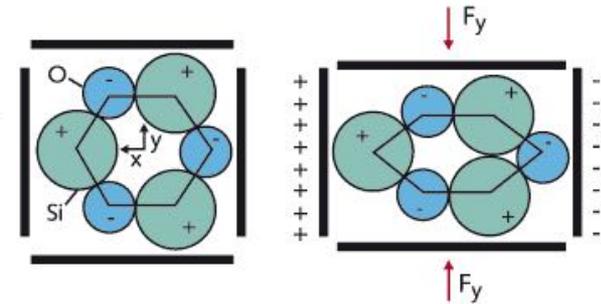
Bei den Keramiken ist die piezoelektrische Konstante teilweise um Größenordnungen höher als bei den kristallinen Piezomaterialien. Dafür ist die Langzeitstabilität bei den kristallinen Materialien wesentlich besser.

Piezoelektrischer Sensor IV

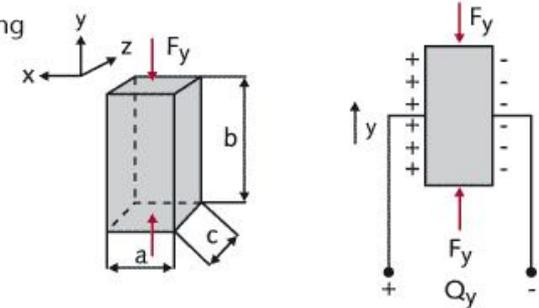
■ Transversaleffekt

- Kraft wirkt in Richtung einer neutralen, also orthogonalen Achse zur ladungserzeugenden Achse
- Abmessungen des Objekts wichtig
- Wenn ein Objekt die Abmessungen X,Y und Z (jeweils ausgerichtet entlang der gleichnamigen Achsen) aufweist, dann gilt für die erzeugte Ladung: $C_x = d_{xy} F_y X / Y$ (d_{xy} piezoelektrischer Koeffizient)
- Interessant, weil man über das Verhältnis der Abmessungen X und Y die Ladungsmenge beeinflussen kann, ohne Elemente vervielfachen zu müssen

Prinzip des transversalen piezoelektrischen Effekts



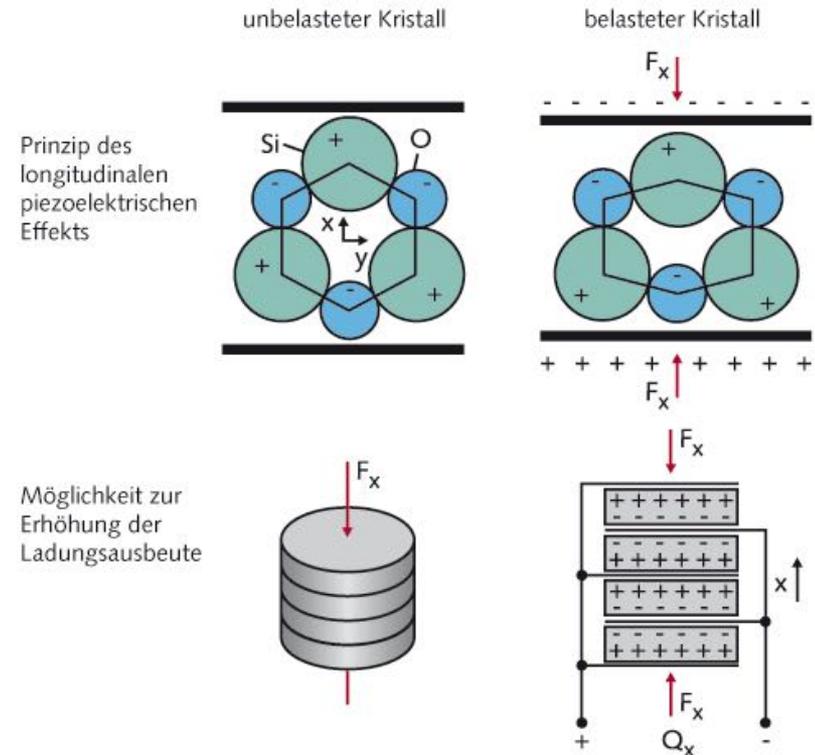
Praktische Nutzung des Effekts



Quelle: http://www.kistler.com/mediaaccess/Technology_Transverse_Effect_L_de.gif

Piezoelektrischer Sensor V

- Longitudinaleffekt
 - Richtung der wirkenden Kraft parallel zur Ladungserzeugenden Achse
 - Erzeugte Ladungsmenge proportional zur Stärke der Kraft, jedoch unabhängig von Größe und Form des piezoelektrischen Bauteils
 - Die Ladung Q_x auf der Oberfläche in Richtung der Kraft beträgt dann $Q_x = d_{xx} F_x$
 - Um Ladungsmenge und damit Effekt zu erhöhen, nutzt man mechanisch in Serie und elektrisch parallel geschaltete Element



Quelle: http://www.kistler.com/mediaaccess/Technology_longitudinal_L_de.gif

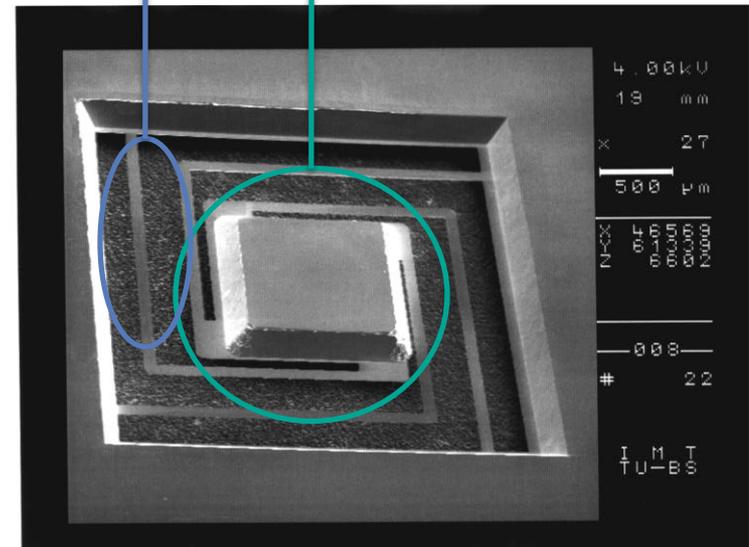
Piezoresistiver Sensor I

Silizium-Beschleunigungssensor

- **Messprinzip: seismische Masse**
- Mikrosystemtechnik: Ätzen einer **trägen Masse** und deren **Aufhängungen** in Silizium
 - Auslenkung ändert mechanische Spannungen, welche den piezoresistiven Widerstandswert ändern
 - Widerstandswert messtechnisch erfassbar

