

## Vorlesung: Angewandte Sensorik

Prof. J. Zhang

zhang@informatik.uni-hamburg.de

Universität Hamburg

Fachbereich Informatik

AB Technische Aspekte Multimodaler Systeme

18. November 2005

Prof. J. Zhang  
zhang@informatik.uni-hamburg.de

18. November 2005

Prof. J. Zhang  
Vorlesung: Angewandte Sensorik

Seite 118  
18. November 2005

## Inhaltsverzeichnis

Tachometer . . . . .	. 118
Gyroskope (Kreisel) . . . . .	. 119
Dehnungsmessstreifen (DMS) . . . . .	. 128
Anwendung: Dehnungsmessstreifen . . . . .	. 155

Prof. J. Zhang  
zhang@informatik.uni-hamburg.de

18. November 2005

Prof. J. Zhang  
Vorlesung: Angewandte Sensorik

Seite 119  
18. November 2005

## Tachometer

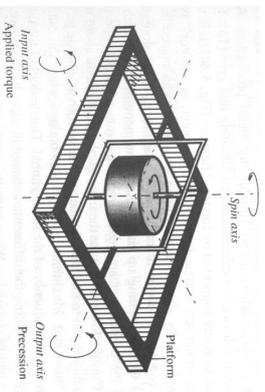
- Tachometer ↔ Geschwindigkeitsmesser
- Genaue Tachometer mit Hilfe von Inkrementalgebern oder Resolvern.
- Gemessene Winkeländerung wird durch vergangene Zeit geteilt.
- Günstigere Alternativen zählen Umdrehungen eines Rades (z.B. Fahrradcomputer)

## Gyroskope (Kreisel)

- Ein Gyroskop ist eine Art Richtungsgeber (kurz: Gyro).
- Alternative zu magnetischem Kompass.
- Der am häufigsten verwendete Sensor in der Navigation.
- Anwendung vor allem im Weltraum (Kontrolle der Position und Orientierung von Satelliten oder Raumstationen).
- Drei Typen von Gyroskopen:
  - ◆ mechanisch
  - ◆ MicroMachine (Monolithic Silicon)
  - ◆ optisch

## Mechanisches Gyroskope (1)

- Massive Scheibe rotiert um eine Drehachse.
- Drehachse befindet sich in einem Rahmen.
- Dieser kann um ein (oder zwei) Achsen rotieren.



Prof. J. Zhang  
Vorlesung: Angewandte Sensorik

Seite 120  
18. November 2005

## Mechanisches Gyroscope

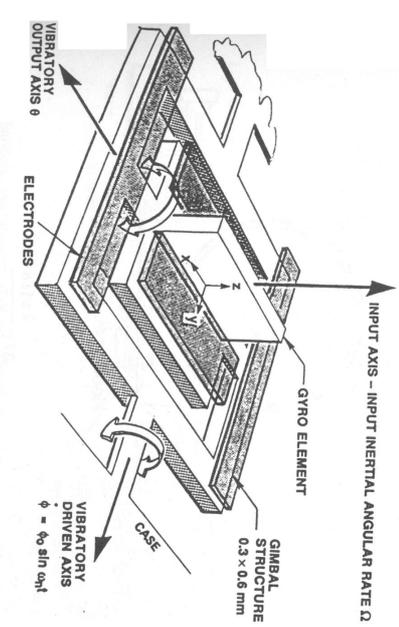
Zwei Eigenschaften:

1. Drehachse eines Gyroskopes bleibt fix mit Bezug auf ein globales Koordinatensystem.
2. Ein Gyroskope liefert ein Drehmoment proportional zur Winkelgeschwindigkeit einer Rotation um eine Achse senkrecht zur Drehachse (Grund: Präzision).

