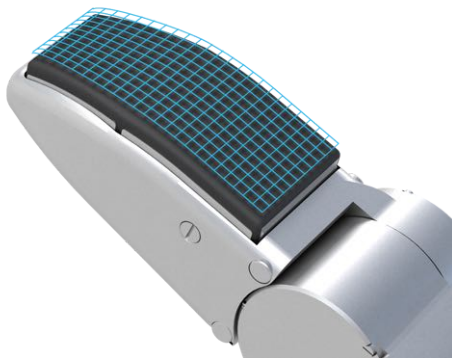


Robotik III: Sensoren in der Robotik

Externe Sensorik: Taktile und Kraftsensoren

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



Externe Sensorik

- Erfassung der Umwelt
- Dienen der Planung und Überwachung von Aufgaben eines technischen Systems (Roboter, Auto, ...) oder dessen Instruierung
 - z.B. Verfolgen einer Person
 - Kommandierung mittels Spracheingabe

Externe Sensoren

Externe Sensoren

Taktile Sensoren

Tastende & gleitende Sensoren

Kraft-
Momenten-
Sensoren



Näherungs-sensoren

Kapazitive Sensoren

Optische Sensoren

Akustische Sensoren



Abstands-sensoren

Laufzeitbasiert

Triangulations-
basiert

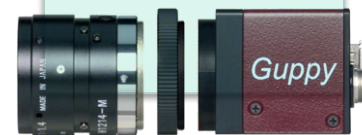


Visuelle Sensoren

Photodioden

CCD

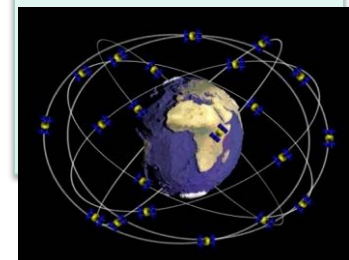
Algorithmik:
Lichtschnitt,
Stereo



Positions-sensoren

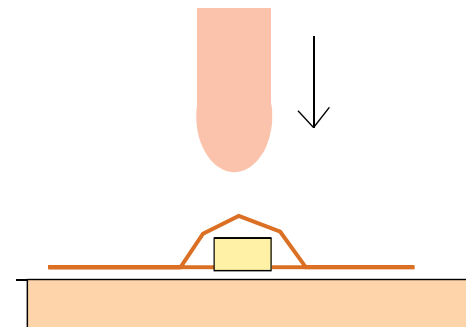
GPS

Natürliche/
künstliche
Landmarken



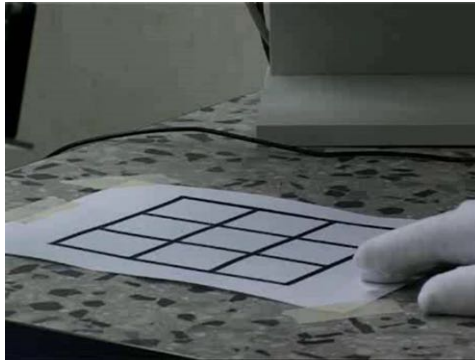
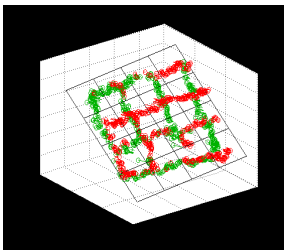
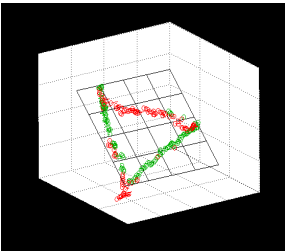
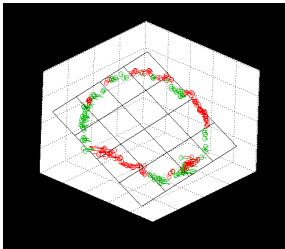
Taktile Sensoren I

- Umweltinformationen durch direktes Berühren von Objekten (physikalischer Kontakt zwischen Roboter und Werkstück)
- Einsatz:
 - Ermittlung geometrischer Größen (Lage, Orientierung, Form)
 - Ermittlung physikalischer Größen (Kräfte, Momente, Druck)
- Einfachste Berührungssensoren:
Mikroschalter
(binäre Aussage über Kontakt)

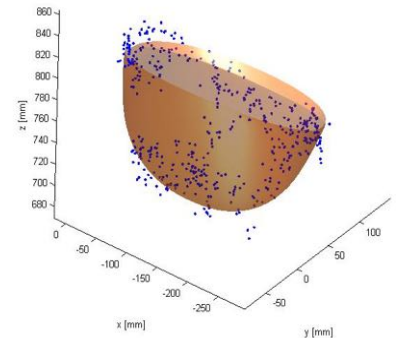
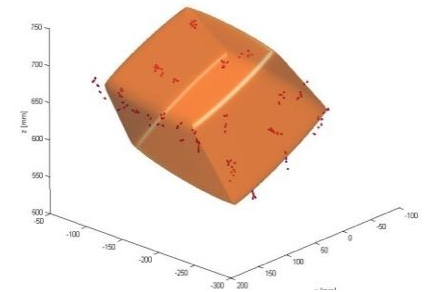


Beispiel: Exploration mit Taster (Schalter)

2D: Konturverfolgung



3D: Ertasten von Objekten

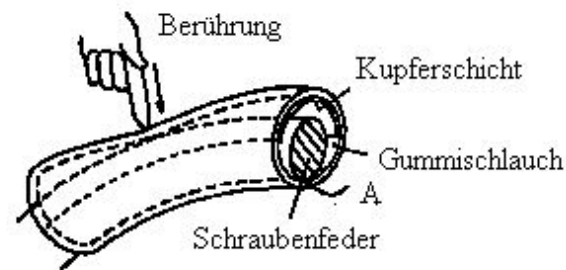
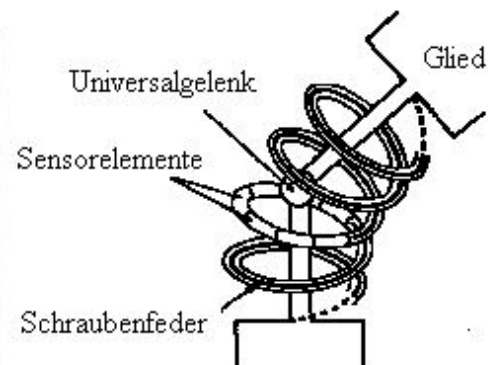
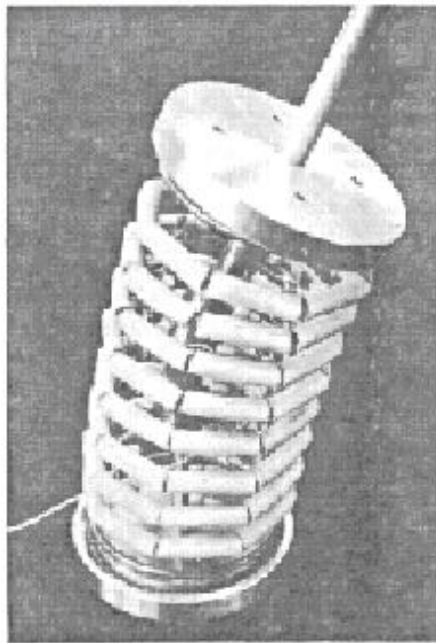


Vorlesung Robotik II
„Haptische Exploration“

Taktile Sensoren II

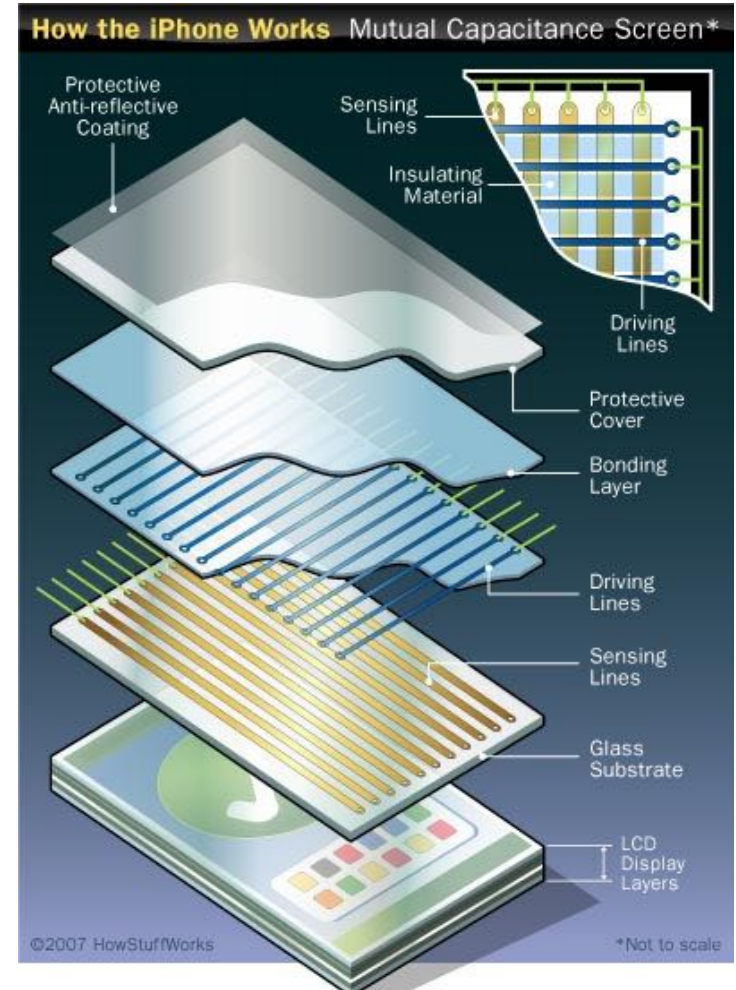
■ Beispiel: Berührungssensor

- **Einsatz:** zwischen Segmenten eines mehrgelenkigen Arms
- **Zweck:** Kollisionsdetektion in unstrukturierter Umgebung



Taktile Sensoren III

- Beispiel: iPhone
 - Kapazitiv
 - Transparent
 - Spezielle Anordnung der Ausleseelektroden
 - Multitouch



<http://electronics.howstuffworks.com/iphone2.htm>

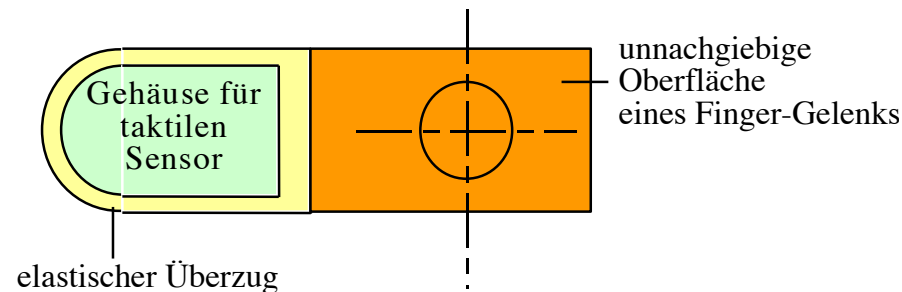
Taktil tastende Sensoren I

■ Array-Anordnungen („künstliche Haut“)

■ Anwendungen:

- Objektmanipulation, Berührungsflächen, Kraftschluss zwischen Greiferbacken
- Erkennung von Werkstückprofilen
- Auffinden stabiler Greifpositionen
- Erkennung des Verrutschens von Gegenständen

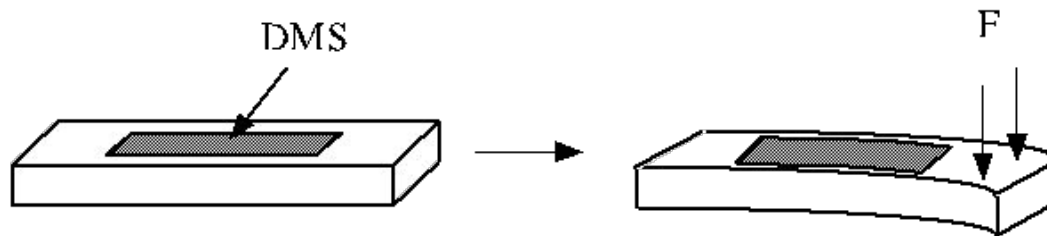
■ Roboterfinger (menschenähnliche Greifer)



Taktil tastende Sensoren II

Dehnungsmessstreifen

- Dehnmessstreifen verformt sich bei Krafteinwirkung
- Veränderung des ohmschen Widerstands



Zusammenhang: $\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon$ $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ Längenänderung

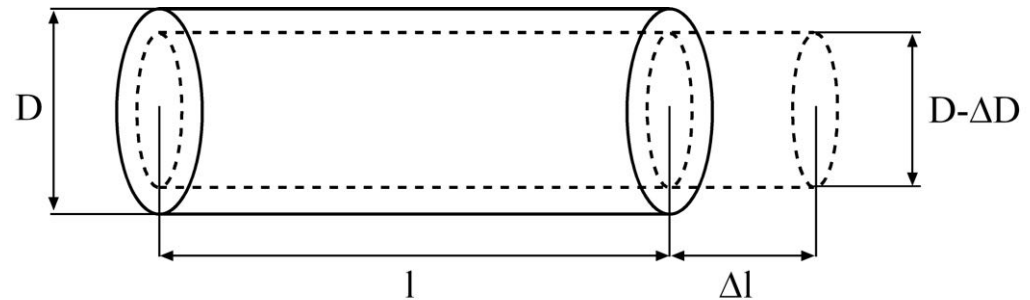
k Dehnungsempfindlichkeitskonstante

Wiederholung: Resistiver und piezoresistiver Effekt

- Widerstandsänderung durch mechanische Belastung
- Tritt bei allen Leitern auf
 - Metalle: Geometrieänderung
 - Halbleiter: Änderung spezifischer Widerstand

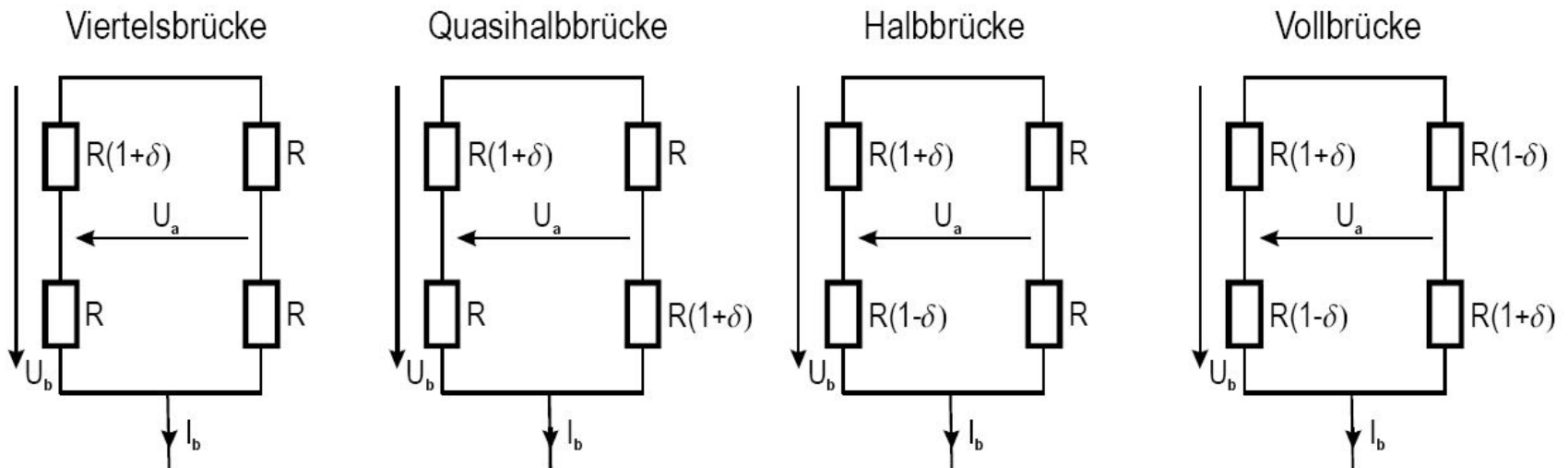
$$R = \rho \frac{l}{A} = \rho \frac{4 \cdot l}{D^2 \cdot \pi}$$

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



Messung resistiver Effekt

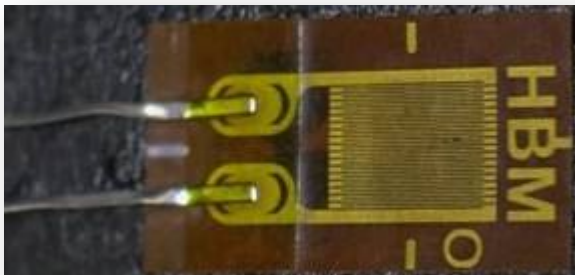
- Spannungs- oder Strommessung
- Brücken- oder Kompensatorschaltung
- Bsp.: Wheatstonsche Brücke
 - Konstanter Strom bzw. Spannung (I_b bzw. U_b)
 - $U_a \sim k \delta$



Taktil tastende Sensoren II

Dehnungsmessstreifen

- **Problem:** Dehnungsempfindlichkeit von Leitern gering
- **Lösung:** Messsignal erhöhen durch mäanderförmige Struktur



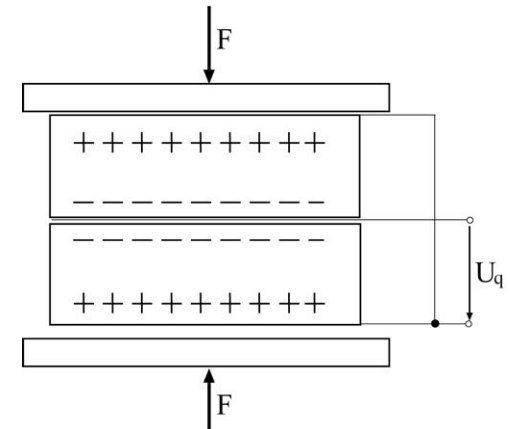
Anwendung:

Datenhandschuh
(Messung der
Fingergelenkwinkel)



Wiederholung: piezoelektrischer Effekt

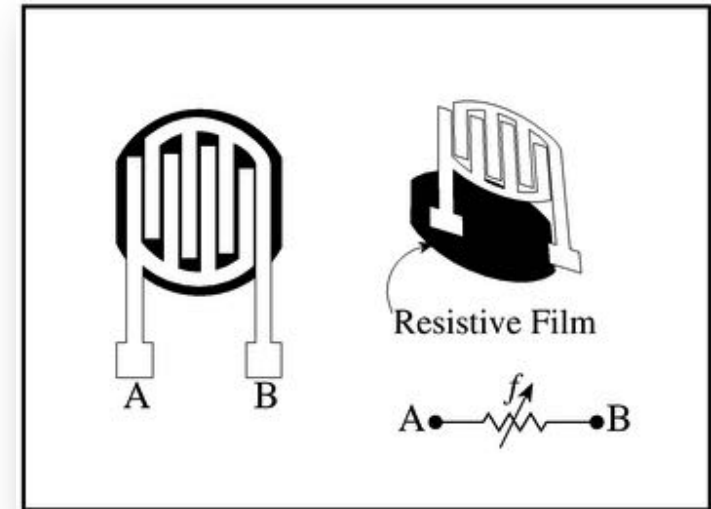
- Mechanische Spannung erzeugt Ladung
- Transversal-, Longitudinal-, Schereffekt
- Ladung fließt bei Messung ab → statische Belastung nicht messbar
- Ladungsstärke je nach Effekt von Abmessungen bzw. Stärke der Kraft abhängig



- Vorteile von piezoelektrischen Sensoren:
 - Unempfindlich gegenüber hohen Temperaturen ($<1000^{\circ}\text{C}$)
 - Keine äußere Spannungsversorgung notwendig
 - Hoher Wirkungsgrad der Umwandlung von mechanischer in elektrische Energie
 - Geringe mechanische Eigenschwingung und Hysterese durch starren Aufbau

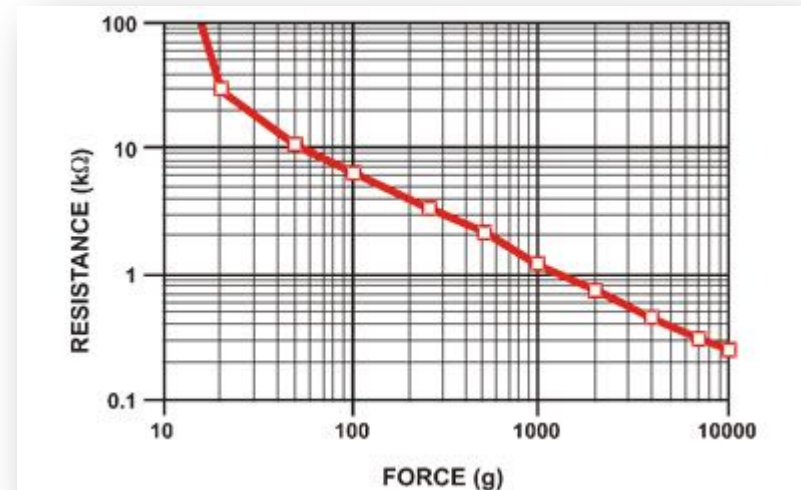
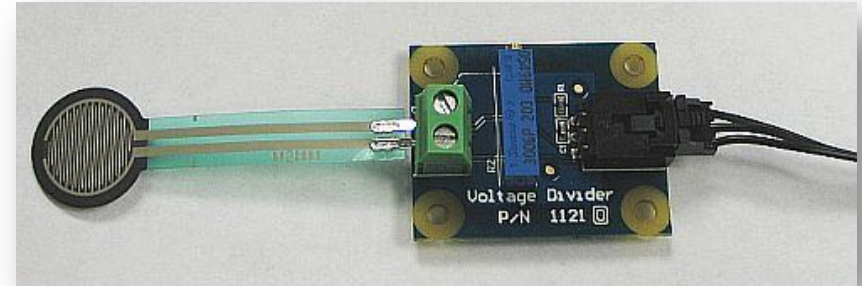
Force Sensing Resistor (FSR) I