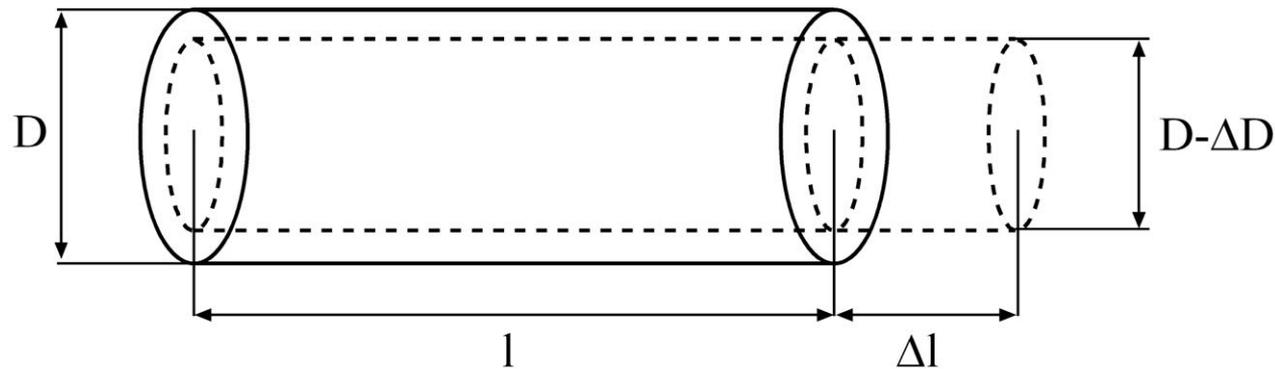
Ursprüngliches Einsatzgebiet:
Airbagauslösung im Kfz-Bereich

In der Robotik oft: Auslenkung zur
Erddanziehung oder Lage im Raum



Piezoresistiver Sensor II

- Theoretische Grundlagen: Resistiver Effekt (beim DMS)
 - Die Grundidee des Dehnungsmessstreifens (DMS) liegt darin, dass sich der elektrische Widerstand eines Leiters ändert, wenn dieser gedehnt oder gestaucht wird. Hierzu wird der DMS mit dem zu vermessenden Trägerkörper verklebt oder punktverschweißt oder dient als zu betätigende Membran.



Piezoresistiver Sensor III

- Elektrischer Widerstand des unbelasteten DMS abhängig vom spezifischen Widerstand ρ , der Länge l und der Querschnittsfläche A (D = Drahtdurchmesser):

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} = \rho \cdot \frac{4 \cdot l}{D^2 \cdot \pi}$$

- Unter Zugbelastung verändert der Leiter seine Länge und Querschnittsfläche, sowie seinen spezifischen Widerstand:

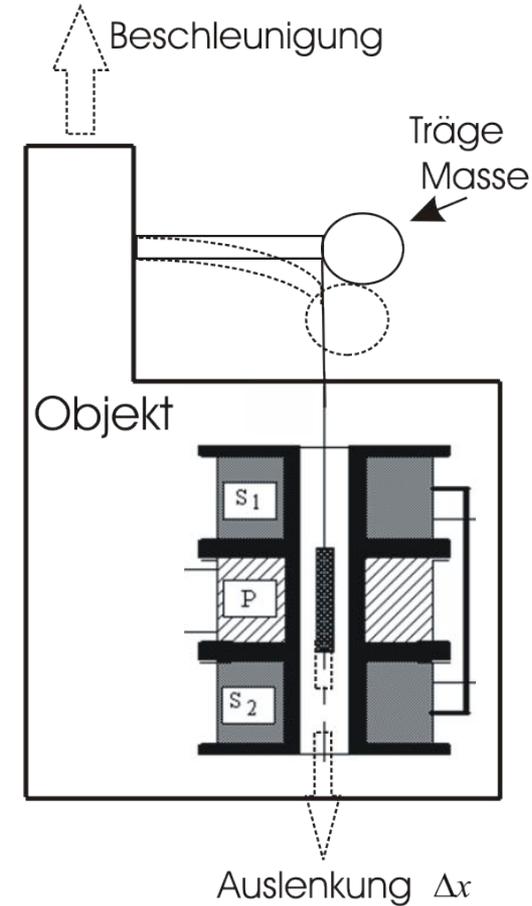
$$R + \Delta R = (\rho + \Delta\rho) \cdot \frac{4 \cdot (l + \Delta l)}{(D - \Delta D)^2 \cdot \pi}$$

- Nach Umformungen und Einführung von ε sowie dem Empfindlichkeitsfaktor k (k hat bei Metallen typisch den Wert 2) erhält man den Zusammenhang zw. Dehnung und Widerstandsänderung:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \frac{\Delta L}{L} = k \cdot \varepsilon$$

Induktives Prinzip

- Rückwirkung der seismischen Masse wird umgeformt zum Wegsignal
 - Messung beispielsweise über Differentialtransformator

