



# 64-424 Intelligente Roboter

[http://tams.informatik.uni-hamburg.de/  
lectures/2011ws/vorlesung/ir](http://tams.informatik.uni-hamburg.de/lectures/2011ws/vorlesung/ir)

Jianwei Zhang



Universität Hamburg  
Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften  
Fachbereich Informatik

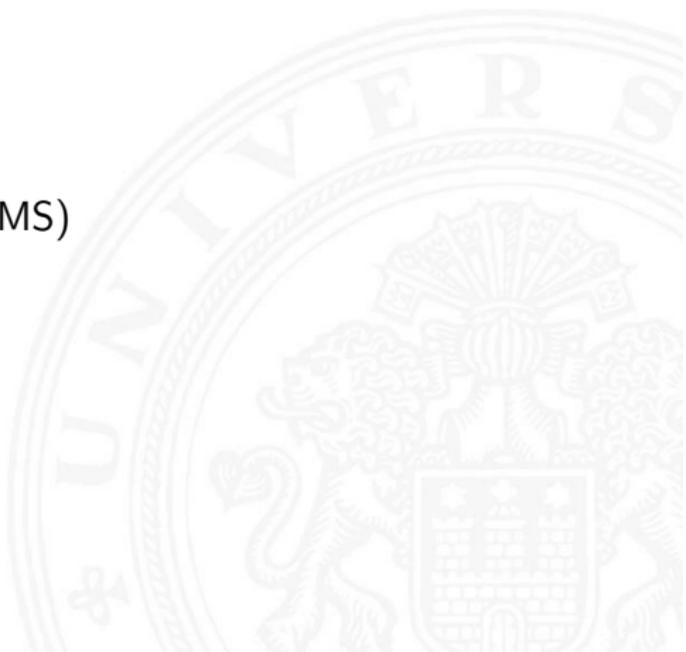
**Technische Aspekte Multimodaler Systeme**

Wintersemester 2011/2012



# Gliederung

1. Grundlagen der Sensorik
2. Winkel und Bewegungen
3. Kräfte und Druck
  - Dehnungsmessstreifen
  - Anwendung: *BarrettHand*
  - Kraft-Moment-Sensoren (KMS)
  - Taktile Sensoren
  - Literatur
4. Abstandssensoren
5. Scandaten verarbeiten
6. Rekursive Zustandsschätzung
7. Sichtsysteme
8. Fuzzy-Logik





# Gliederung (cont.)

## 9. Steuerungsarchitekturen





## Dehnungsmessstreifen (DMS)

- ▶ 1938 erfand der Amerikaner *A. C. Ruge* den **Dehnungsmessstreifen (DMS)**
- ▶ Dehnungsmessstreifen sind auf einer Trägermaterial aufgebrachte dünne Leiterbahnen
- ▶ Sie werden fest mit einer Werkstückoberfläche verklebt
- ▶ Bei mechanischen Spannungen verändern sie ihren Widerstand
- ▶ Für die sehr kleinen Widerstandsänderungen sind spezielle Schaltungen und Messgeräte erforderlich
- ▶ Neben der Größe und Richtung mechanischer Spannungen lassen sich auch damit verbundene Größen wie Weg, Kraft, Druck oder Beschleunigung messen



## Physikalischer Hintergrund

- ▶ Bei mechanischer Belastung (z.B. Dehnung) eines Drahtes (Metall) vergrößert sich dessen elektrischer Widerstand
- ▶ Ursachen:
  - ▶ Vergrößerung der Länge
  - ▶ Verringerung der Querschnittsfläche
  - ▶ bei starker Dehnung auch Umkristallisierung
- ▶ Der Effekt wurde von *William Thomson* im Jahre 1856 entdeckt und unter Verwendung der **Wheatstoneschen Brückenschaltung** (*Charles Wheatstone*, 1843) gemessen



## Physikalischer Hintergrund (cont.)

- ▶ Art der Dehnung hängt ab von
  - ▶ Form des Körpers
  - ▶ Angriffsweise der äußeren Kräfte
  - ▶ Materialeigenschaften des Körpers
- ▶ Ein Körper heißt **elastisch**, wenn er bei Wegfall der äußeren Kräfte seine ursprüngliche Form wieder annimmt



## Physikalischer Hintergrund (cont.)

- ▶ Lineare Beschreibung der Elastizität durch **Hookesches Gesetz**:

$$\sigma = \frac{F}{A} = E \cdot \epsilon$$

$\sigma$ : Zug- (negativ) oder Druckspannung (positiv)

$F$ : normal zur Fläche  $A$  angreifende Kraft

$\epsilon$ : Dehnung

$E$ : Dehnungs- oder Elastizitätsmodul (Materialkonstante)



## Physikalischer Hintergrund (cont.)

- ▶ Die Dehnung  $\epsilon$  ist das Verhältnis der Längenänderung  $\Delta l$  zur ursprünglichen Länge  $l_0$  bei einer Spannung  $\sigma$ :

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

- ▶ linear elastisches Verhalten gilt nur bis zu einer Grenze  $\sigma_p > \sigma$



# Widerstandsänderung

Widerstand  $R$  eines Drahtes:

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

$l$ : Länge des Drahtes

$\rho$ : spezifischer Widerstand

$d$ : Durchmesser

$A = \pi d^2/4$ : Querschnittsfläche



## Widerstandsänderung (cont.)

- ▶ Wird der Draht (einachsig) gedehnt, ändert sich der Widerstand  $R$  aufgrund der Änderungen von  $l$ ,  $A$ , und  $p$
- ▶ Für infinitesimal kleine Änderungen gilt folgender Zusammenhang (totales Differential):

$$dR = \frac{4p}{\pi d^2} dl + \frac{4l}{\pi d^2} dp + \frac{8lp}{\pi d^3} dd$$



## Widerstandsänderung (cont.)

Gilt  $\Delta p \ll p$ ,  $\Delta l \ll l$  und  $\Delta d \ll d$ , so lässt sich mit guter Genauigkeit die relative Widerstandsänderung  $\Delta R/R$  annähern:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - 2\frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta p}{p}$$



## Widerstandsänderung (cont.)

- ▶ Bei einer Dehnung  $\epsilon$  in Längsrichtung verändert sich der Durchmesser um  $\epsilon_q = \Delta d/d$
- ▶ Poissonzahl:  $\mu = -\epsilon_q/\epsilon$   
 (Das Minuszeichen kennzeichnet die Gegenläufigkeit von Längen- und Dickenänderung)
- ▶ Für die relative Widerstandsänderung folgt:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta R}{R} &= \epsilon + 2\mu\epsilon + \frac{\Delta\rho}{\rho} \\ &= (1 + 2\mu) \cdot \epsilon + \frac{\Delta\rho}{\rho} \end{aligned}$$



