



FACHHOCHSCHUL - BACHELORSTUDIENGANG
Automatisierte Anlagen

Taktile Sensoren für Robotergreifer

als Bachelorarbeit eingereicht

zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Science in Engineering

von

SCHINNERL Wolfgang

März 2011

Betreuung der Bachelorarbeit durch

Prof. (FH) DI Walter Rokitansky



Campus **Wels**

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt, die den benutzten Quellen entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe und dass die Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

.....
Schinnerl Wolfgang

.....
Wels, 14.04.2011

Kurzfassung

Diese Arbeit gibt einen Einblick in die Thematik von taktilen Sensoren. Neben der Definition und der Beschreibung der Anforderungen werden die sensorischen Grundlagen und deren Einsatz in der Entwicklung von taktilen Sensoren erläutert. Die angesprochenen Grundlagen basieren auf nicht optischen und optischen Messprinzipien, wobei nicht optische Messprinzipien durch die Kraftmessung realisiert werden.

Um korrekte Ergebnisse aus Messungen zu erhalten, müssen Stör- und Einflussgrößen bei der Auswertung berücksichtigt bzw. korrigiert werden. Diese Einflussgrößen werden im Abschnitt 2.1.1.1 aufgelistet.

Es wird auch das Problem der taktilen Inversion bei elastischen Sensormaterialien beleuchtet. Weiters wird neben den Methoden der taktilen Sensordatenauswertung auch der Stand der Technik betrachtet. Eine Auflistung der Einsatzgebiete zeigt das breite Anwendungsfeld taktiler Sensoren und lässt das große Potential dieser Sensoren erahnen. Als Beispiel werden zwei ausgewählte taktile Sensorsysteme beschrieben. Zum einen das *Sensorsystem WRT 101* von Weiss Robotics GmbH & Co. KG, dass bei der SDH-2-Hand von Schunk eingesetzt wird und zum anderen das System *Robo Touch* von PPS Inc.

Überlegungen und auch Probleme bei der Implementierung eines taktilen Sensors werden unter Kapitel 6 aufgezeigt.

Abstract

This thesis delivers insight into the thematic of tactile sensors. Among the definition and the requirements of tactile sensors, the fundamentals of sensors and their use in the area of tactile sensing are described to understand the different developments of tactile sensors. The fundamentals are based on non optical and optical measurement principles, wherein the force measurement is the basis for non optical measurement principles.

To get correct results out of measurements, it is necessary to adjust the disturbance- and influence values at the analysis. The influence values are listed in subchapter 2.1.1.1.

The problem of the tactile inversion when using elastical sensor material are also illustrated. Furthermore the methods of analysing tactile sensing data are described along side the state of the art. The various applications of tactile sensors are shown by a list of current application areas which points out the big potentials in this field of sensors. Two existing tactile sensor systems are described to give an idea about tactile sensing. On the one hand the sensor system WRT 101 from Weiss Robotics GmbH & Co. KG and on the other hand the Robo Touch system of PPS Inc. are considered.

Moreover ideas and problems of developing a tactile sensor are shown in chapter 6.

Danksagung

Diese Bachelorarbeit entstand an der Fachhochschule Oberösterreich am Campus Wels. Ich möchte mich bei Herrn Prof. (FH) DI Walter Rokitansky sehr herzlich für die Betreuung der Bachelorarbeit bedanken. Besonderen Dank gilt auch DI (FH) Raimund Edlinger und Ing. Michael Zauner BSc, die mir unermüdlich mit Rat und Tat zur Seite standen. Natürlich möchte ich auch meiner Familie und vor allem meiner Freundin Martina für die Unterstützung und Ihr Verständnis während der Bachelor-Studienzeit sehr herzlich danken.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Allgemein	1
1.1.1	Definition taktil und taktile Sensoren	1
1.1.2	Abgrenzung des Themenbereichs	2
1.2	Anforderungen an taktile Sensoren	2
2	Grundlagen der Sensorik	3
2.1	Kraftsensoren	3
2.1.1	Grundlagen der Kraftmessung	3
2.1.1.1	Einflussfaktoren	3
2.1.1.2	Messprinzipien [TO98]	4
2.1.2	Messung der relativen Verformung	4
2.1.2.1	Grundlagen der DMS-Messtechnik	4
2.1.2.2	Piezoresistives Messprinzip	5
2.1.2.3	Taktilen Sensoren, die den resistiven Effekt verwenden	5
2.1.3	Messung der spannungsbedingten Ladungsänderung an Quarzkristallen (Piezoelektrischer Effekt)	7
2.1.3.1	Taktilen Sensoren, die den piezoelektrischen Effekt verwenden	8
2.1.4	Messung der spannungsbedingten Permeabilitätsänderung (Magnetoelastischer Effekt) [TO98]	9
2.1.5	Messung der Druckänderung eines Fluids	10
2.1.6	Messung der Kraft mittels Hall-Effekt[TO98]	10
2.1.6.1	Verwendung des Hall-Effekts bei taktilen Sensoren	11
2.1.7	Messung der Kraft mittels Kapazitätsänderung [TO98]	11
2.1.7.1	Verwendung Kapazitätsänderung bei taktilen Arrays	12