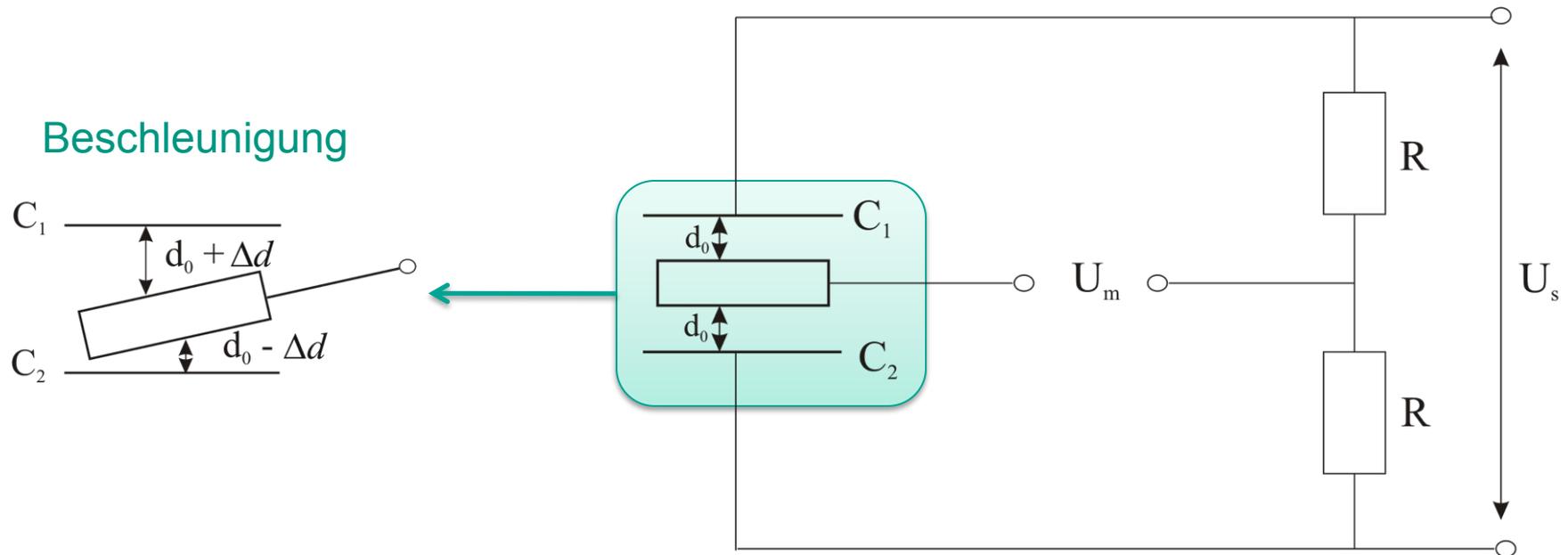


Kapazitives Prinzip I

- Differentialkondensatoranordnung
 - Mittelelektrode entspricht seismischer Masse
 - Messung über Brückenschaltung
 - Spannung proportional zur Auslenkung
 - Häufigstes benutztes Prinzip

$$U_m = \frac{U_s}{2} \cdot \frac{\Delta d}{d_0}$$

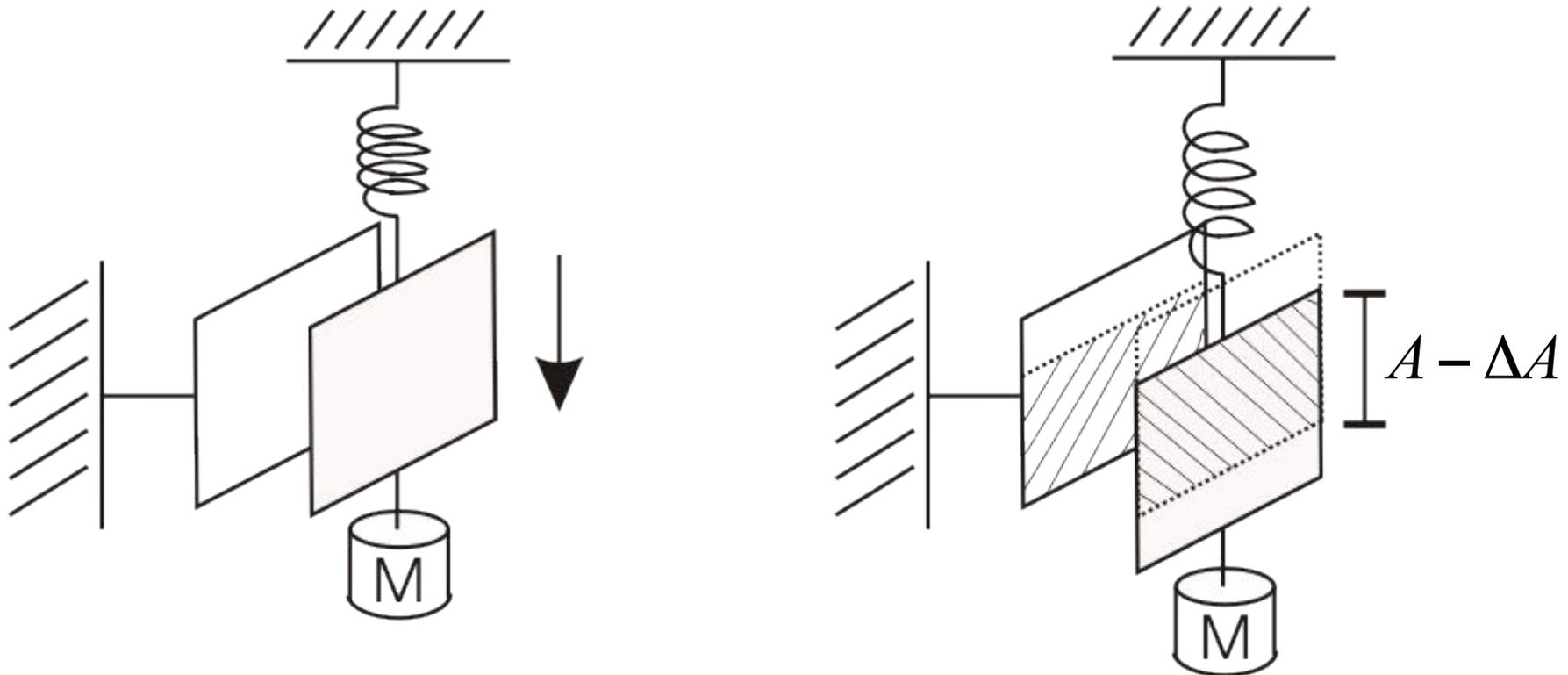
$$U_m \sim \Delta d$$



Kapazitives Prinzip II

■ Plattenkondensator

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{A}{d}$$



Interne Sensoren

Interne Sensoren

Positionssensor

Geschwindigkeits-sensor

Be-schleunigungs-sensor

**INS
(Inertial Navigation System)**

Potentiometer

Tacho-generator

Piezoresistiv

Gyroskop

Optische Codierer

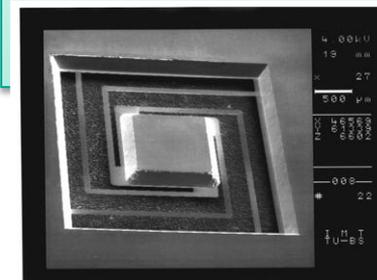
Optische Codierer

Piezoelektrisch

Mikromechan. Vibrationskreisel



Quelle: <http://ah.electronics.de/lehre/curriculum/060810/060810.html>



Lagesensoren

- Beziehen sich immer auf inertiales Koordinatensystem (zumeist auf die Erdkugel)
 - Anwendungsbeispiele: Navigation, Roboter, Autos, Flugzeuge, Schiffe
- Kompass: Magnetometer, Kreiselkompass
- Gravimeter: Messung des Erdschwerefeldes → Neigungssensor
- Drehratensensoren
 - Faseroptische DRS
 - Problem: bewegliche Teile
 - Einschränkungen (Winkel/Lage)
 - Anlaufzeiten / Reaktionszeiten
 - Mikromechanische Vibrationskreisel

Inertiale Sensoren I: Kreiselkompass (Gyroskop)

- Kreisel, kardanisch aufgehängt, schnell drehend.
- Aufgrund des Drehimpulserhaltungssatzes behält er seine Orientierung im Raum bei.