## Dehnungsmessstreifen in der Praxis

In der Praxis verwendete Dehnungsmessstreifen (DMS):

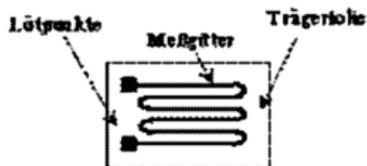
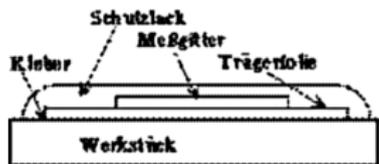
- ▶ **Folien-DMS:** bestehen aus Trägermaterial (z.B. Polyamid) und den eigentlichen Messstegen (z.B. aus Konstantan)
- ▶ **Halbleiter-DMS:** Messstege aus Halbleitermaterial, hochempfindlich, überwiegend in Drucksensoren angewandt
- ▶ **Draht-DMS:** flach gewickelter Dehndraht ( $\varnothing \approx 0.02 \text{ mm}$ ) auf Papierträger
- ▶ **Röhrchen-DMS:** DMS mit frei gespannten Drähten, Messung bei hohen Temperaturen



## Folien-DMS

- ▶ *Folien-DMS* sind die am häufigsten verwendete Dehnungsmessstreifen
- ▶ Metallisches Messgitter wird in einem galvanischen Verfahren auf eine Trägerfolie aufgebracht
- ▶ Eine dünne Kunststoffschicht schützt das Messgitter
- ▶ Werden mit speziellem Kleber auf ein Werkstück aufgebracht

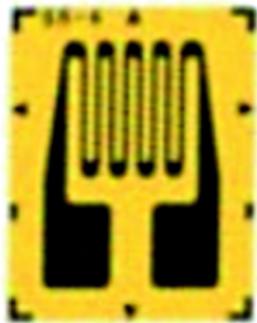
## Folien-DMS (cont.)





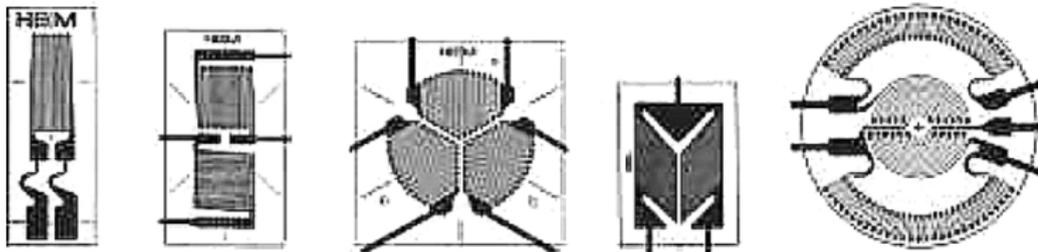
## Folien-DMS (cont.)

- ▶ Standard-Messgitter: lang und schmal (z.B.  $6 \times 2 \text{ mm}^2$ )
- ▶ Es besitzt zwei Löt-Anschlusspunkte und wird in Längsrichtung belastet
- ▶ Es wird nur in dieser einen Lastrichtung gemessen (einachsige Spannungsmessung), die Querempfindlichkeit ist gering



## Folien-DMS (cont.)

Beispiele für Folien-DMS:



- (a) einfache Form,
- (b) & (c) für verschiedene Koordinaten,
- (d) für Drehmomentaufnehmer und
- (e) Rosette für Membran-Druckaufnehmer



## Folien-DMS (cont.)

- ▶ typische Nennwiderstände: 120, 300, 350 oder 600  $\Omega$
- ▶ Toleranzen der Widerstandswerte  $< \pm 0,5\%$
- ▶ Betriebsspannungen: 1 V – 10 V
- ▶ Änderungen der Länge des DMS bis zu  $\pm 3\%$
- ▶ elastischer Bereich in der Praxis meist nicht ausgenutzt
- ▶ typische Längenänderungen: 0.1 – 10  $\mu m$
- ▶ erreichbare Genauigkeit bei 20° C etwa 1 % bis 5 %



## Folien-DMS (cont.)

Häufig verwendete Messgitter-Materialien:

- ▶ Konstantan (57% *Cu*, 43% *Ni*)  $k = 2.05$
- ▶ Karma (20% *Cr*, 73% *Ni*, 7% *Fe - Al*)  $k = 2.1$
- ▶ Nichrome V (20% *Cr*, 80% *Ni*)  $k = 2.2$
- ▶ Platin Wolfram (92% *Pt*, 8% *W*)  $k = 4.0$



## k-Wert

- ▶ Gibt an, um welchen Faktor die relative Widerstandsänderung über der relativen Längenänderung liegt
- ▶ Hoher k-Wert  $\Rightarrow$   
bei gleicher Dehnung eine große Widerstandsänderung  
und damit ein hohes Messsignal
- ▶ Wird durch den Gefügebau und die Vorgänge im Gefüge während der Dehnung bestimmt
- ▶ Für die meisten DMS gilt  $k = 2$



## k-Wert (cont.)

- ▶ **Bekannt:** relative Widerstandsänderung  $\Delta R/R$

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\mu) \cdot \epsilon + \frac{\Delta p}{p}$$

- ▶ Daraus folgt das Verhältnis Widerstands- zu Längenänderung:

$$k = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} = 1 + 2\mu + \frac{\Delta p/p}{\epsilon}$$

- ▶ und es gilt:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \epsilon$$



## Temperatureinflüsse

- ▶ Bei geeigneter DMS- und Kleberauswahl kann der Temperaturbereich von 4 K bis 1200 K (900° C) überbrückt werden
- ▶ DMS werden mit verschiedenen Temperaturkoeffizienten angeboten (für verschiedene Objektmaterialien, begrenzter Temperaturbereich)
- ▶ Längenänderungen aufgrund von Temperaturänderungen führen so nicht zu einem Messsignal, wenn sich das Material frei ausdehnen kann oder wenn der Körper überall die gleiche Temperatur besitzt (**selbst-temperaturkompensierende DMS**)



## Weitere Umgebungseinflüsse

- ▶ Umgebungsdruck von Vakuum bis hoher Überdruck möglich
- ▶ Magnetische Flussdichte bis  $2 T$  möglich
- ▶ Bis zu einem gewissen Grad wird auch Kernstrahlung verkräftet



## Querempfindlichkeit und Schwingungen

- ▶ **Querempfindlichkeit:** Kurvenstücke des Messgitters dehnen  
⇒ Verbreiterung der Kurvenstücke verringert Anteil am Gesamtwiderstand
- ▶ Dehnungen können statisch (keine oder nur langsame zeitliche Änderung) und dynamisch (schnelle Änderungen, bzw. Schwingungen) gemessen werden
- ▶ Typisch sind Frequenzen bis 50 kHz bei Schwingungen