2.2	Spannungs-optische Kraftmessung	12
2.2.1	Intrinsisches Messprinzip am Beispiel eines taktilen Sensors	13
2.2.2	Extrinsisches Messprinzip am Beispiel eines taktilen Sensors	13
2.3	Problem der taktilen Inversion	13
3	Verarbeitung von taktilen Sensordaten	15
4	Stand der Technik	16
4.1	Sensortechnologie	16
4.2	Materialien	16
4.3	Anwendungsbereiche	16
5	Taktile Sensoren für Robotergreifer	18
6	Implementierung eines taktilen Sensors	20
6.1	Ursprüngliche Implementierungsvariante	20
6.2	Aktuelle Implementierungsvariante	21
7	Ausblick	22

Kapitel 1

Einführung

1.1 Allgemein

Seit jeher ist der Mensch bemüht, technische Systeme zu entwickeln, die so wie er selbst, mit einer für technische Systeme nicht bekannten Umgebung interagieren können. Dazu ist es notwendig Informationen aus dieser „unbekannten“ Umgebung zu erfassen und diese richtig zu interpretieren.

Es gibt zwei Kategorien (siehe Abb. 1.1) um die angesprochenen Informationen der Umgebung technisch zu erfassen. Zum einen gibt es die berührungslosen Systeme (z.B. Vision- und Ultraschallsysteme) und zum anderen die berührungsbasierenden Systeme (z.B. Kraftsensoren). Der Vorteil von berührungsbasierenden Systemen ist, dass eine genaue Aussage über das Objekt, dass berührt wird, getroffen werden kann. Das bedeutet es können z.B. Informationen über die Oberflächenstruktur, Temperatur, Objektgeometrie, usw. gewonnen werden. Solche Informationen sind bei berührungslosen Systemen entweder gar nicht oder sehr schwer zu erfassen. [Mel01]

Abhängig von der gewünschten Information und deren Interpretationsbreite muss ein dementsprechender Aufwand bzgl. Sensorik und Auswertung betrieben werden.

1.1.1 Definition taktil und taktile Sensoren

Um den Begriff taktil zu beschreiben, wird kurz auf die Biologie des menschlichen Tastsinns eingegangen.

„Taktile bezeichnet die mechanische Interaktion mit der Haut. Taktile Wahrnehmung ist also die Wahrnehmung von ausschließlich mechanischer Interaktion.“ [KMM⁺09] Mechanische Interaktionen sind Interaktionen, aus denen sich eine Spannungs- bzw. Dehnungsänderungen z.B. der Haut ergeben.

Taktile Sensoren realisieren somit die technische Umsetzung des menschlichen Tastsinns. [Mel01] Dabei gibt es die Unterscheidung von intrinsischen- und extrinsischen taktilen Sensoren. Extrinsische taktile Sensoren sind solche, die an oder in der Nähe der Kontaktfläche angebracht sind. Im Gegensatz dazu sind intrinsische Sensoren solche, die die Kontaktdaten über eine in der Mechanik eingebauten Sensorik aufnehmen. D.h. die Sensoren sind nicht unmittelbar an der Kontaktfläche angebracht (z.B. Drehmomentensensor an einem Robotergelenk). [LN99]

Bei der technischen Umsetzung von extrinsischen, taktilen Sensoren werden kleine taktile Elemente, sogenannte *taxles*, in Matrixform über eine Fläche angeordnet, um beispielsweise die positionsbezogene Kraft auswerten zu können.[Mel01]