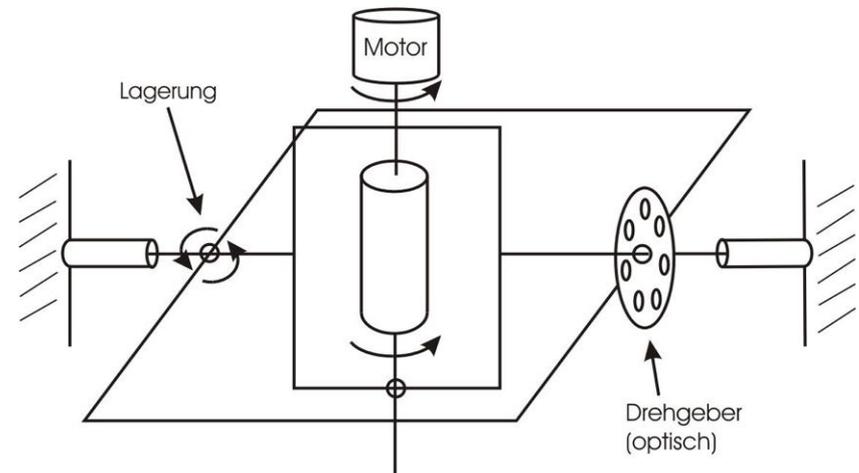
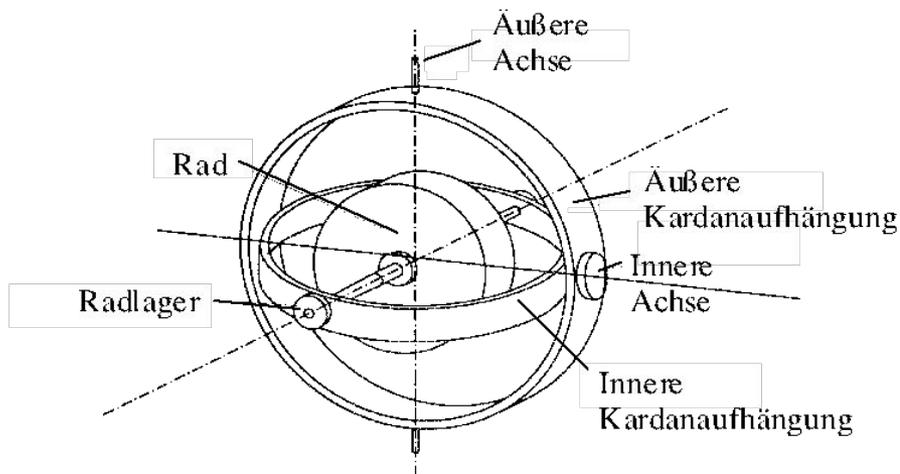
Drehwinkel zwischen Kreisel und Käfig messbar!

- Anwendungsbeispiele:

Winkel-Relokalisierung, Navigationssysteme, künstliche Horizonte,
Verwackelungsausgleich bei Kameras

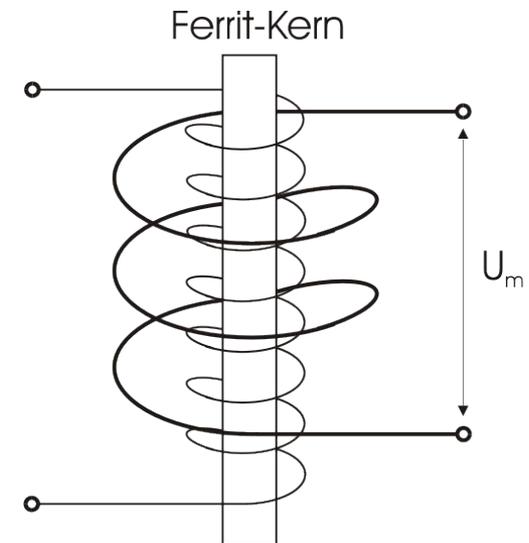
Inertiale Sensoren I: Kreiselkompass (Gyroskop)

- Kreiselkompass – Meßprinzip
 - 1-Degree of Freedom (1-DOF)



Inertiale Sensoren II: Magnetischer Kompass

- Magnetischer Kompass
- Fluxgate-Magnetometer (Förster-Sonde)
 - Magnetfeldmessung



Inertiale Sensoren II:

Fluxgate Magnetometer

- Elektromagnet mit Eisenkern
- Sättigungsmagnetisierung (alle Atome ausgerichtet), Magnetismus der Atome addiert sich zur magnetischen Wirkung der Spule, nach Sättigung keine zusätzliche Addition möglich
- Bei Ferriten: abrupte und vollständige Sättigung bei exakt definierter äußerer Feldstärke
- Symmetrisches Umklappen der Kern-Polarität bei Anlegen einer Wechselspannung
- Innerhalb eines äußeren Magnetfelds
 - Halbperiode, in der sich das Spulenfeld zum äußeren Feld addiert
 - Sättigung früher, da von der magnetischen Gesamtfeldstärke abhängig
 - Halbperiode, in der das Magnetfeld der Spule dem äußeren Feld entgegenwirkt
 - Sättigung etwas später
- Funktionsprinzip: Elektronische Auswertung der Asymmetrie

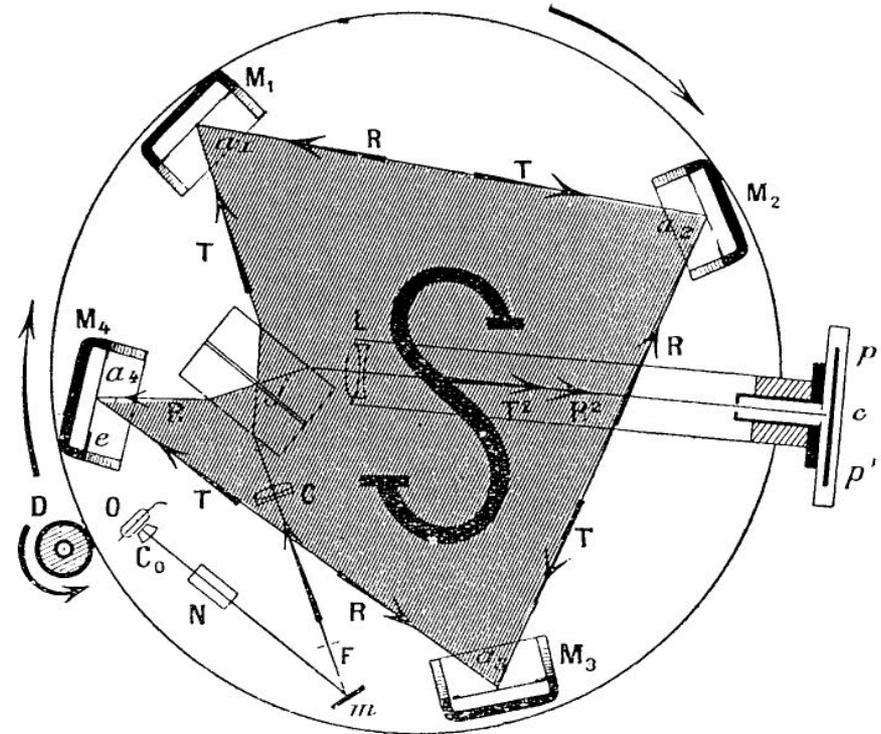
Drehratensensoren

- Basieren in der Regel auf:
 - Sagnac-Effekt (Lichtinterferometer)
 - Coriolis-Kraft auf Kreisel
 - Coriolis-Kraft auf Feder-Masse-System (**MEMS, Micro-Electro-Mechanical-Systems**)