## Wheatstonesche Brückenschaltung

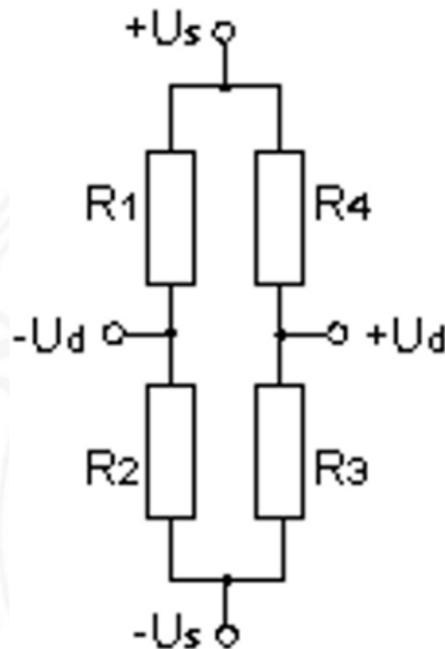
- ▶ typische Längenänderungen im  $\mu m$ -Bereich
  - ⇒ relative Widerstandsänderung im Bereich  $10^{-3} \Omega$
  - ⇒ Messauflösung  $10^{-5} - 10^{-6} \Omega$
  
- ▶ **Hilfe:** Das Ausgangssignal des DMS, eine Widerstandsänderung, wird mit einer *Wheatstoneschen Brückenschaltung* in eine Spannungsmessung umgewandelt

## Wheatstonesche Brückenschaltung (cont.)

$R1 - R4$ : variable Widerstände

$U_s$ : Speisespannung

$U_d$ : Messspannung





## Wheatstonesche Brückenschaltung (cont.)

Änderung der Widerstände:

$$R_i = R + \Delta R_i = R \cdot \left(1 + \frac{\Delta R_i}{R}\right) = R \cdot (1 + r_i)$$

mit

$$r_i = \frac{\Delta R_i}{R}$$

## Wheatstonesche Brückenschaltung (cont.)

- ▶ Mit Hilfe der Ströme in den Strängen lassen sich folgende Beziehungen zeigen:

$$\frac{U_2}{U_s} = \frac{1 + r_2}{2 + r_1 + r_2} \quad \text{und} \quad \frac{U_3}{U_s} = \frac{1 + r_3}{2 + r_3 + r_4}$$

- ▶ Mit  $U_d = U_3 - U_2$  folgt die nichtlineare Gleichung der Wheatstonschen Brückenschaltung:

$$\frac{U_d}{U_s} = -\frac{1 + r_2}{2 + r_1 + r_2} + \frac{1 + r_3}{2 + r_3 + r_4}$$



## Wheatstonesche Brückenschaltung (cont.)

- ▶ Für kleine relative Widerstandsänderungen kann mit der Näherung

$$\frac{1}{1+x} = 1 - x$$

die linearisierte Form der Gleichung für die Wheatstonschen Brückenschaltung hergeleitet werden:

$$\frac{U_d}{U_s} = \frac{1}{4} (r_1 - r_2 + r_3 - r_4)$$

## Messen mit DMS

- ▶ In der Praxis werden die folgenden Grundschaltungen mit DMS in der Wheatstonschen Brücke angewendet:

| Name          | Gleichung   | Anwendung               |
|---------------|---|-------------------------|
| Viertelbrücke | $\frac{U_d}{U_s} = \frac{1}{4} \cdot r_1$               | Zug-/Druckstab, Biegung |
| Halbbrücke    | $\frac{U_d}{U_s} = \frac{1}{4} \cdot (r_1 - r_2)$       | Biegebalken, Torsion    |
| Vollbrücke    | $\frac{U_d}{U_s} = \frac{1}{4} (r_1 - r_2 + r_3 - r_4)$ | Biegung, Torsion        |

- ▶ Die relativen Widerstandsänderungen können über die Grundgleichung der Messung mit DMS durch die Dehnungen in folgender Form ersetzt werden:

$$r_i = k \cdot \epsilon$$

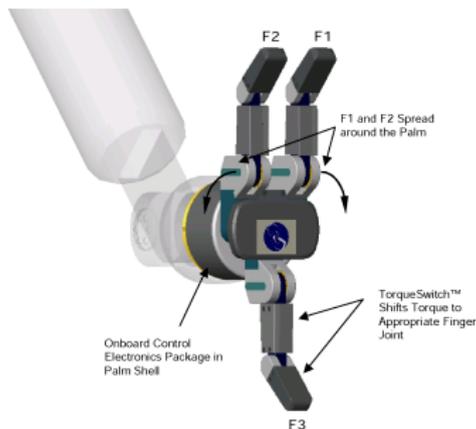
## Anwendung: *BarrettHand*<sup>TM</sup>



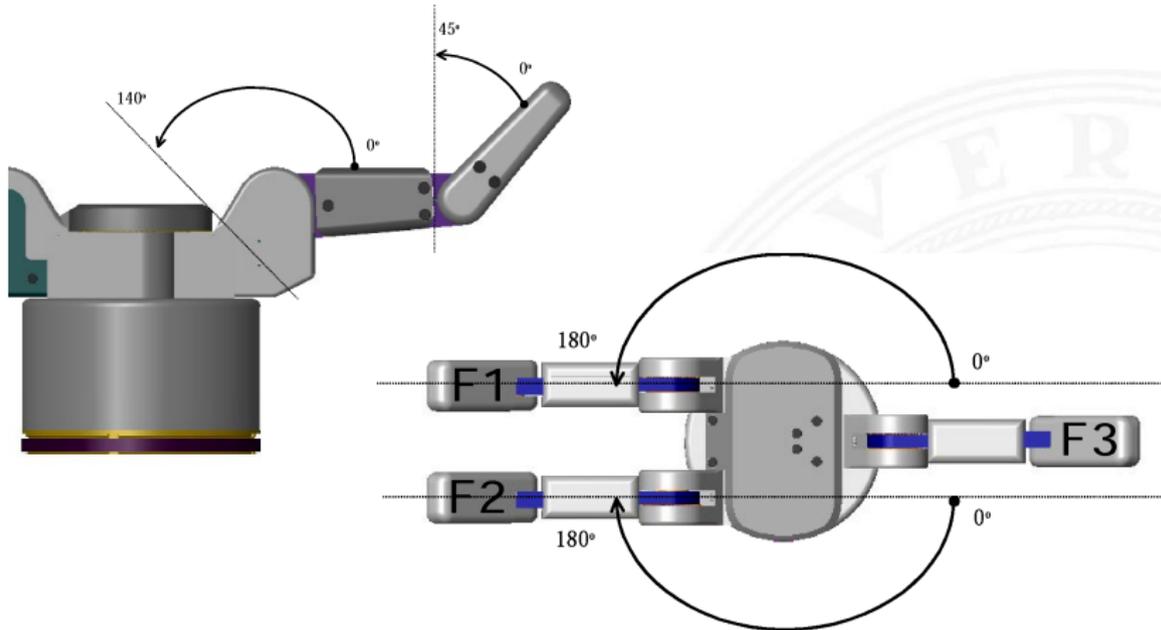
*BarrettHand*<sup>TM</sup> BH8-262

## BarrettHand<sup>TM</sup>: Aufbau

- ▶ Drei Finger: F1, F2, F3
- ▶ F1 und F2 rotieren synchron und symmetrisch um die Handfläche
- ▶ Jeder Finger besitzt zwei Gelenke (durch *TorqueSwitch<sup>TM</sup>* verbunden), die über einen Motor angetrieben werden