- „Folienschalter“, halbquantitative Sensoren
- Aufbau
 - FSR-Schicht: Trägerschicht mit halbleitendem Polymer (FSR Tinte)
 - Elastische Klebeschicht als Abstandhalter
 - Elektrodenschicht: Trägerfolie mit Elektroden (Kammförmig)
- Bei Druck berührt FSR-Schicht die Elektrodenschicht, es bilden sich Widerstandsbrücken
- Widerstandsänderung abhängig von Kraft (exponentiell)



Force Sensing Resistor (FSR) II

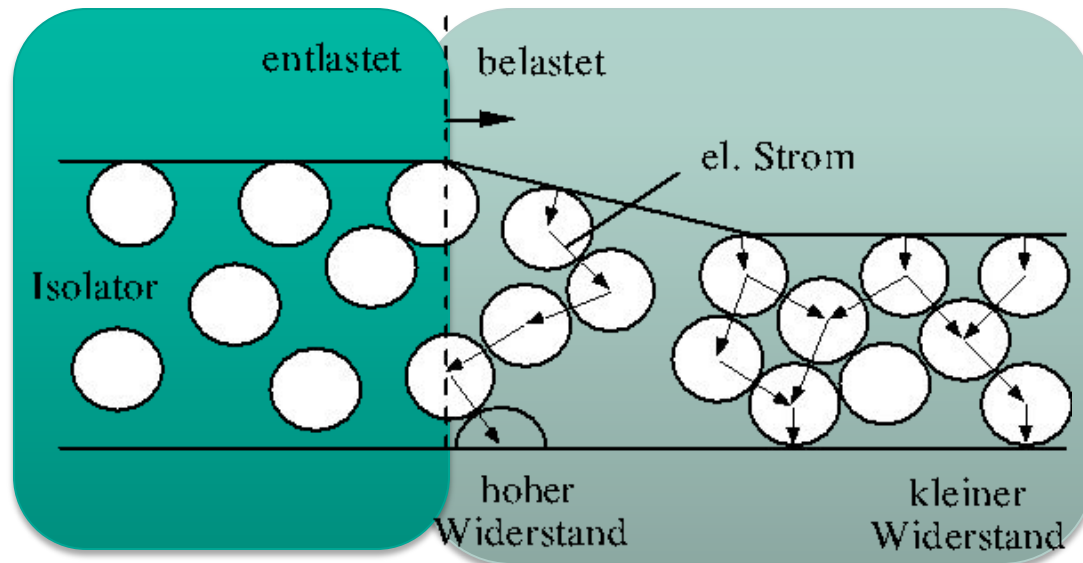
- Beispiel Fingerdruck:
10g bis 1000g = 400k Ω bis 40k Ω
- Vorteile:
 - Preiswert
 - Dünn
 - Sehr haltbar
 - Widerstandsfähig
- Nachteil: nicht hochgenau
- Messbereich: 10g bis 10 000g



Taktil tastende Sensoren IV

Drucksensitive Materialien I

- **Prinzip:** Verkürzung von oder Entstehung neuer Strompfade bei Belastung
- **Material:** z.B. Elastomer mit Kohlenstoffbeimischung



Taktil tastende Sensoren IV

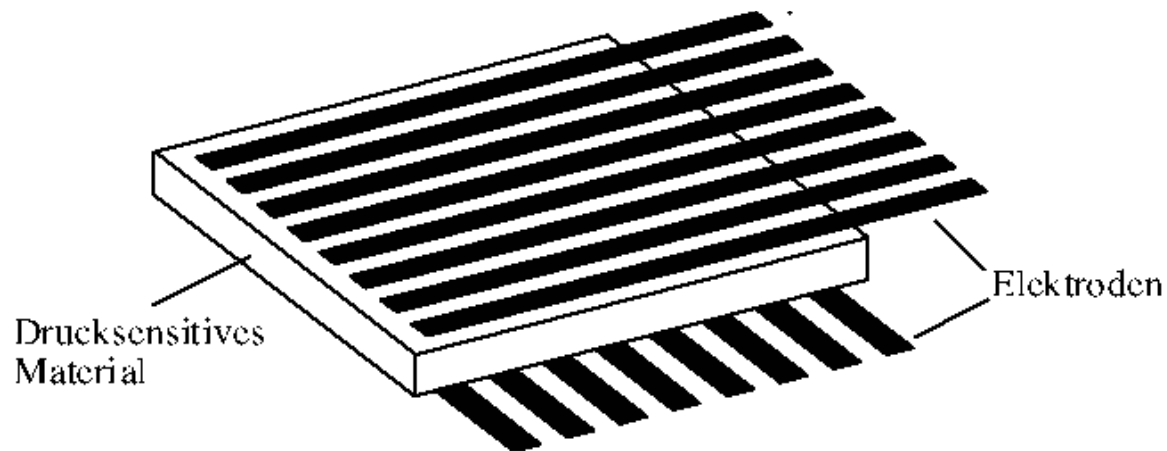
Drucksensitive Materialien II

- Verstärkung des Effekts durch Schicht, die aus teilweise leitfähigem Silikon besteht, das durch Abstandshalter von einer leitfähigen Leiterplatte getrennt wird.
 - Druckbelastung verformt Silikon und Leiterplatte wird berührt;
 - Kontaktfläche umso größer, je stärker einwirkende Kraft;

Taktil tastende Sensoren IV

Drucksensitive Materialien

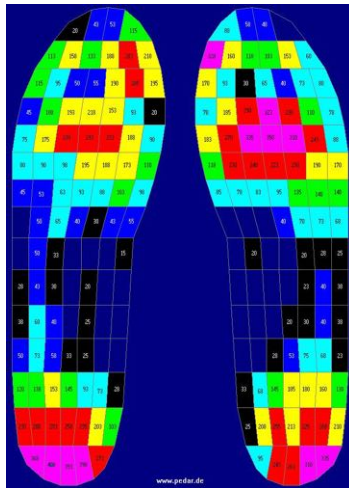
- Flächensensor:
 - zwei um 90° versetzte Elektrodenscharen; durch Multiplexer anwählbar
 - Arrayzeilen und –spalten
 - Erlaubt Erkennung des Druckpunktes
 - Trackpad am Laptop!



Taktil tastende Sensoren IV

Drucksensitive Materialien

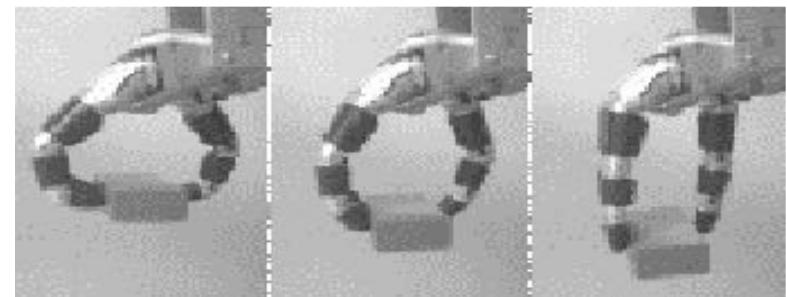
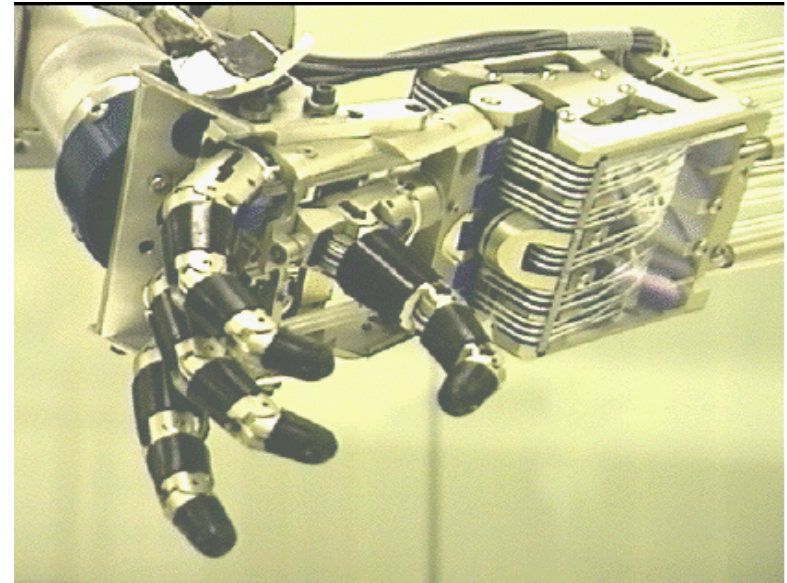
- Anwendungen:
 - Automobilindustrie (Reifenprofildruck)
 - Orthopädie
 - Robotik (Fußsohlen, künstliche Hände)



Taktil tastende Sensoren IV

Drucksensitive Materialien

- MIT/Utah Dextrous Hand:
 - 4 Finger
 - 16 DOF
 - Pneumatische Antriebe
- Forschung:
 - Simulation von Berührung
 - 256 Sensoren auf 3,2 cm²



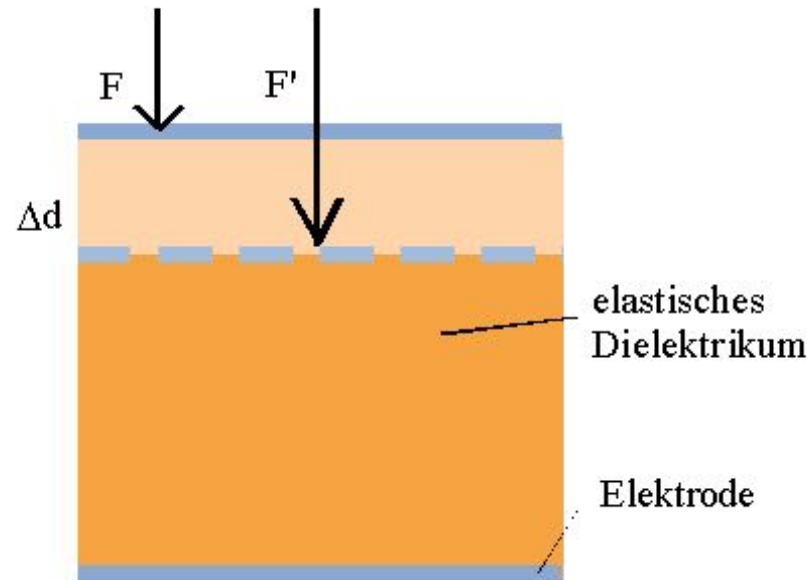
Kapazitätseffekt

Taktiler kapazitiver Sensor

- **Prinzip:** Plattenkondensator mit elastischem Dielektrikum
Kapazität:

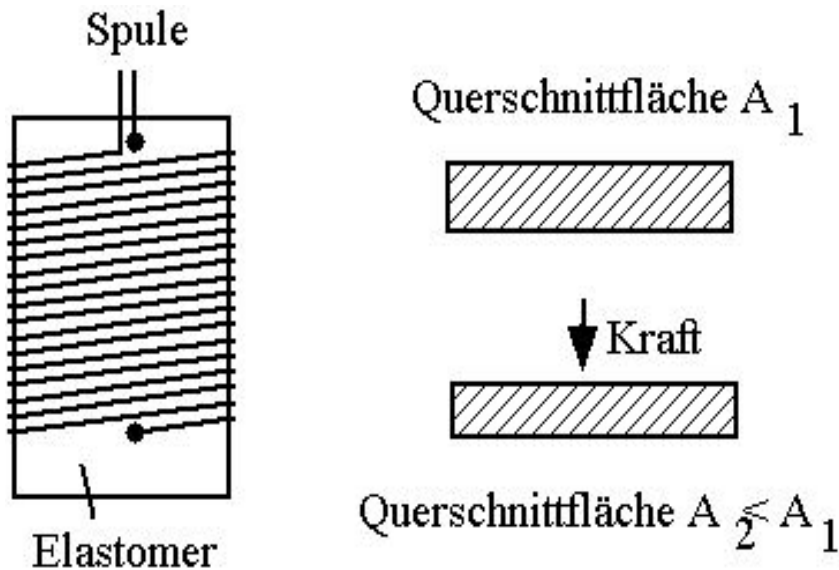
$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{A}{d}$$

Elektrodenabstand
umgekehrt proportional
zur Kraft F



Induktivitätseffekt

- Prinzip: Induktivitätsänderung einer Spule bei Krafteinwirkung
- Induktivität:



Funktion:

Krafteinwirkung senkrecht zur Sensorfläche

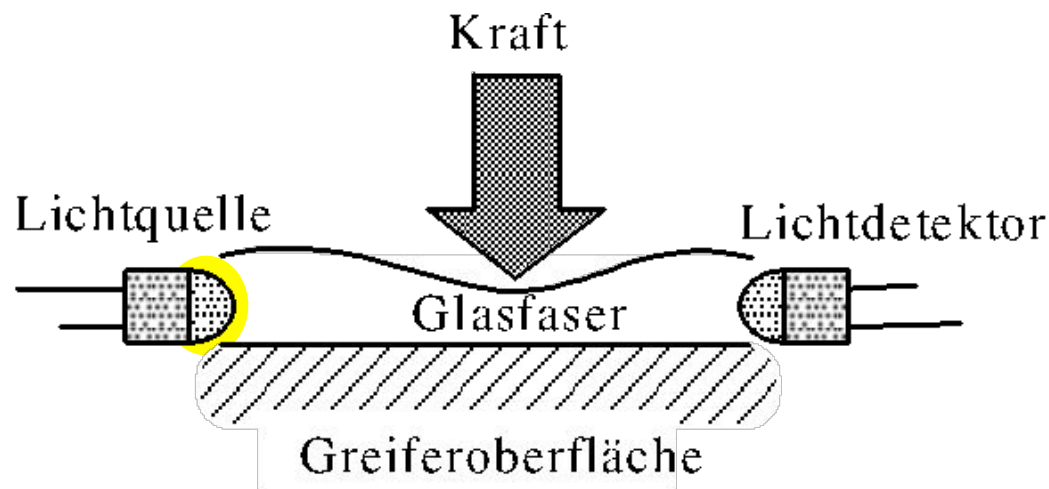
Änderung des Spulenquerschnitts

Änderung der Eigeninduktivität

Messung mit Rechteckoszillator und f/U-Wandler

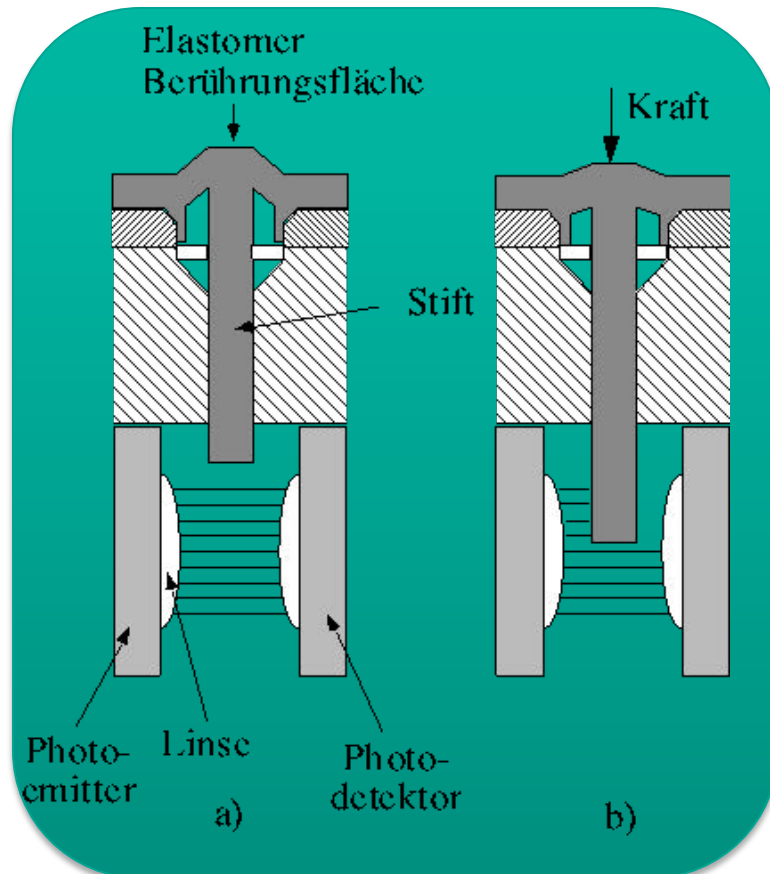
Taktil tastende Sensoren - Optische Effekte I

- Prinzip: Kraft beeinflusst von Lichtquelle emittierte Lichtmenge
 - Bsp.:
 - Glasfaser als Übertragungsmedium
 - Ohne Krafteinwirkung: keine Beeinträchtigung
 - Bei Krafteinwirkung: Änderung der Absorptionseigenschaften



Optische Effekte II

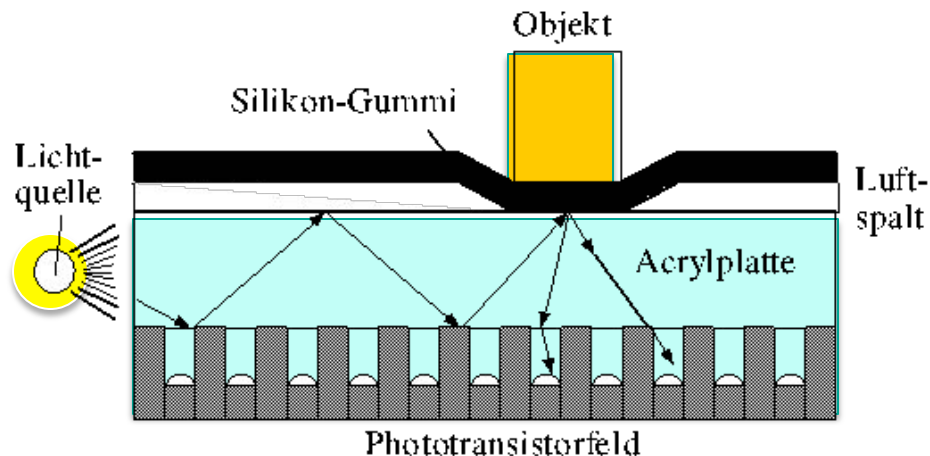
- Prinzip: Kraft beeinflusst indirekt emittierte Lichtmenge



- Kraft bewegt Stift nach unten
- Stift unterbricht Lichtweg zwischen Emitter und Detektor teilweise
- Resultierender Strom: Maß für einwirkende Kraft

Optische Effekte III

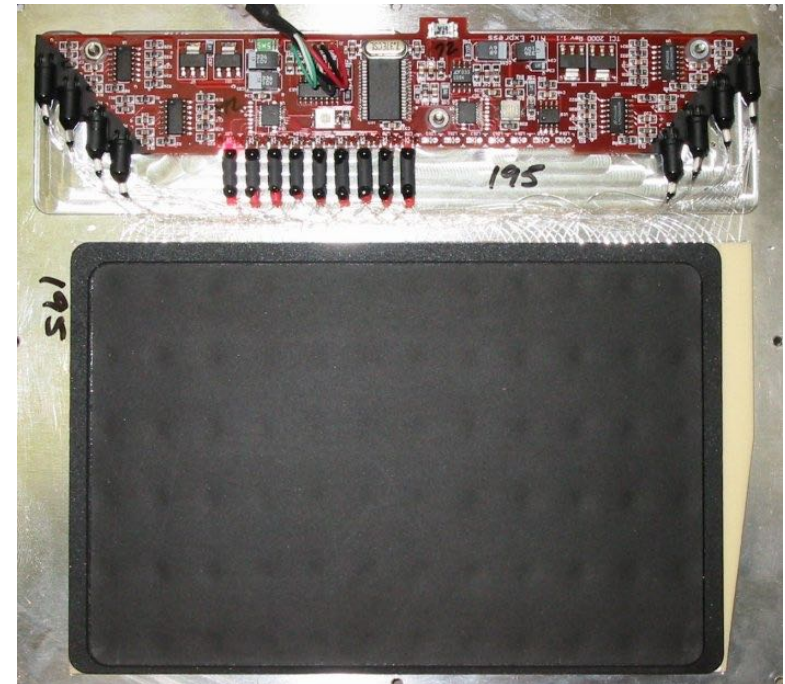
- Prinzip: Reflexionseigenschaften zweier Objekte mit unterschiedlichem Brechungsindex



- Funktion:
 - $\text{Brechungsindex}_{\text{Acryl}} > \text{Brechungsindex}_{\text{Luft}}$
 - Ohne Krafteinwirkung: Totalreflexion
 - Bei Krafteinwirkung diffuse Reflexionen, Licht tritt aus
 - Lichtintensität proportional zu einwirkendem Druck (in Grenzen)

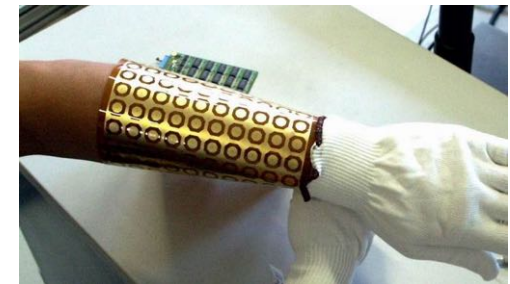
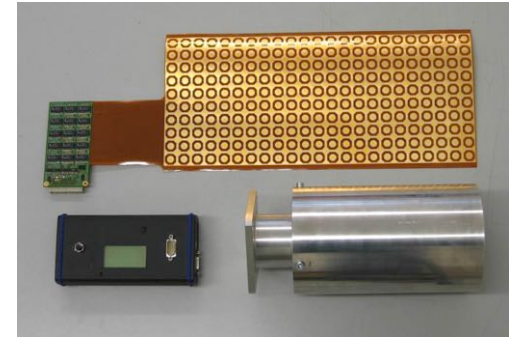
Entwicklung sensitive Haut I

- Kinotex-Sensor
 - Photoelastisches Messprinzip
 - $6 \times 12 = 72$ Messpunkte
 - Aktive Sensorfläche 95×145 mm
 - Druckmessbereich $0,1 - 200$ kPa
 - $f_{\text{Abtast,max}} = 200$ Hz
 - Druckauflösung 10 Bit