Drehratensensoren II

■ Sagnac-Effekt

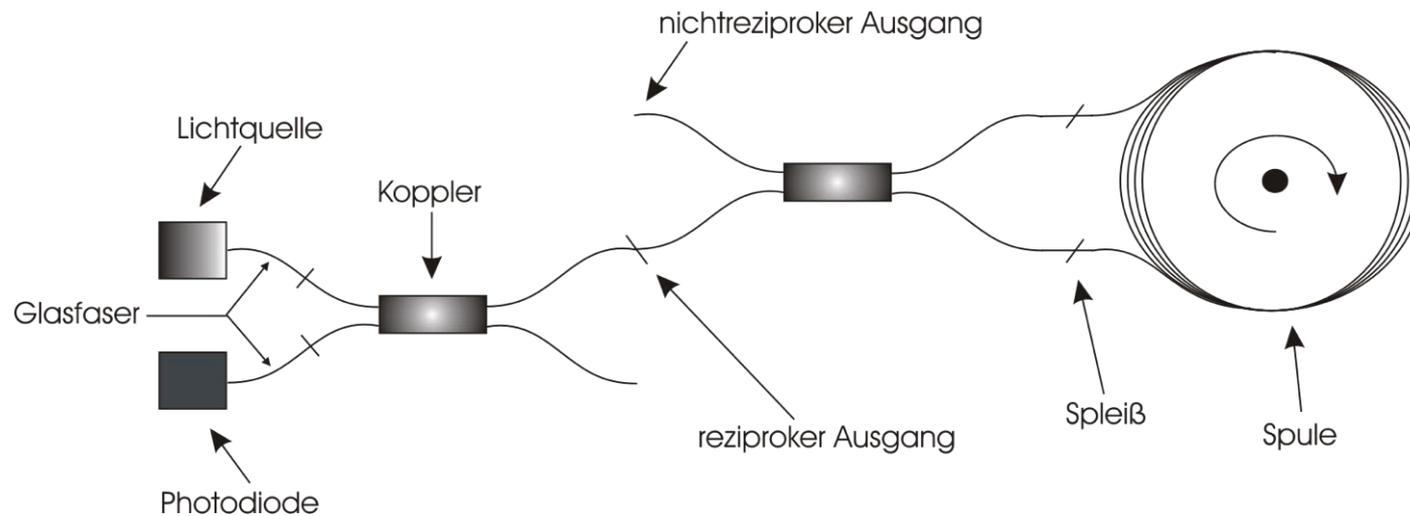
- Absolute Messung von Rotationen
- Wird genutzt in:
 - Faser-Kreiseln
 - Laser-Kreiseln
- Destruktive Interferenz (bei Refl. jeweils 90° Phasenverschiebung)
- Bei Bewegung: optischer Weg nicht mehr gleich



Drehratensensoren III

■ Faserkreisel

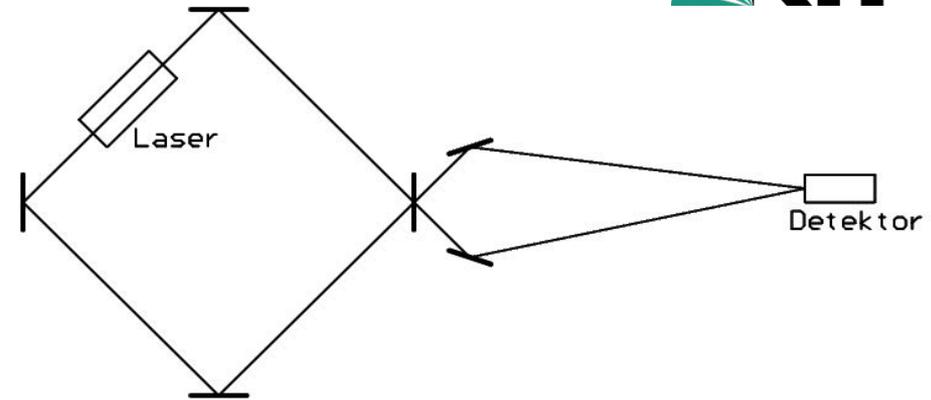
- Wie bei Sagnac-Effekt, aber über Glasfaser
- Interferenzeffekt wegen Wegdifferenz
- Glasfaserspule ca. 5 km