# BarrettHand™: Gelenke

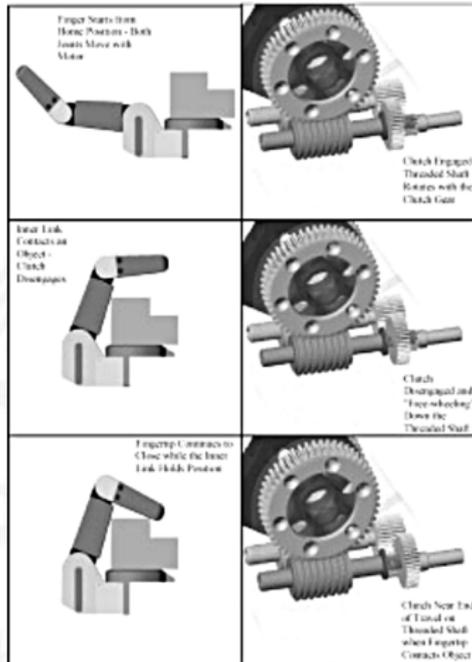
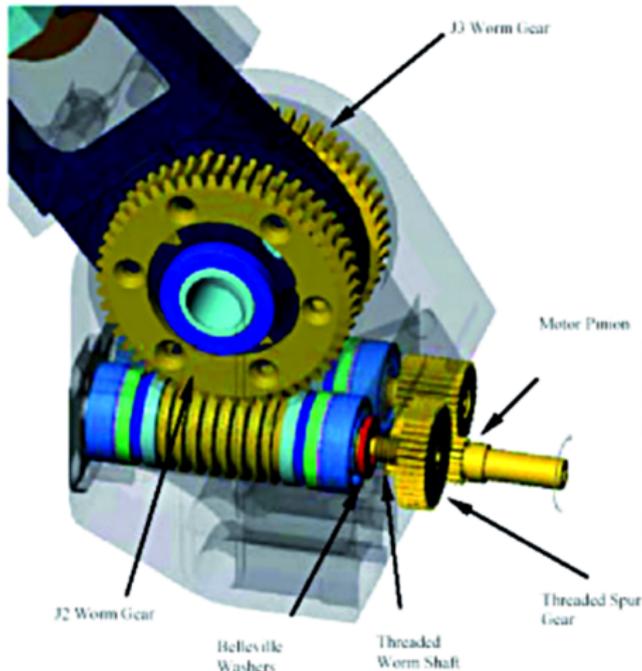




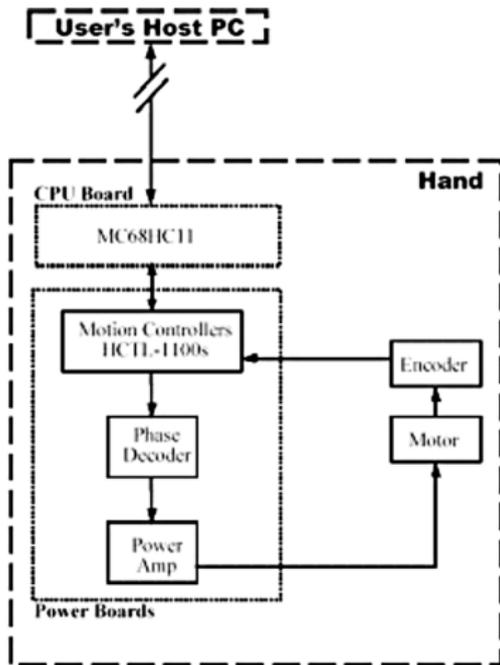
## *BarrettHand™: TorqueSwitch™*

- ▶ Bindung von zwei Gelenken an nur einen Motor  
→ Gewichtsreduzierung
- ▶ Ermöglicht „unabhängige“ Bewegung beider Gelenke
- ▶ Drehmomenteinstellung reguliert die Bewegung

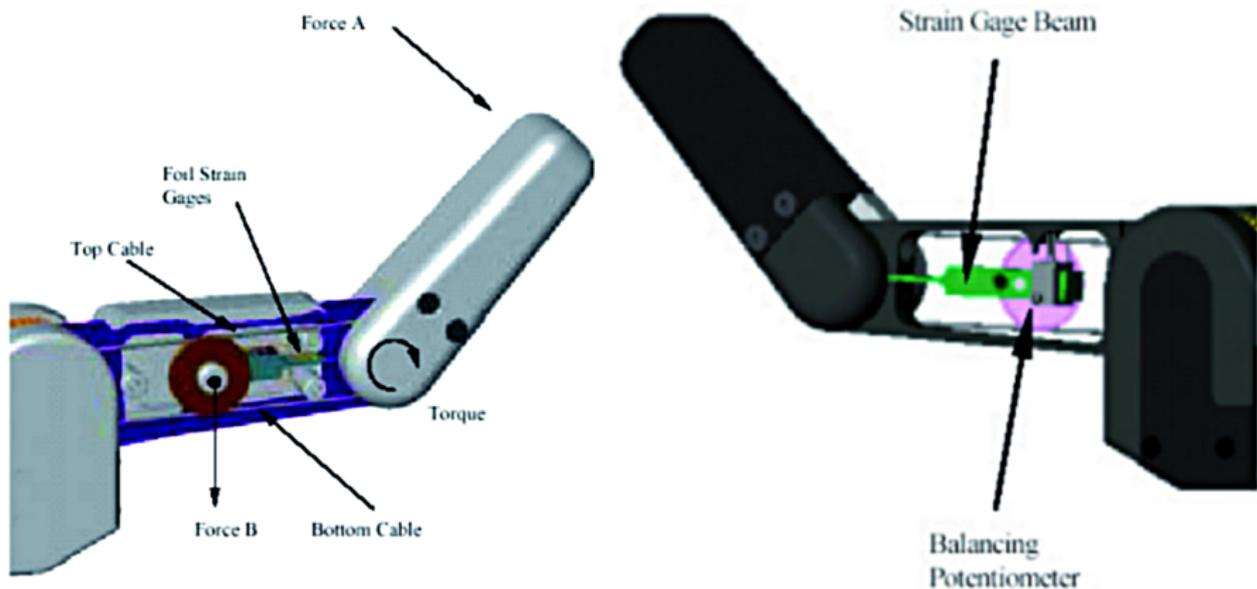
# BarrettHand™: TorqueSwitch™ (cont.)