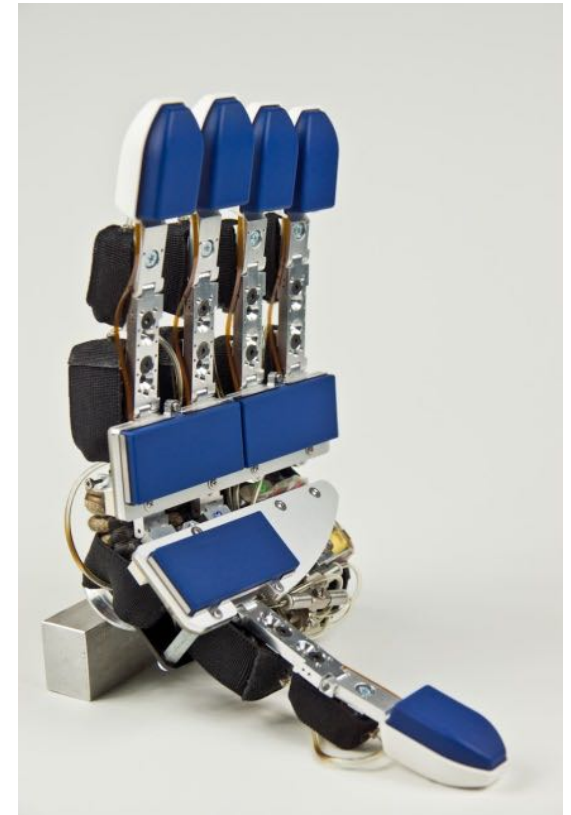
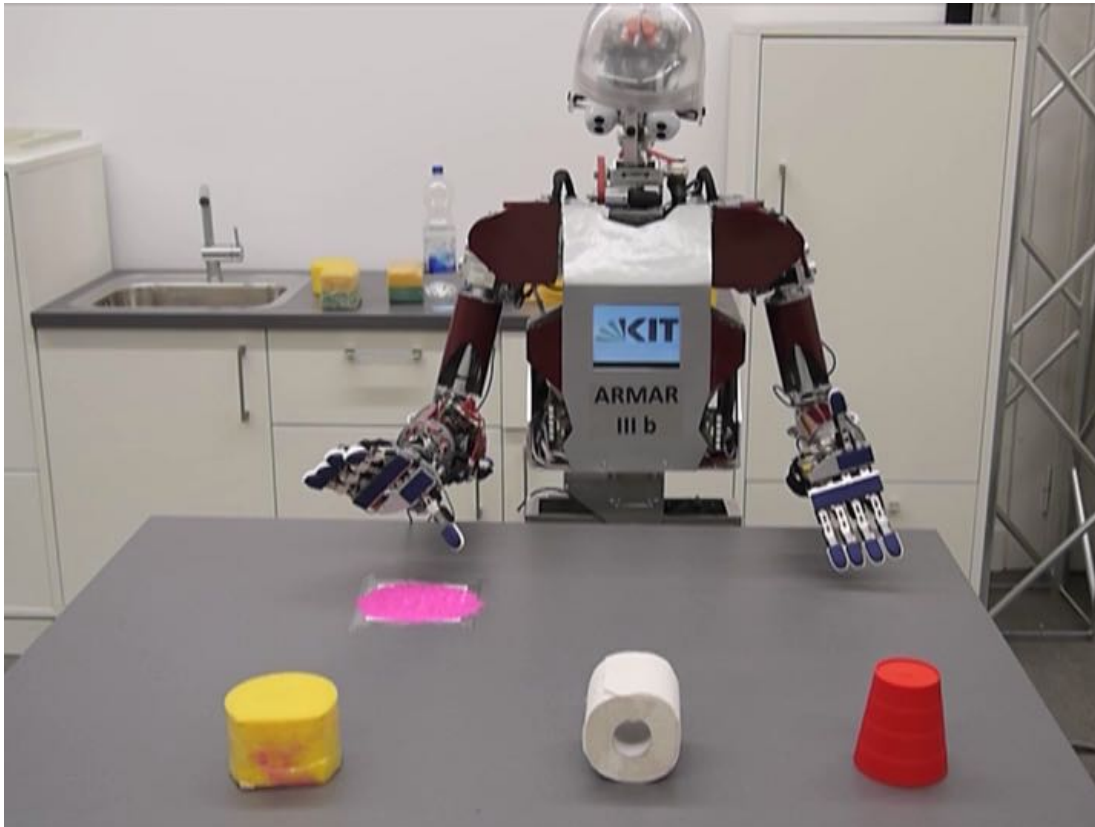
Entwicklung sensitive Haut II

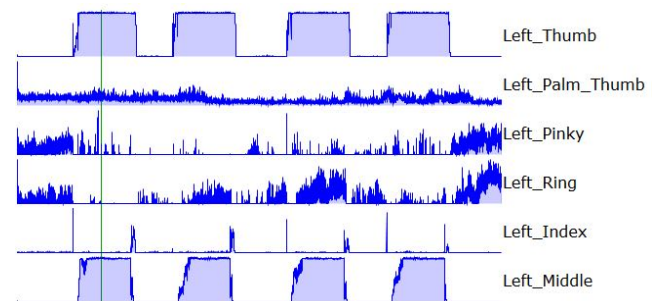
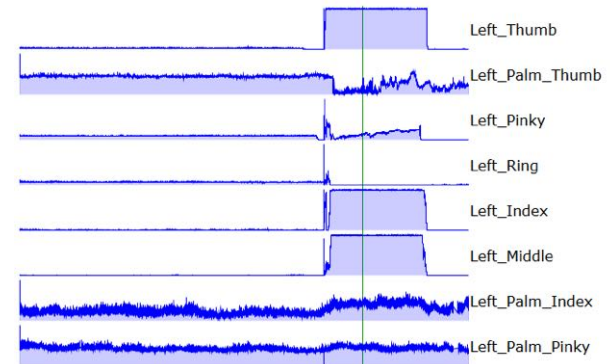
- Messung von Druckverteilungen mit Intensitäts-, Zeit- und Ortsauflösung
- Widerstandsmessung an der Grenzfläche des mit Graphit angereicherten Schaumstoffs und den metallischen Elektroden
- Flexible Sensormatrix zur Abdeckung eindimensional gekrümmter Flächen
- Signalaufbereitungs- und Datenverarbeitungseinheit als Embedded System → dezentrale Auswertung der Sensordaten und Entfernung von Redundanz



Entwickelt am IAR-IPR im SFB 588

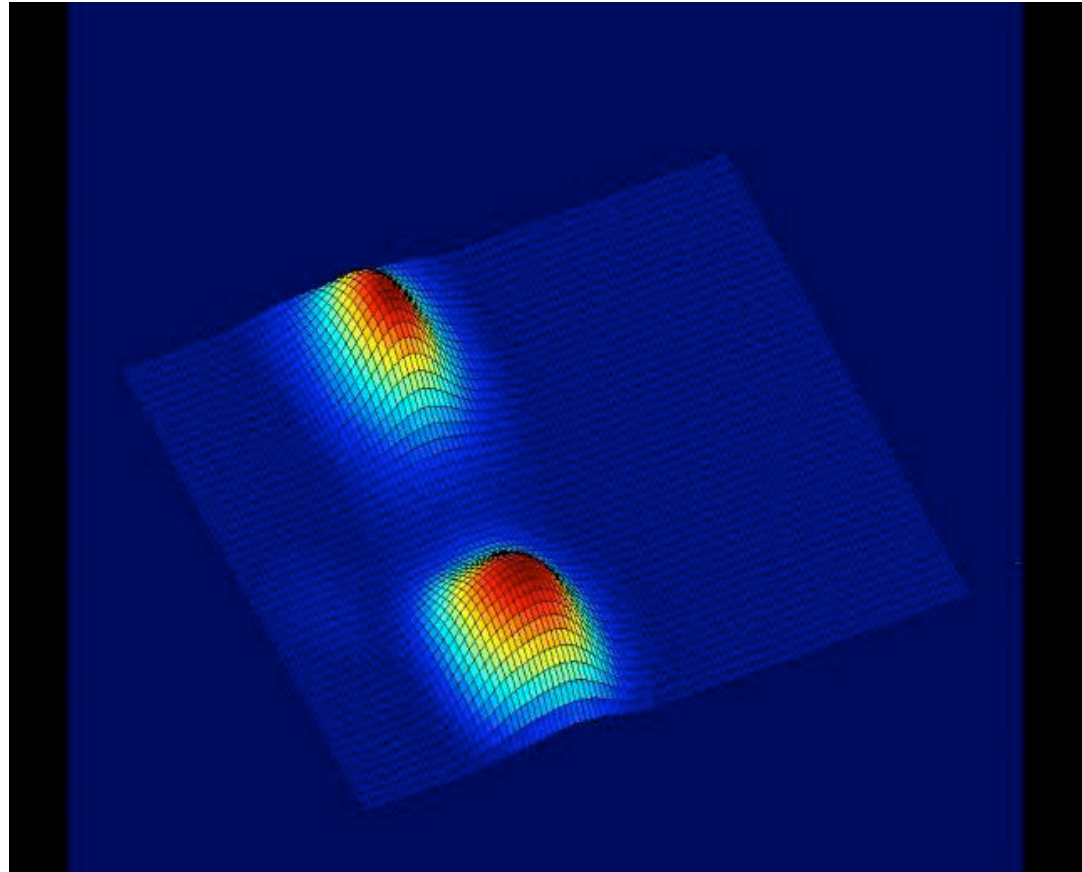
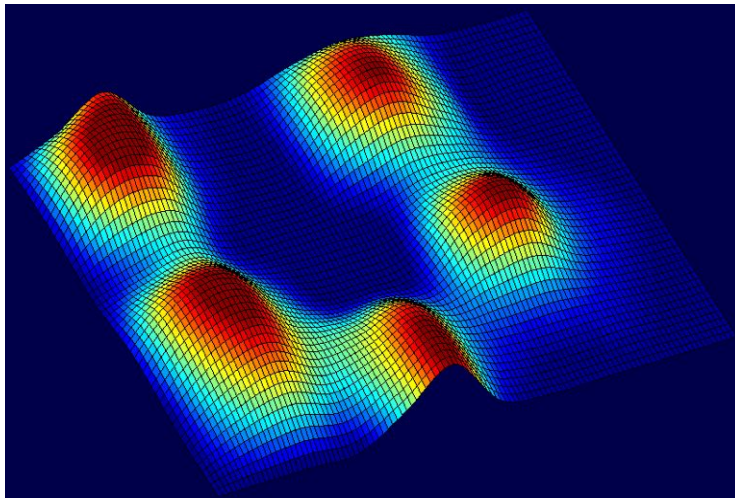
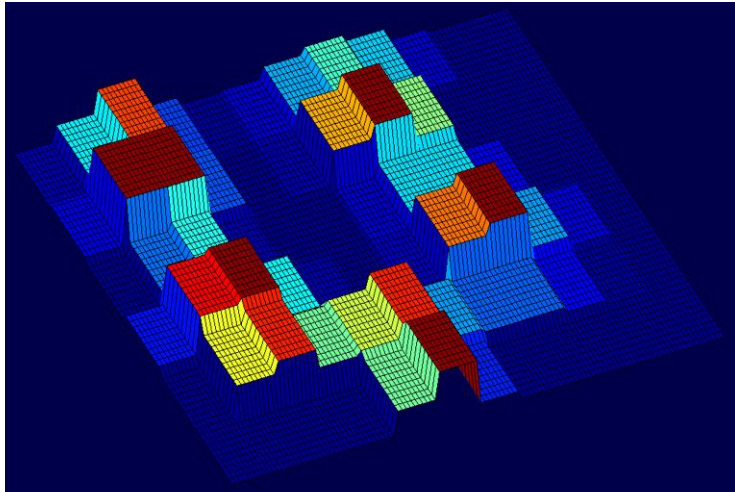
ARMAR-III Hand