Prof. J. Zhang  
Vorlesung: Angewandte Sensorik

Seite 121  
18. November 2005

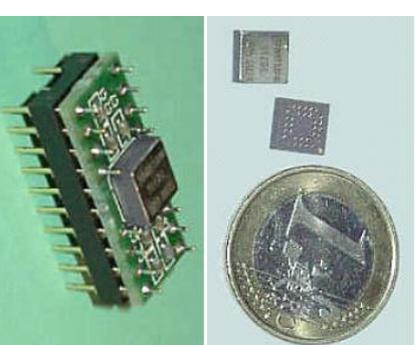
## Monolithic Silicon Gyroscope



Prof. J. Zhang  
Vorlesung: Angewandte Sensorik

Seite 122  
18. November 2005

## Gyroskope Bausteine



Prof. J. Zhang  
Vorlesung: Angewandte Sensorik

Seite 123  
18. November 2005

## Optisches Gyroskope (1)

- Zwei gegenläufige Lichtstrahlen werden von einem Sender/Empfänger in einen Faser-Ring ausgestrahlt.
- Laufzeit einer Umdrehung:

$$\Delta t = \frac{2\pi R}{nc}$$

- $n$ : Brechungskoeffizient  
 $c$ : Lichtgeschwindigkeit

## Optisches Gyroskope (3)

Wenn der Ring mit der Winkelgeschwindigkeit  $\Omega$  rotiert, gilt (Sagnac Effekt):

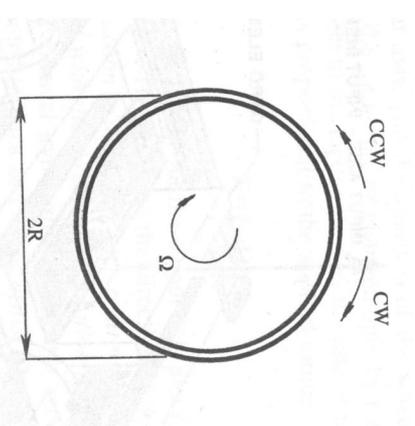
$$l_{cw} = 2\pi R + \Omega R \Delta t$$

$$l_{ccw} = 2\pi R - \Omega R \Delta t$$

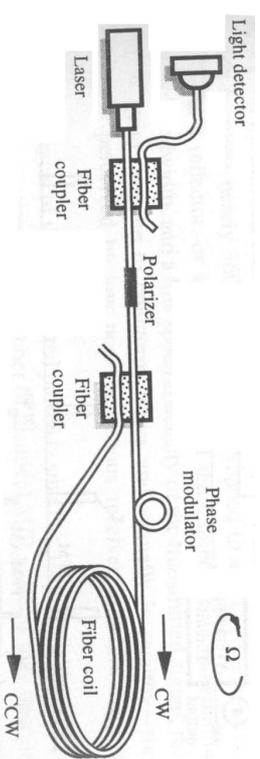
Daraus folgt:

$$\Delta l = \frac{4\pi \Omega R^2}{nc}$$

## Optisches Gyroskope (4)



## Optisches Gyroskope (5)



## Dehnungsmessstreifen (DMS)

- 1938 erfand der Amerikaner A. C. Ruge den *Dehnungsmessstreifen (DMS)*.
- Dehnungsmessstreifen sind auf einer Trägermaterial aufgetragte 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 (1)

- 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 ist von *William Thomson* im Jahre 1856 unter Verwendung der *Wheatstonesche Brückenschaltung* (Charles Wheatstone 1843).

## Physikalischer Hintergrund (2)

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

## Physikalischer Hintergrund (3)

- 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 (4)

- 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 (1)

Widerstand  $R$  eines Drahtes:

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

$l$ : Länge des Drahtes

$p$ : spezifischer Widerstand

$d$ : Durchmesser

$A = \pi d^2 / 4$ : Querschnittsfläche

## Widerstandsänderung (2)

- 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 (3)

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 (4)

- 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:

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

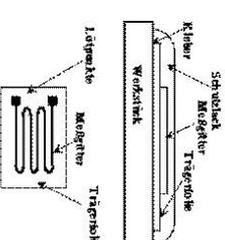
## Dehnungsmessstreifen in der Praxis

In der Praxis verwendete Dehnungsmessstreifen (DMS):

- **Folien-DMS:** bestehen aus Trägermaterial (z.B. Polyamid) und den eigentlichen Messstreifen (z.B. aus Konstantan)
- **Halbleiter-DMS:** Messstege aus Halbleitermaterial, hochempfindlich, überlegend 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 (1)

- *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 speziellen Kleber auf ein Werkstück aufgebracht (appliziert).