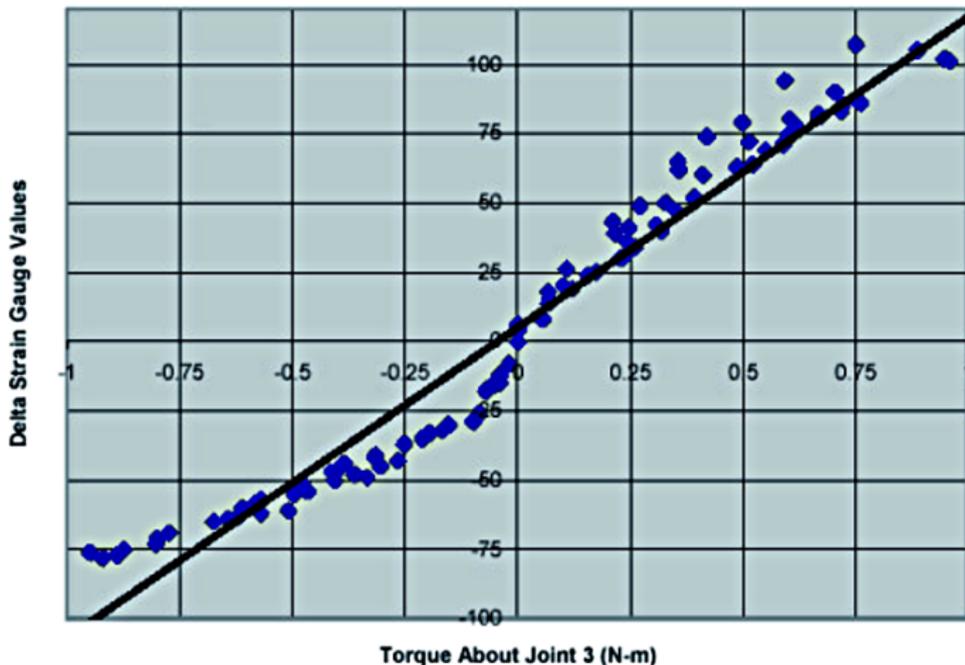
# BarrettHand<sup>TM</sup>: Steuerung



## *BarrettHand*<sup>TM</sup>: Dehnungsmessstreifen



# BarrettHand<sup>TM</sup>: Dehnungsmessstreifen (cont.)



## *BarrettHand*<sup>TM</sup>: Griffe





## Kraft-Moment-Sensoren (KMS)

- ▶ Zumeist starre Konstruktionen die kleine Verformungen erlauben
- ▶ Messung der Verformung mit Dehnungsmessstreifen (DMS)

### Vorteile:

- ▶ in großem Bereich linear
- ▶ starke Dämpfung → schwingt nicht so leicht

### Nachteile:

- ▶ Temperaturdrift

## Kraft-Moment-Sensoren (KMS) (cont.)



Quelle: ATI Industrial Automation



## KMS mit sechs Freiheitsgraden

- ▶ Ein auf ein dehnbares Material applizierter DMS kann die Kraft in eine Richtung messen (siehe: *Hookesches Gesetz*)
  
- ▶ Allgemeine KMS mit sechs Freiheitsgraden:
  - ▶ Eine spezielle Anordnung von DMS
  - ▶ Messen die Kräfte in alle drei Koordinatenrichtungen ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ )
  - ▶ Messen die Drehmomente zu allen drei Koordinatenrichtungen ( $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ )



# Freiheitsgrade

- ▶ engl.: *degrees of freedom* (DOF)
- ▶ Translation in Richtung der x-, y- oder z Achse eines Koordinatensystems (3 DOF)
- ▶ Rotation um y-, x- oder z-Achse eines Koordinatensystems (3 DOF)
- ▶ Beschleunigung in oder um die Koordinatenachsen (6 DOF)  
→ KMS z.B. von der Firma JR<sup>3</sup> (12-DOF-KMS)



## Freiheitsgrade

- ▶ engl.: *degrees of freedom* (DOF)
- ▶ Translation in Richtung der x-, y- oder z Achse eines Koordinatensystems (3 DOF)
- ▶ Rotation um y-, x- oder z-Achse eines Koordinatensystems (3 DOF)
- ▶ Beschleunigung in oder um die Koordinatenachsen (6 DOF)  
 → KMS z.B. von der Firma JR<sup>3</sup> (12-DOF-KMS)



## Freiheitsgrade

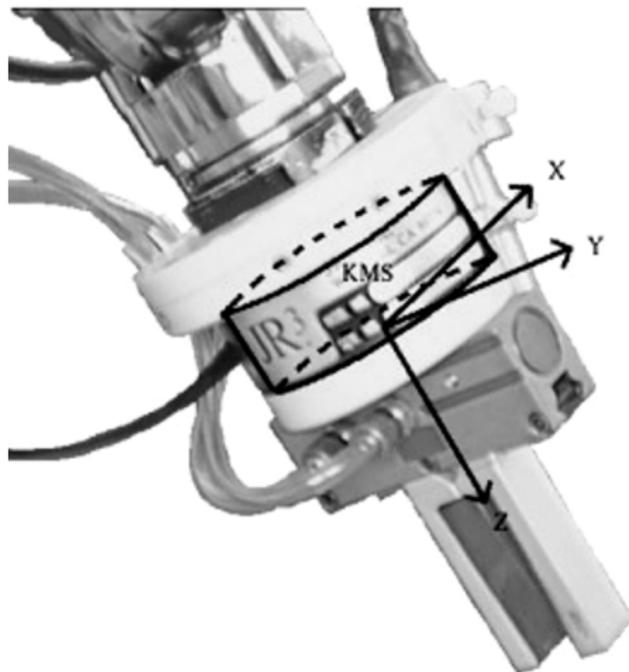
- ▶ engl.: *degrees of freedom* (DOF)
- ▶ Translation in Richtung der x-, y- oder z Achse eines Koordinatensystems (3 DOF)
- ▶ Rotation um y-, x- oder z-Achse eines Koordinatensystems (3 DOF)
- ▶ Beschleunigung in oder um die Koordinatenachsen (6 DOF)  
 → KMS z.B. von der Firma JR<sup>3</sup> (12-DOF-KMS)