Kontakt mit 2 fingern

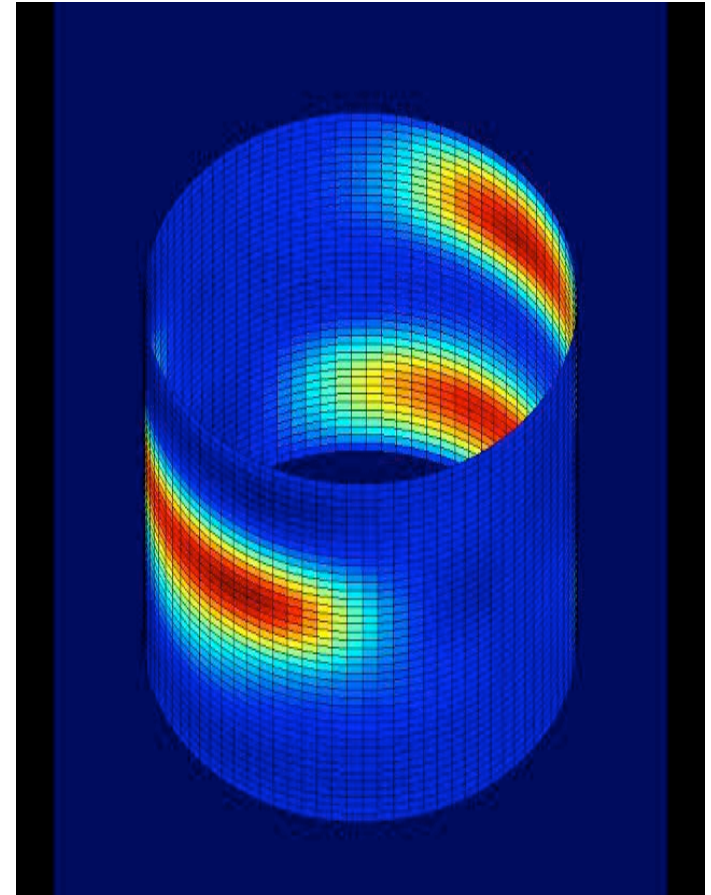
Entwicklung sensitive Haut II



Datenerhebung sensitive Haut

■ Probleme

- Erkennung von geometrischen Formen der Kontakte (Linie, Kreis, ...)
- Untersuchung der Kontaktpositionen relativ zueinander
- Berechnung der resultierenden Kraft



Externe Sensoren

Externe Sensoren

Taktile Sensoren

Tastende & gleitende Sensoren

Kraft-
Momenten-
Sensoren



Näherungs-sensoren

Kapazitive Sensoren

Optische Sensoren

Akustische Sensoren



Abstands-sensoren

Laufzeitbasiert

Triangulations-
basiert

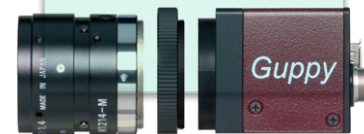


Visuelle Sensoren

Photodioden

CCD

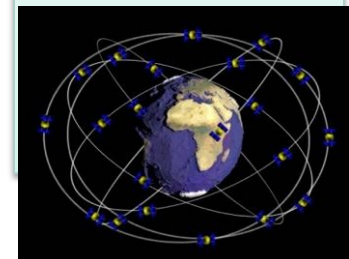
Algorithmik:
Lichtschnitt,
Stereo



Positions-sensoren

GPS

Natürliche/
künstliche
Landmarken



Magnetische Effekte I

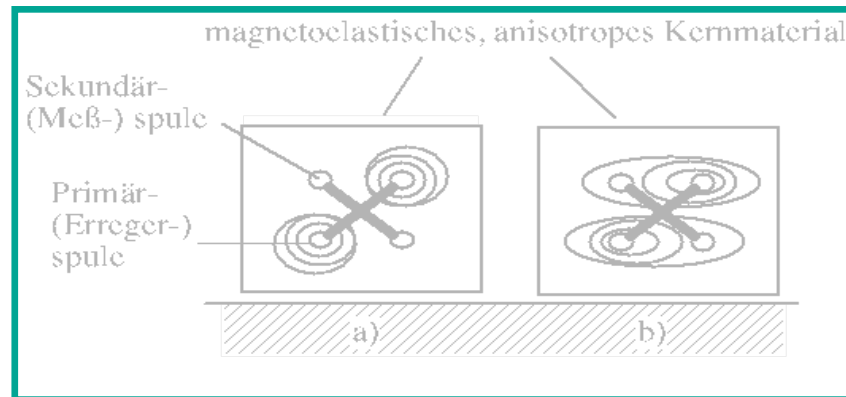
- Effekt :
 - Wechselwirkung zw. mechanischer Spannung, Dehnung und magnetischen Größen
 - Induktion bzw. magnetische Feldstärke in ferromagnetischen Stoffen (z.B. Eisen, Nickel, Kobalt).

- In festem Aggregatzustand bilden diese Stoffe „Weißsche Bezirke“:
 - Magnetisches Moment der Atome gleichgerichtet. Normalerweise keine Magnetisierung des Materials.
 - Äußeres Magnetfeld oder mechanische Spannung ändern Weißsche Bezirke in Betrag und Richtung → außen entsteht magnetischer Effekt

Magnetische Effekte II

Magnetoelastischer Sensor

- **Prinzip:** magnetisch isotropes Material wird unter Druck anisotrop
- **Aufbau:** 2 zueinander orthogonale Spulen in ferromagnetischem Material



- a) Ohne Krafteinwirkung: Induktion symmetrischer Feldlinien
- b) Mit Krafteinwirkung: Vorzugsrichtungen verändern Magnetisierung in Primärspule. Spannung wird in Sekundärspule induziert

Magnetische Effekte III

Magnetoresistiver Sensor

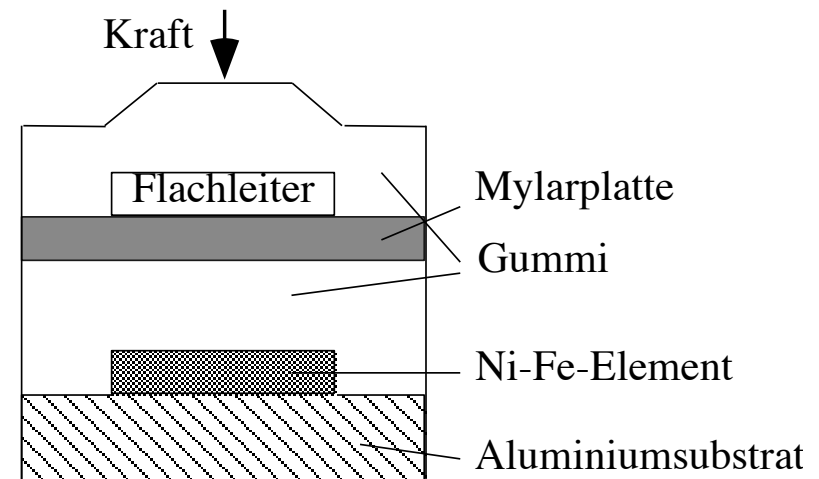
- **Prinzip:** Änderung des spezifischen Widerstand unter Einfluss eines veränderlichen Magnetfeldes
- **Aufbau:** Ni-Fe-Element, stromführender Leiter, Gummi

Funktion:

Einwirkende Kraft verringert Abstand zwischen Leiter und Ni-Fe-Element.

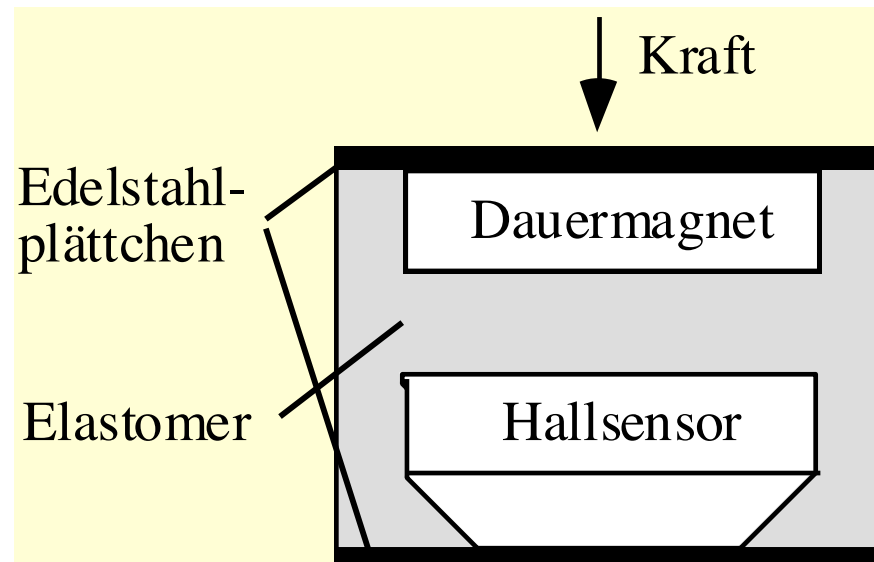
Änderung des Magnetfelds

Änderung des Widerstands im Ni-Fe-Element



■ Halleffekt:

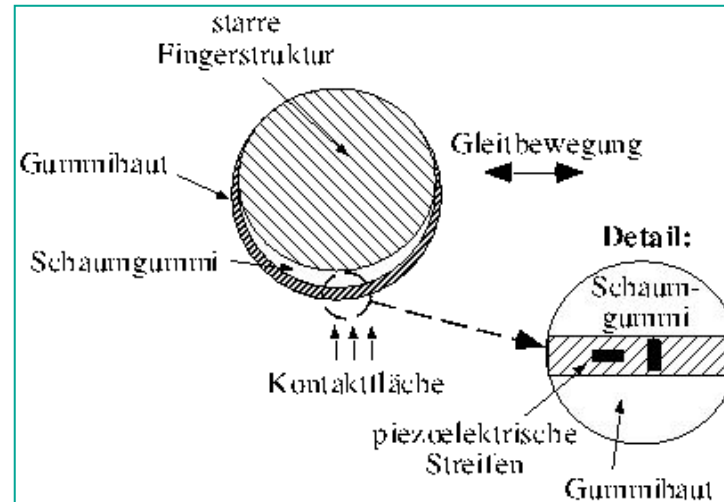
Wirkung eines magnetischen Feldes auf stromdurchflossenen Halbleiter