Drehratensensoren IV

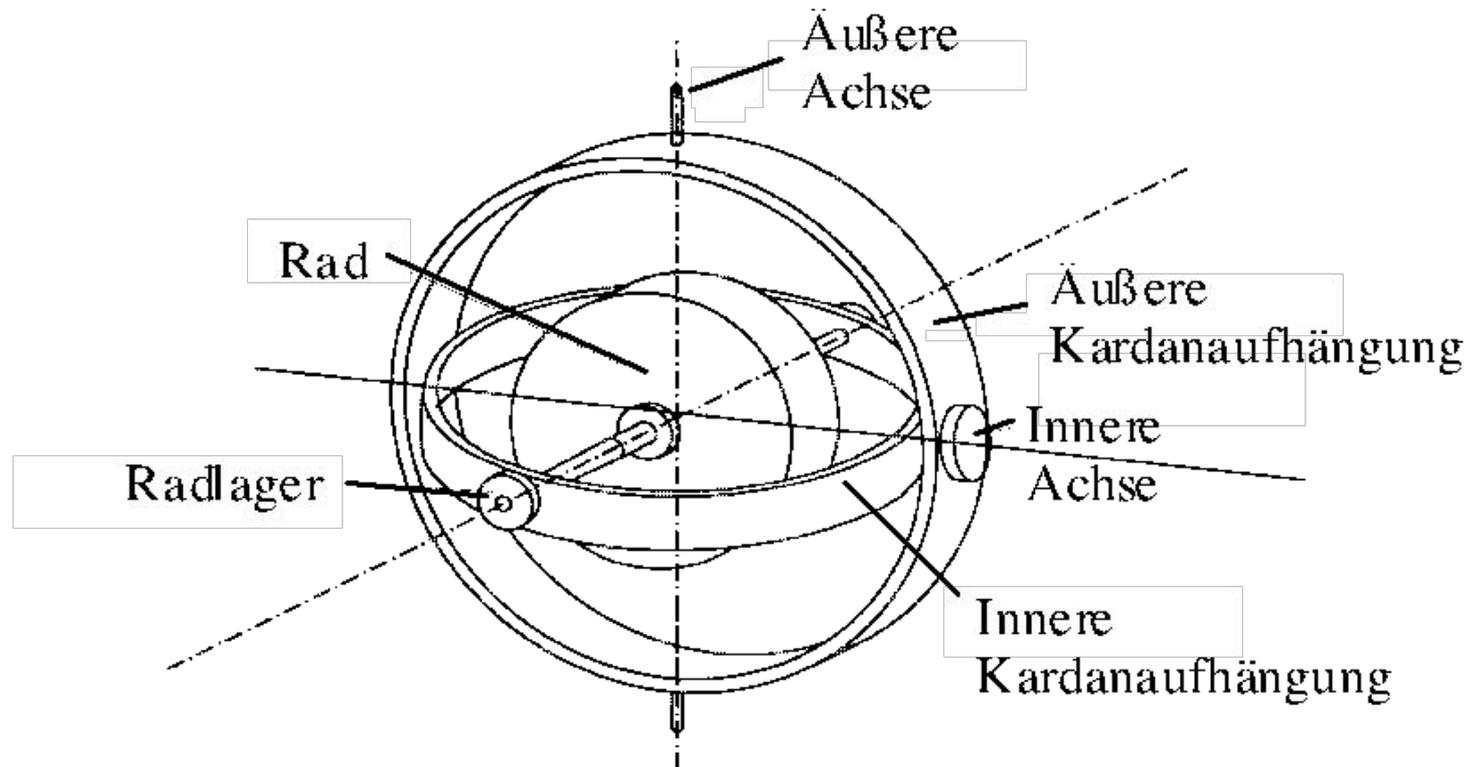
■ Laser-Kreislauf

- Mindestens 3 Spiegel, gegenläufiges Licht, Auskopplung auf Empfängerfläche (photoelektrischer Empfänger)
- Lichtenergie wird eingekoppelt über Laser
- Photonen können viele Umläufe absolvieren (optischer Resonator)
- Die immer wiederholte Phasenverschiebung führt zur Frequenzverschiebung proportional zur Winkelgeschwindigkeit
- Differenzfrequenz als Schwebung sichtbar



Effekt besser messbar als reine Phasenverschiebung,
temperaturstabiler, bessere Linearität

Mechanisches Gyroskop



- Schnell rotierender, semikardanisch aufgehängter Kreisel
- Erdrotation führt zu einem Drehmoment in Richtung des Meridians
- Dadurch Richtungsanzeige möglich

Drehratensensoren V

- Drift:
 - Faserkreisel
 - $0,003^\circ/\text{h} - 100^\circ/\text{h}$ $0,001$
 - Bogensekunden Winkelauflösung
 - Laserkreisel
 - $0,001^\circ/\text{h} - 10^\circ/\text{h}$
 - 1 Bogensekunden Winkelauflösung

Mikromechanische Vibrationskreisel (MEMS-Technologie) I



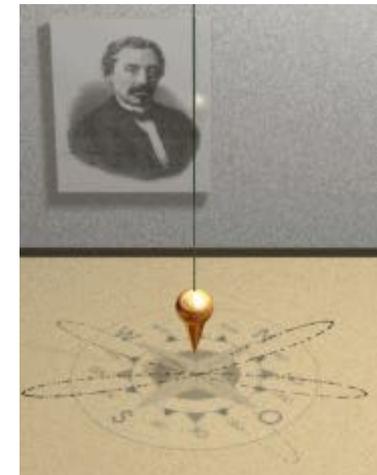
- Anwendungsbeispiele:
 - GPS-Systeme
 - Navigationssysteme
 - Modellbau (insbesondere Flugmodelle)
 - Verwackelungsausgleich (z.B. bei Kameras)

Mikromechanische Vibrationskreisel II

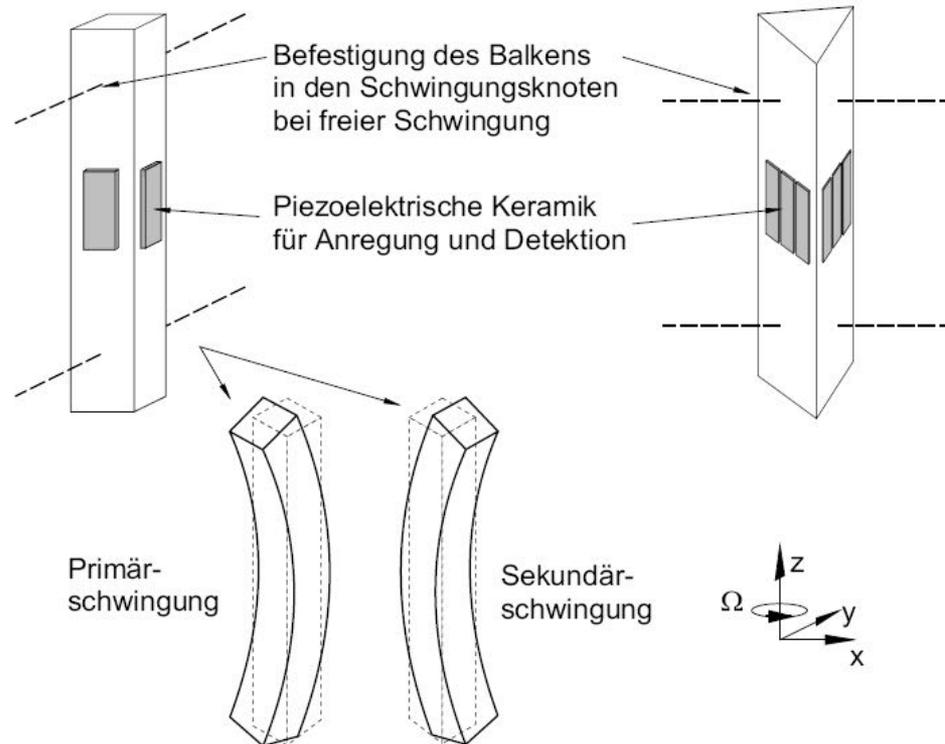
- Mikromechanische Drehratensensoren beruhen auf Resonanzstrukturen und Energieübertragung zwischen den genutzten Schwingmoden (Primär- und Sekundärmode) durch die Coriolisbeschleunigung
→ Foucault-Pendel