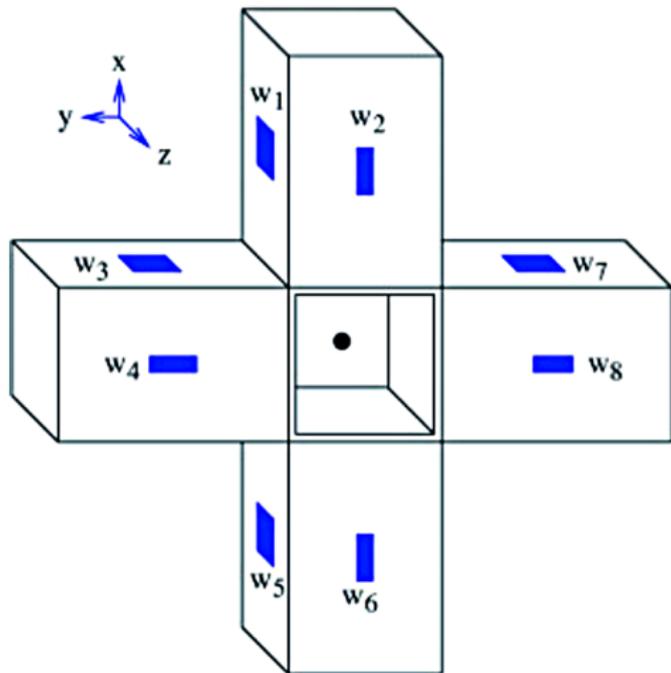
## Freiheitsgrade

- ▶ engl.: *degrees of freedom* (DOF)
- ▶ Translation in Richtung der  $x$ -,  $y$ - oder  $z$  Achse eines Koordinatensystems (3 DOF)
- ▶ Rotation um  $y$ -,  $x$ - oder  $z$ -Achse eines Koordinatensystems (3 DOF)
- ▶ Beschleunigung in oder um die Koordinatenachsen (6 DOF)  
 → KMS z.B. von der Firma JR<sup>3</sup> (12-DOF-KMS)

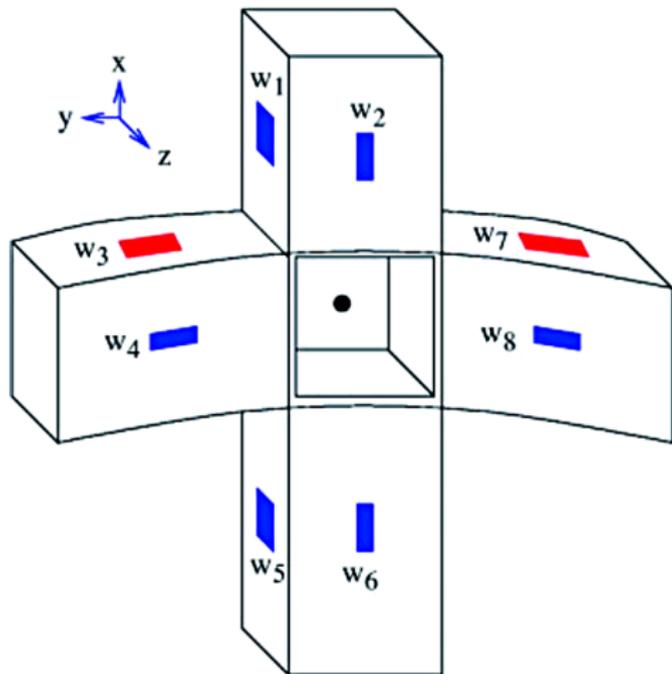
## Einsatz von KMS



# Aufbau von KMS



## Beispiel: Kraft in x-Richtung



## KMS: Signale

Kopplungsfreier Fall, d.h. keine Signale durch Querbelastungen:

| Kraft/Moment | DMS                  |
|--------------|----------------------|
| $F_x$        | $W_3, W_7$           |
| $F_y$        | $W_1, W_5$           |
| $F_z$        | $W_2, W_4, W_6, W_8$ |
| $M_x$        | $W_4, W_8$           |
| $M_y$        | $W_2, W_6$           |
| $M_z$        | $W_1, W_3, W_5, W_7$ |

# Kopplungsmatrix

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = K \cdot \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ W_3 \\ W_4 \\ W_5 \\ W_6 \\ W_7 \\ W_8 \end{bmatrix}$$

## Kopplungsmatrix (cont.)

$$K = \begin{bmatrix} 0 & 0 & k_{12} & 0 & 0 & 0 & k_{17} & 0 \\ k_{21} & 0 & 0 & 0 & k_{25} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{32} & 0 & k_{34} & 0 & k_{36} & 0 & k_{38} \\ 0 & 0 & 0 & k_{44} & 0 & 0 & 0 & k_{48} \\ 0 & k_{52} & 0 & 0 & 0 & k_{56} & 0 & 0 \\ k_{61} & 0 & k_{63} & 0 & k_{65} & 0 & k_{67} & 0 \end{bmatrix}$$



## Kopplungsmatrix (cont.)

- ▶ Zusammenhang zwischen Signalen der DMS und den Kräften/Momenten über die *Kopplungsmatrix*  $K$
- ▶ Vorige Tabelle gilt im kopplungsfreien Fall, in der Realität wirkt sich z.B. eine Kraft in x-Richtung auch auf  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $W_5$  und  $W_6$  aus
- ▶ Reale Kopplungsmatrizen daher komplizierter
- ▶ Meist in der Messhardware (z.B. Interface-Karten) integriert und nicht mehr sichtbar



## KMS-Anwendung in der Robotik

- ▶ Überwachte Bewegungen (engl.: *guarded motions*):
  - ▶ Bewegung herkömmlich (fest) programmiert
  - ▶ Überschreiten eines bestimmten Kraftwertes  
→ Abbruch der Bewegung
- ▶ Nachgiebige Bewegungen (engl.: *compliant motions*):
  - ▶ Manipulator gibt bei einer äußeren Kraft nach
  - ▶ oder: versucht eine bestimmte Kraft aufzubringen
  - ▶ erfordert Regelung (PID-, Fuzzy-, Neuro-Regler, o. ä.)



## KMS-Anwendung in der Robotik

- ▶ Überwachte Bewegungen (engl.: *guarded motions*):
  - ▶ Bewegung herkömmlich (fest) programmiert
  - ▶ Überschreiten eines bestimmten Kraftwertes  
→ Abbruch der Bewegung
- ▶ Nachgiebige Bewegungen (engl.: *compliant motions*):
  - ▶ Manipulator gibt bei einer äußeren Kraft nach
  - ▶ oder: versucht eine bestimmte Kraft aufzubringen
  - ▶ erfordert Regelung (PID-, Fuzzy-, Neuro-Regler, o. ä.)