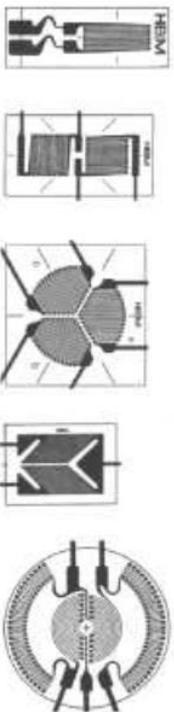
## Folien-DMS (2)

- 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.



## Beispiel-Messstreifen

Beispiele für Folien-DMS:



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

## Folien-DMS (3)

- typische Nennwiderstände: 120  $\Omega$ , 300  $\Omega$ , 350  $\Omega$  oder 600  $\Omega$
- Toleranzen der Widerstandswerte  $< \pm 0,5\%$
- Betriebsspannungen: 1 V – 10 V
- Änderungen der Länge des DMS bis zu  $\pm 3\%$
- elastische 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 (4)

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 (1)

- Gibt an, um welchen Faktor die relative Widerstandsänderung über der relativen Längenänderung liegt.
- Hoher k-Wert  
⇒ 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 (2)

- **Bekannt:** relative Widerstandsänderung  $\Delta R/R$
- Daraus folgt das Verhältnis Widerstands- zu Längenänderung:

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

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

- Es folgt:

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

## 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.

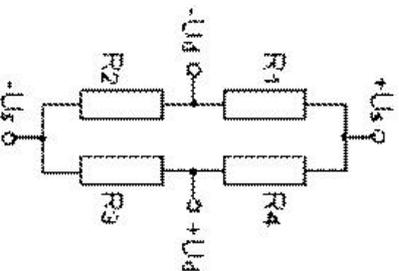
## Querempfindlichkeit und Schwingungen

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

## Wheatstonesche Brückenschaltung (1)

- 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 (2)



## Wheatstonesche Brückenschaltung (3)

$R1 - R4$ : variable Widerstände  
 $U_s$ : Speisespannung  
 $U_d$ : Messspannung

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 (4)

- 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 Wheatstoneschen Brückenschaltung:

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

## Wheatstonsche Brückenschaltung (5)

Für kleine relative Widerstandsänderungen kann mit der Näherung

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

die lineare 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 (2)

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

$$r_i = k \cdot \epsilon$$

## Messen mit DMS (1)

In der Praxis werden die in der folgenden Tabelle stehenden 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