- Antriebprinzipien
 - Elektrostatisch
 - Elektromagnetisch
 - Piezoelektrisch

- Messprinzipien
 - Kapazitiv
 - Piezoresistiv
 - Piezoelektrisch

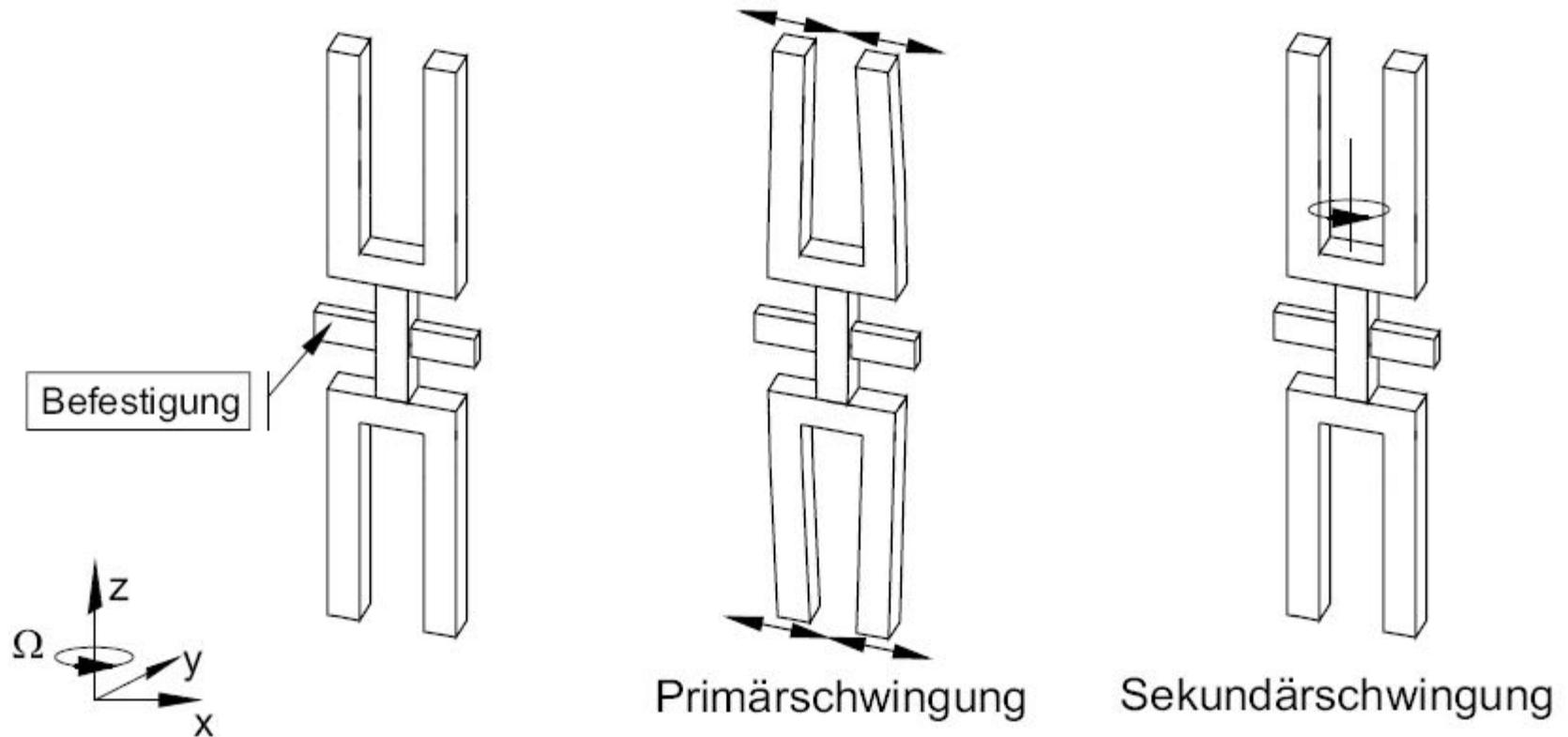


Mikromechanische Vibrationskreisel III



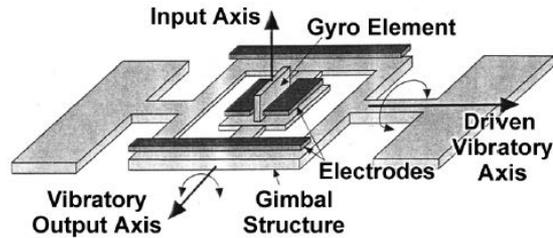
Prismatische Biegebalken (aus Dissertation „Modellierung und Simulation eines mikromechanischen Drehratensensors“ von D. Billep)