## KMS-Kalibrierung

Kalibrierung bedeutet im wesentlichen Ermittlung

- ▶ des **Greifereigengewichtes**:  $\vec{f}_g$   
 ⇒ orientierungsabhängiger Off-Set in den **Kräften**
- ▶ des **Greiferschwerpunktes**:  $\vec{p}_{COG}$  (engl.: *center of gravity*)  
 ⇒ orientierungsabhängiger Off-Set in den **Momenten**





## KMS-Kalibrierung (cont.)

Probleme in der Praxis:

- ▶ KMS rauschen  
⇒ Messwerte müssen i. d. Regel gefiltert werden
- ▶ Tragen einer Last erhöht  $\vec{f}_g$  und verschiebt  $\vec{p}_{COG}$   
⇒ Kalibrierung eigentlich nur für den Lastzustand gültig, in dem sie gemacht wurde
- ▶ DMS sind temperaturabhängig  
⇒ Kalibrierung auch temperaturabhängig



## Direkte Kraftregelung

- ▶ Kraftmessung wirkt direkt auf Achsmotoren
- ▶ Bei kommerziellen Robotern nicht einsetzbar  
→ nicht weiter betrachtet





## Hybride Kraftregelung

Kraftmessung wirkt mit Umweg über die Positionsregelung auf die Achsmotoren

### Probleme:

- ▶ Reglermodell berücksichtigt nicht die exakte Situation
- ▶ Einstellen der Parameter für den Positionsregler

**Einfache Lösung:** lineare hybride Regelung über mehrdimensionales Federgesetz

$$\vec{s} = C^{-1} \cdot \vec{F}$$

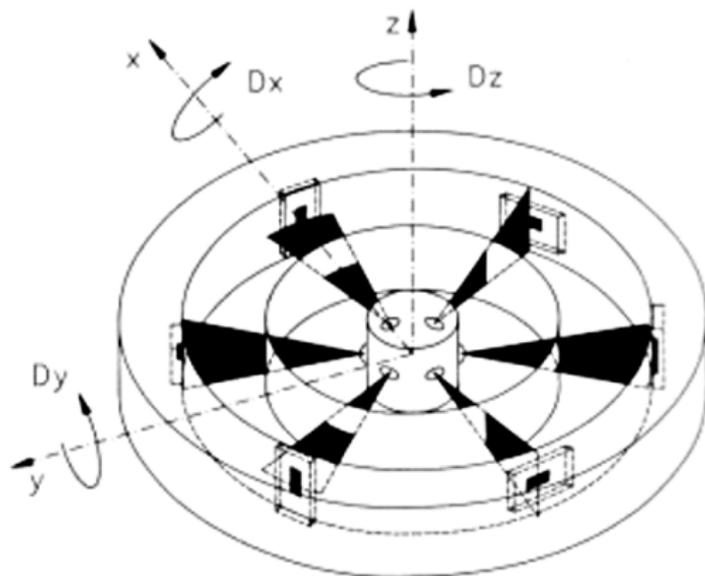


# Spacemouse



Quelle: 3DCONNEXION ([www.spacemouse.com](http://www.spacemouse.com))

## Spacemouse (cont.)



Quelle: DLR ([www.robotic.dlr.de/mmi/sm/](http://www.robotic.dlr.de/mmi/sm/))

## Spacemouse (cont.)

- ▶ Kraft-Moment-Messung
- ▶ flexible Konstruktion
- ▶ optische Abtastung

### **Vorteil:**

- ▶ keine Drift

### **Nachteile:**

- ▶ begrenzt linear
- ▶ kann schwingen
- ▶ Software-Dämpfung





# Taktile Sensoren

- ▶ Besondere Klasse von Kraft- oder Drucksensoren
- ▶ Meistens sehr schmale Sensoren
- ▶ **Beispiel:** Berührungssensoren an Fingerspitzen künstlicher Hände
- ▶ **Andere Anwendungen:** Touch-Screen, Tastaturen, Messung der Belastung der Fußsohle beim Laufen, etc.



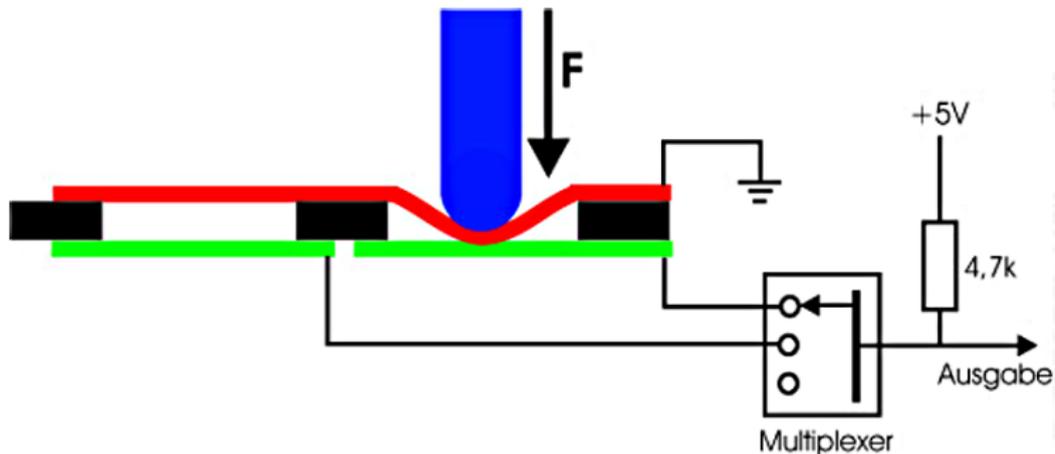
## Taktile Sensoren (cont.)

Verschiedene Herstellungsmethoden:

- ▶ Membran-Schalter
- ▶ Piezoelektrische taktile Sensoren
- ▶ kraftsensitive Widerstände