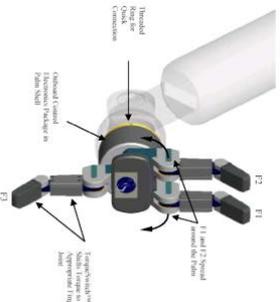
## Anwendung: Dehnungsmessstreifen



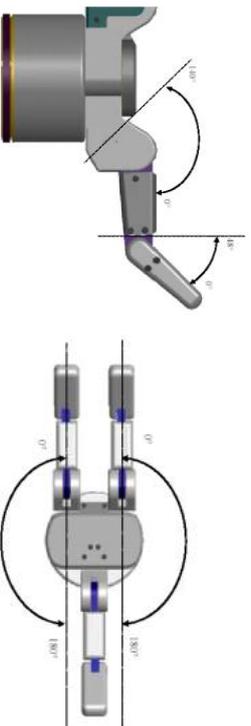
BarrettHand<sup>TM</sup> BH8-262

## BarrettHand™ : Aufbau

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



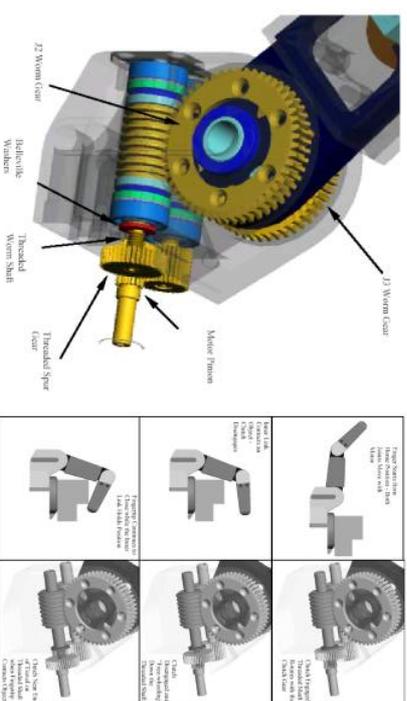
## BarrettHand™ : Gelenke



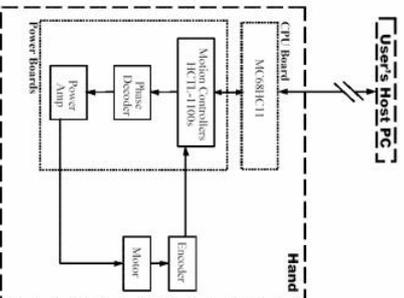
## BarrettHand™ : TorqueSwitch™ (1)

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

## BarrettHand™ : TorqueSwitch™ (2)



## BarrettHand™ : Steuerung



Prof. J. Zhang  
Vorlesung: Angewandte Sensorik

Seite 160  
18. November 2005

## BarrettHand™ : Dehnungsmessstreifen

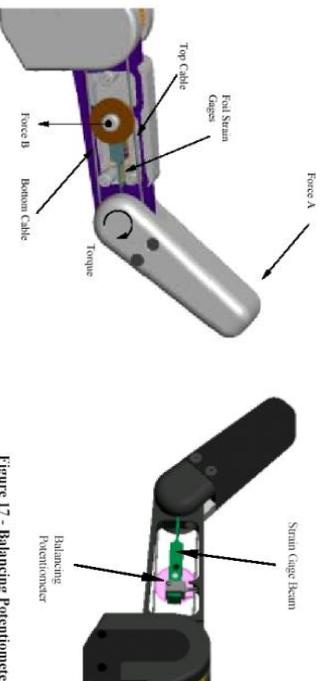
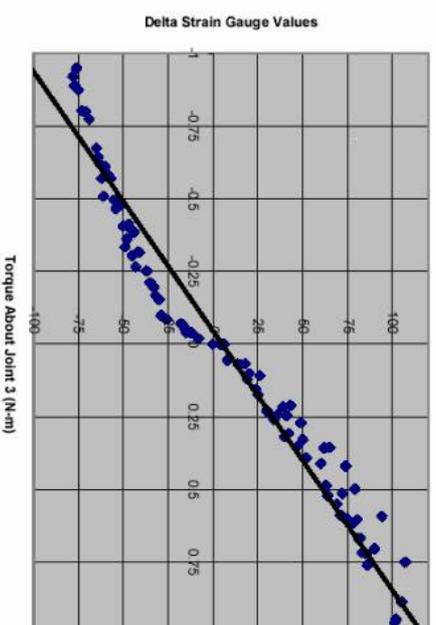


Figure 17 - Balancing Potentiometer

Prof. J. Zhang  
Vorlesung: Angewandte Sensorik

Seite 161  
18. November 2005



Prof. J. Zhang  
Vorlesung: Angewandte Sensorik

Seite 162  
18. November 2005

## BarrettHand™ : Griffe



Prof. J. Zhang  
Vorlesung: Angewandte Sensorik

Seite 163  
18. November 2005

## Literatur

- [1] FRADEN, JACOB: *Handbook of modern sensors: physics, design, and applications*. Kapitel 5.9 u. 8.1, Seiten 271–275 u. 324–325. Springer-Verlag New York, Inc., 2. Auflage, 1996.
- [2] MCKERROW, PHILLIP JOHN: *Introduction to Robotics*, Kapitel 10.5.4 u. 10.7, Seiten 567–569 u. 595–596. Electronic Systems Engineering Series. Addison-Wesley, korrigierte Auflage, 1993.