Umwandlung der Druckkraft in Wegänderung und Ausgangsspannung

Taktil gleitende Sensoren

- Information über Oberflächenbeschaffenheit und geom. Struktur
 - Bsp.: „**Stress Rate Sensor**“ für Roboterfinger
 - Bei Gleiten über Oberfläche: Änderung der Belastung
 - Messung mit piezoelektrischem Polymer
 - Information über Nachgiebigkeit, Betrag und Richtung der Kraft, Reibung



Externe Sensoren

Externe Sensoren

Taktile Sensoren

Tastende & gleitende Sensoren

Kraft-
Momenten-
Sensoren



Näherungs- sensoren

Kapazitive Sensoren

Optische Sensoren

Akustische Sensoren



Abstands- sensoren

Laufzeitbasiert

Triangulations-
basiert

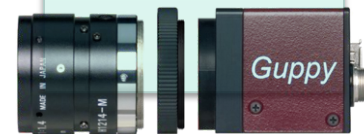


Visuelle Sensoren

Photodioden

CCD

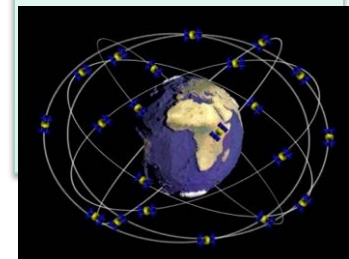
Algorithmik:
Lichtschnitt,
Stereo



Positions- sensoren

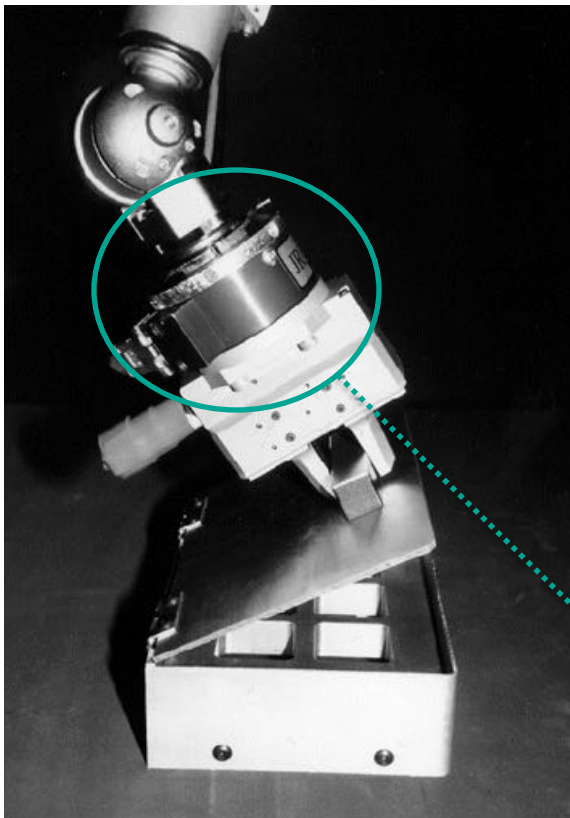
GPS

Natürliche/
künstliche
Landmarken



Kraft-Momenten-Sensoren I

- Erfassung der Kräfte und Momente zwischen Effektor und Handhabungsobjekt



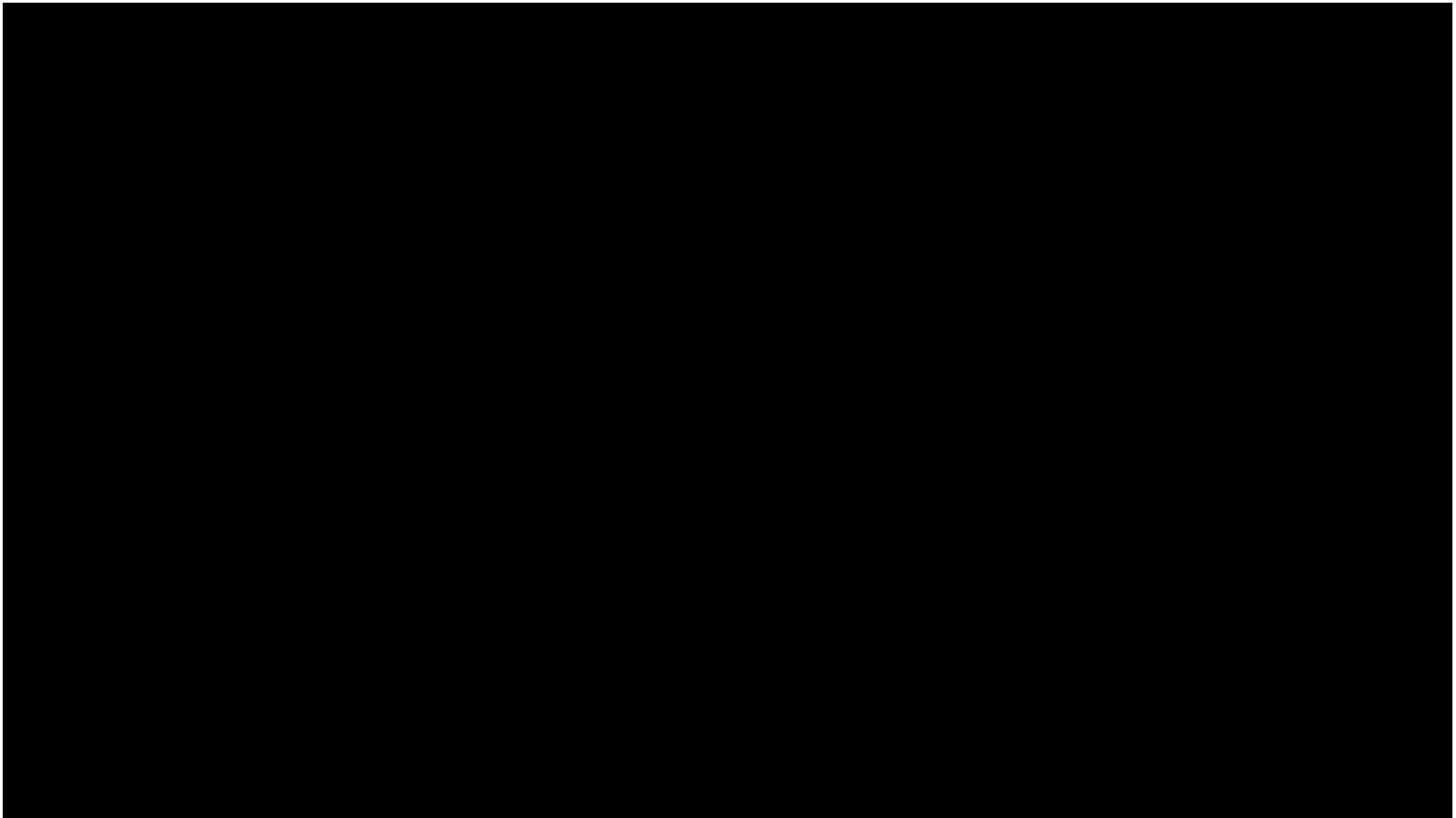
- Bsp.: **Kraftmessdose**

- Kombination mehrerer Kraftaufnehmer
- Messumwandler: Piezokristalle, DMS (meist), optische Effekte
- Anbringung: zwischen Effektor und Handgelenk

- Bsp: KMS an einem Puma260

Warum Kraft-Momenten-Sensoren

- ATI Force/Torque Sensor (<http://www.ati-ia.com>)



Kraft-Momenten-Sensoren

Aktiv:

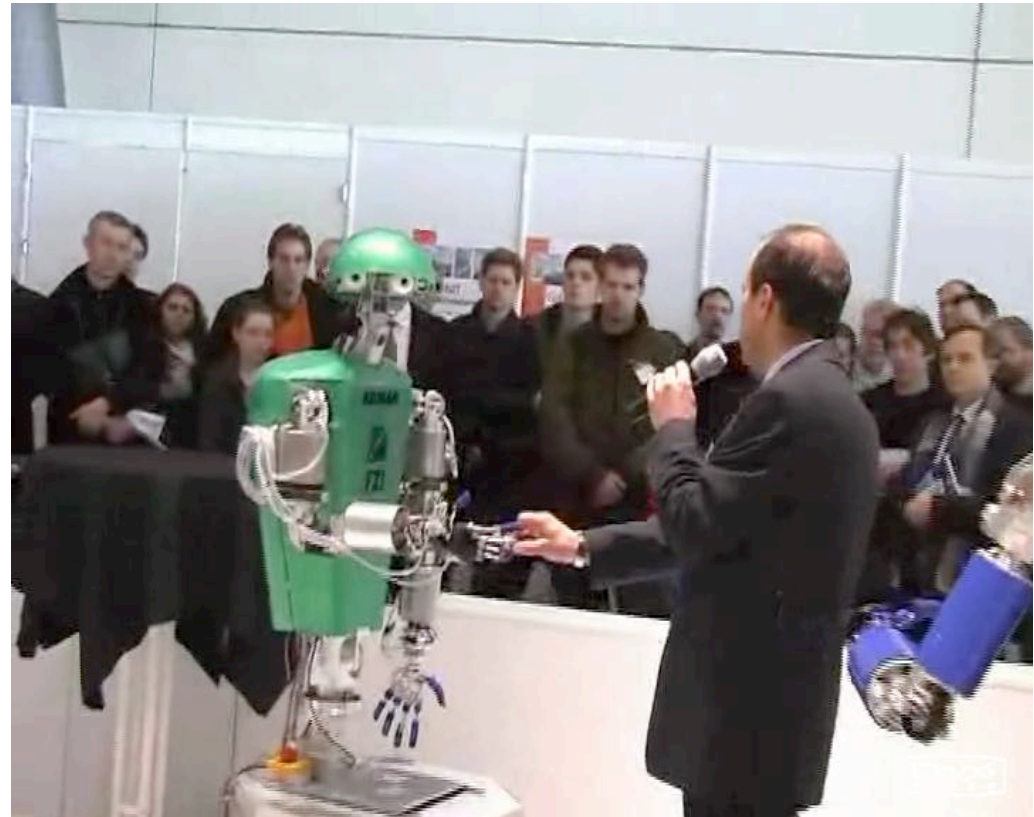
Feststellen ausgeübter
Kräfte / Momente

- Sicherheit
- Genauigkeit

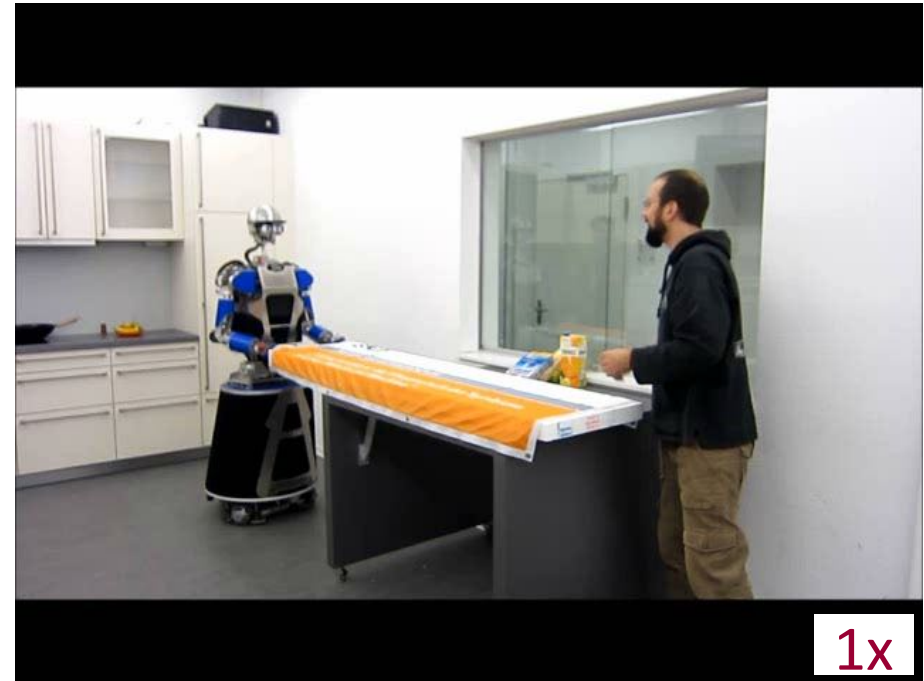
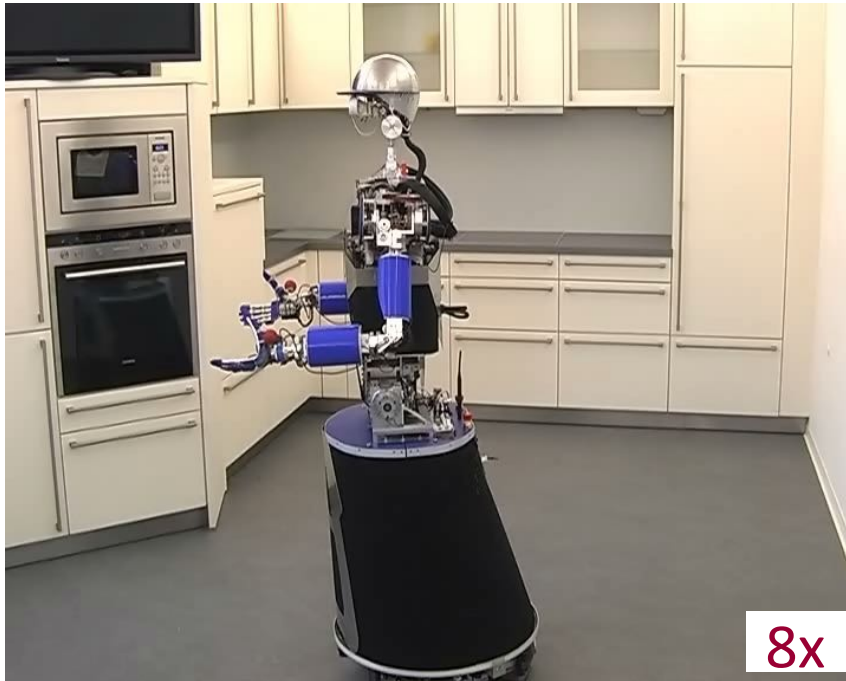
Passiv:

Führen des Roboters
durch den Benutzer

- Teach-In
- Interaktion

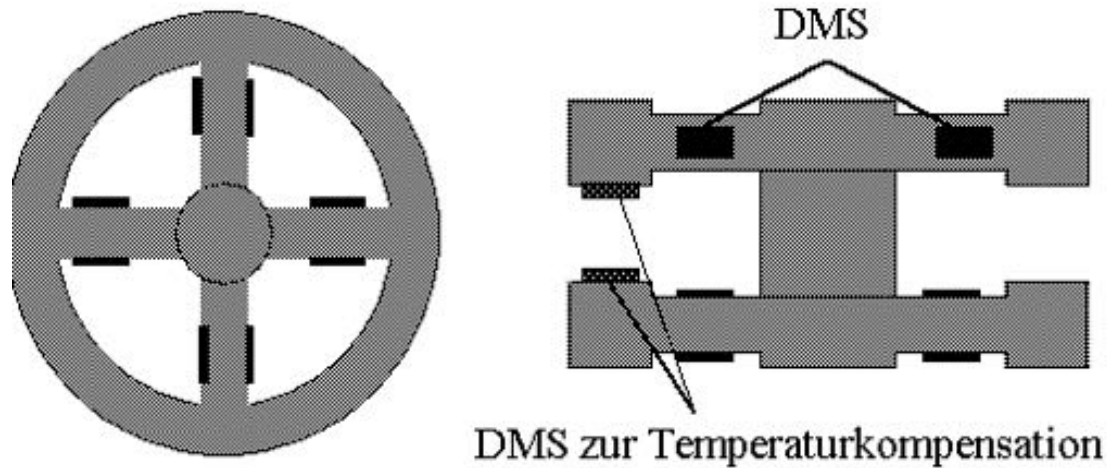


Kraft-Momenten-Sensoren



Kraft-Momenten-Sensoren II

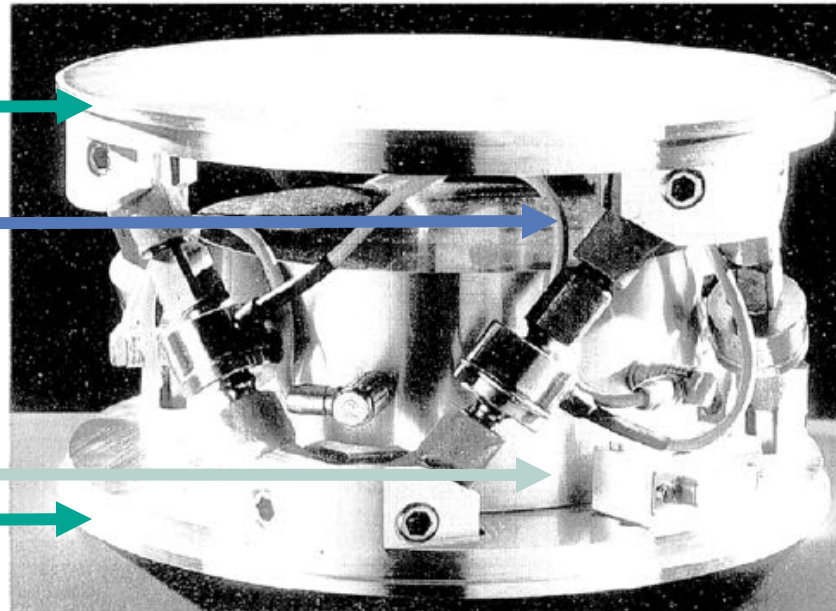
- Typische Form für KMS mit DMS: Speichenradform



- Angreifende Kräfte ändern Länge elastischer Stege
- DMS auf Stegen angebracht
- Berechnung der Kraft-Momenten-Komponenten mit Entkopplungsmatrix

Kraft-Momenten-Sensoren III

Compliance Sensor



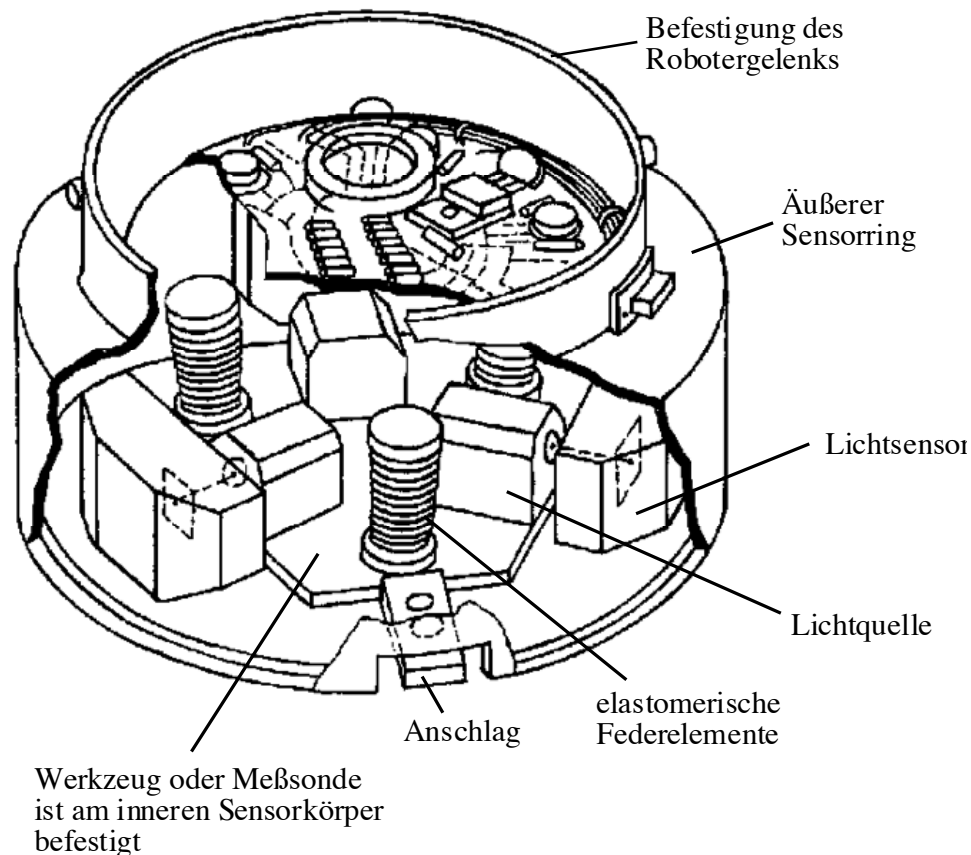
Aufbau: zwei bewegliche Platten für Effektor und Arm

Bei Krafteinwirkung: Ausgleichbewegung

Messung der Bewegung durch Infrarotdetektoren

Kraft-Momenten-Sensoren IV

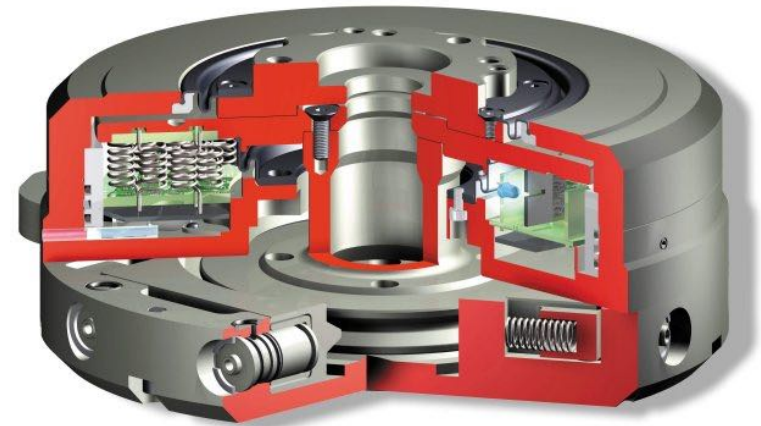
■ Aufbauschema des Compliance Sensors



Kraft-Momenten-Sensoren V

Nachgiebiger Kraft-Momenten-Sensor

- Entwicklung durch DLR –
(Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt)
- Optisches Messprinzip
- Integrierte Elektronik
- CAN-Bus Schnittstelle
- Translation: 150 N (F_x , F_y , F_z)
- Rotation: 4 Nm (M_x , M_y), 8 Nm
(M_z)



Literatur

- Robotik 3 Skript
 - In der Vorlesung behandelte Aspekte aus Kapitel 2.2