# Membran-Schalter

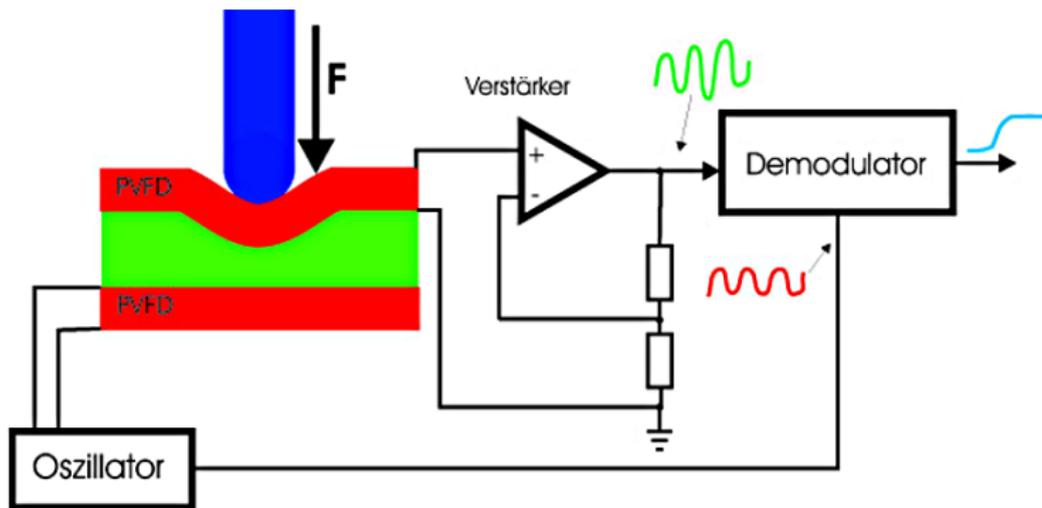




## Piezoelektrische taktile Sensoren

- ▶ Aktive oder passive Sensoren aus PVDF (*polyvinylidene fluoride*)
- ▶ **Beispiel:** aktiver ultraschallgekoppelter Berührungssensor
  - ▶ drei Schichten (obere und untere Schicht aus PVDF)
  - ▶ untere Schicht wird in Schwingung versetzt
  - ▶ mittlere Schicht überträgt Schwingung auf obere Schicht
  - ▶ Ausgangssignal der oberen Schicht wird mit Eingangssignal verglichen
  - ▶ Druck verändert Ausgangssignal

## Piezoelektrische taktile Sensoren (cont.)





## Piezoelektrische taktile Sensoren (cont.)

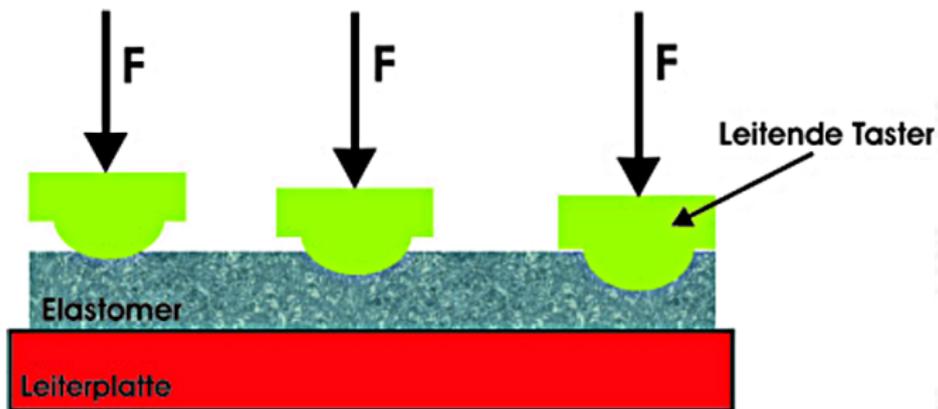
- ▶ Ausgangssignal in begrenztem Bereich linear zur Kraft
- ▶ Bei  $25\ \mu\text{m}$  PVDF-Filmdicke und  $40\ \mu\text{m}$  Gummifilm als zweite Schicht, ist der gesammte Sensor inkl. Schutzschicht schmaler als  $200\ \mu\text{m}$
- ▶ Durch mehrere Zellen können ganze Flächen erfasst werden
- ▶ **Vorteile:**
  - ▶ einfacher Sensoraufbau
  - ▶ ideal zum Messen statischer Kräfte



## Kraftsensitive Widerstände

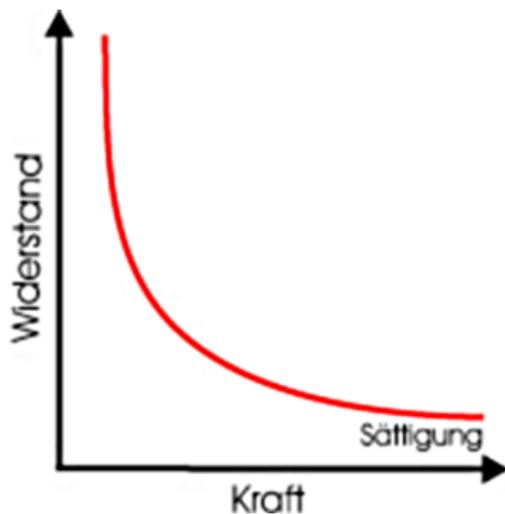
- ▶ Taktile Sensoren können aus einem Material hergestellt werden, das seinen Widerstand abhängig vom aufgebrauchten Druck ändert
- ▶ engl.: *force sensitive resistor* (FSR)
- ▶ Material: leitende Elastomere oder drucksensitive Tinte
- ▶ Leitende Elastomere werden aus Silikon-Gummi oder Polyurethan gefertigt und mit leitenden Partikeln oder Fasern imprägniert
- ▶ **Funktionsweise:**
  - ▶ Verändern der Kontaktfläche zwischen zwei leitenden Platten
  - ▶ Ändern der Schichtdicke

## Kraftsensitive Widerstände (cont.)





## Kraftsensitive Widerstände (cont.)





## Hall-Effekt Sensoren

- ▶ Wenn sich ein Elektron durch ein magnetisches Feld bewegt, so wirkt eine Kraft auf das Elektron

$$F = qvB$$

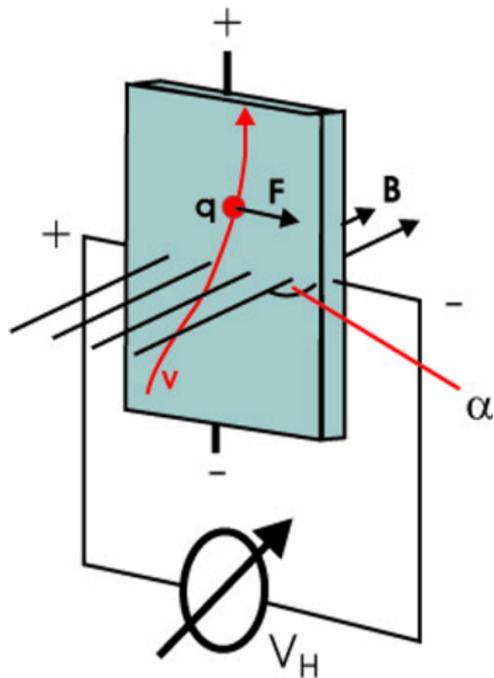
**$q$** : Ladung des Elektrons ( $1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ )

**$v$** : Geschwindigkeit des Elektrons

**$B$** : magnetische Feldstärke

- ▶ Es lassen sich z.B. Kompass-Sensoren realisieren

# Hall Effekt





- [Fra04] Kap. 3.8, 8.6 and 9 In: Jacob Fraden:  
*Handbook of modern sensors: physics, design, and applications.*  
3.  
Springer-Verlag New York, Inc., 2004,  
S. 82–85, 313–319 u. 323–337
- [McK93] Kap. 10.5.3, 10.5.4, 10.6.1 and 10.7 In: Phillip John  
McKerrow:  
*Introduction to Robotics.*  
corrected.  
Addison-Wesley, 1993  
(Electronic Systems Engineering Series),  
S. 567–580 and 595–596