Mikromechanische Vibrationskreisel IV

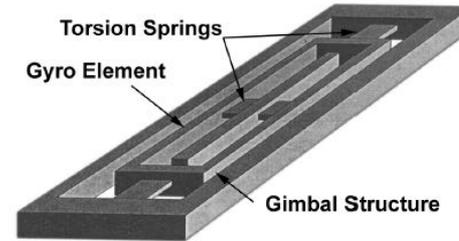


Stimmgabel / Tuning Fork Gyroscope

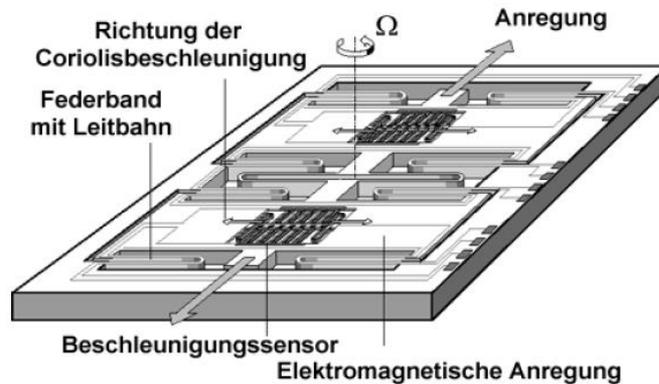
Mikromechanische Vibrationskreisel V



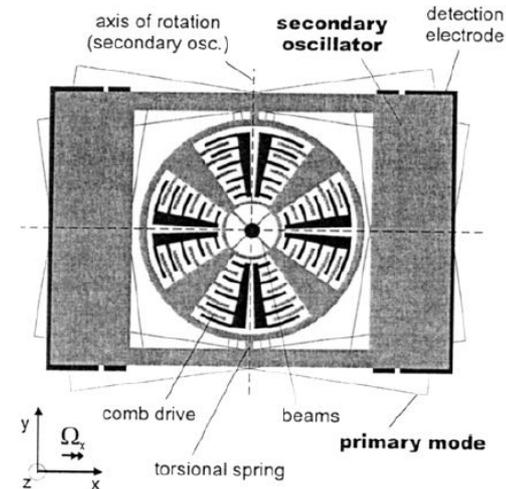
(a) Draper Laboratory /GBKN91/



(b) VTI Hamelin /KRL⁺97/

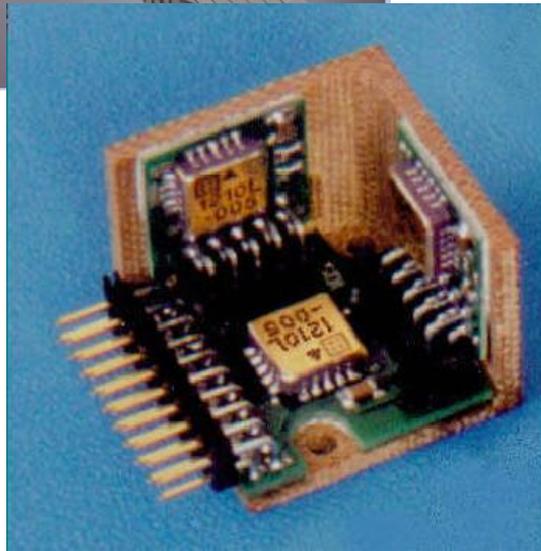
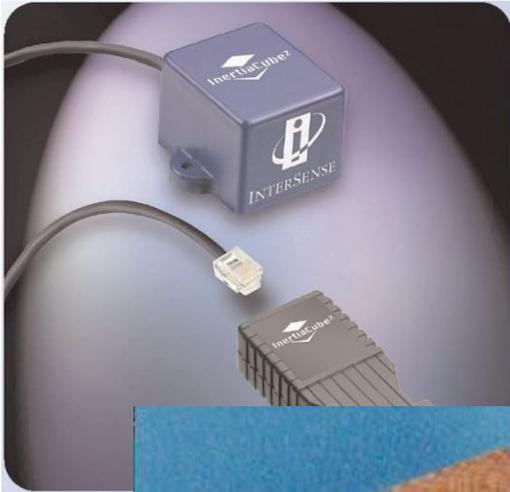


(c) R. Bosch GmbH /Mar97/



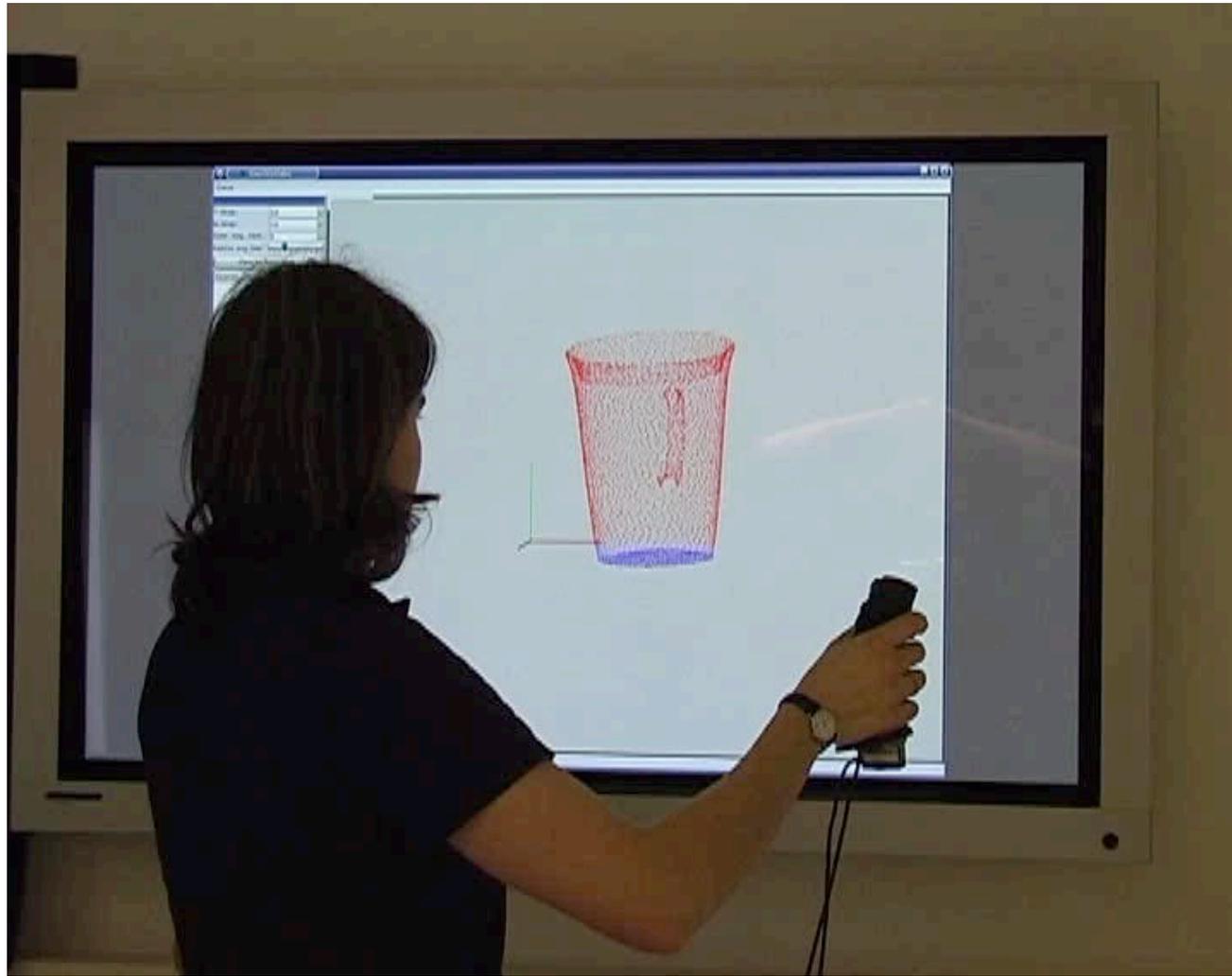
(d) HSG-IMIT /GKF⁺98/

Beispiel Inertia Cube 2 – 3D Orientierungsmessung



- 3 Winkelbeschleunigungs-sensoren
- Gravitometer
- Kompass
- Auswerteelektronik
- Interne Kalibrierung
- Serielles Interface

Beispiel Inertia Cube 2



Beispiel – 6D Drehraten- und Beschleunigungsmessung



- 3 Drehratensensoren (Gyros)
- 3 Beschleunigungssensoren
- Auswerteelektronik
- Interne Kalibrierung
- Serielles Interface

Literatur

- Robotik 3 Skript
 - In der Vorlesung behandelte Aspekte aus Kapitel 2.1
- http://www.kistler.com/de_de-de/Technology_Piezoelectric/Der-Piezoeffekt.html
- „Drehratenmessgeber“ von HEINZ GEORG DEPPNER