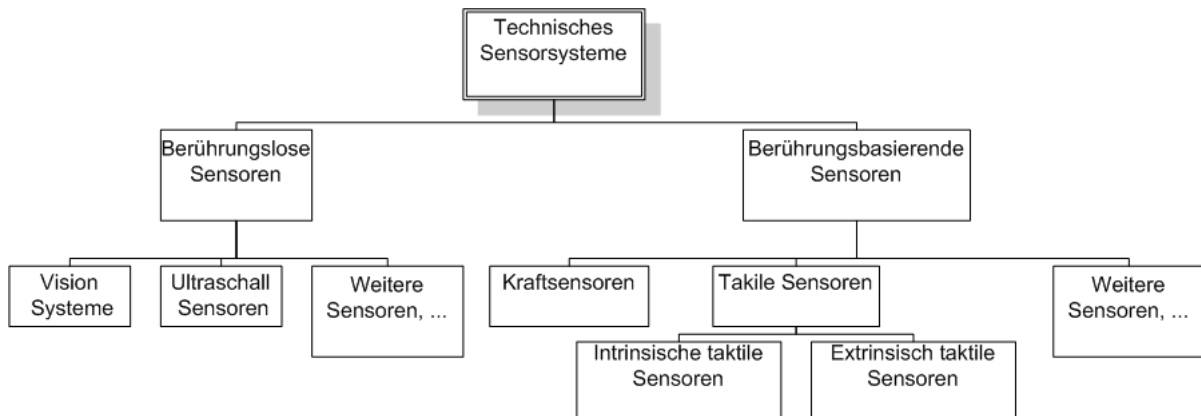


Abbildung 1.1: Einordnung der taktilen Sensoren in die Sensorhierarchie

1.1.2 Abgrenzung des Themenbereichs

In dieser Arbeit wird die technische Umsetzung von berührungsbasierenden, extrinsischen taktilen Sensoren beleuchtet, die in der Robotik bzw. bei Robotergreifer eingesetzt werden.

1.2 Anforderungen an taktile Sensoren

Je nach Anwendung ergeben sich für taktile Sensoren unterschiedliche Anforderungen. In der folgenden Liste werden die am häufigsten gestellten Anforderungen aufgelistet [Mel01]:

- Anwesenheitsdetektion
- Detektion der Größe und Form von Objekten
- Detektion von Kraft und Drehmoment
- Ermittlung des Reibungskoeffizienten
- Ermittlung der Oberflächenrauheit
- Bewegungsdetektion (Detektion des Übergangs zwischen haften und gleiten)

Eine detaillierte Beschreibung der taktilen Sensortypen und deren physikalischen Grundlagen wird im Kapitel 2 gegeben.

Kapitel 2

Grundlagen der Sensorik

Im Folgenden werden die für die Beschreibung der unterschiedlichen taktilen Sensorarten notwendigen sensorischen Grundlagen erläutert.

2.1 Kraftsensoren

Kraftsensoren werden in der Robotik oftmals in den Gelenken verwendet, wo vor allem das Drehmoment aufgenommen wird. Grundsätzlich werden Kraft-/Momentenaufnehmer herangezogen, um die eingeleitete mechanische Spannung eines Körpers zu messen. [Mel01]

Aus Kraftsensoren resultiert der Betrag der wirkenden Kraft, wobei die Verteilung und Richtung der Kraft nicht berücksichtigt wird. [Mar04]

2.1.1 Grundlagen der Kraftmessung

„Die Kraft ist im physikalischen Sinne ein Vektor, der an einem Punkt angreift. Bei der Kraftmessung ist der Vektor in eine skalare Größe überzuführen.“ [TO98]

2.1.1.1 Einflussfaktoren

Bei der Kraftmessung wirken eine Reihe von Stör- und Einflussgrößen, die nicht näher erläutert werden. [TO98]

Der folgende Auszug der Stör- und Einflussgrößen bestimmt auch die Genauigkeit der Kraftmesssysteme:

- Temperatur
- Luftfeuchtigkeit
- elektromagnetische Felder
- Linearitätsfehler

- Hysterese
- Kriechen (zeitabhängige Veränderung des Aufnehmersignals bei unveränderter Last)
- Parasitäre Belastung (Kraftaufnehmer für eine Belastungsart, erfährt eine zur definierten Belastungsart verschiedene Belastung)

2.1.1.2 Messprinzipien [TO98]

Bei der Kraftmessung wird nicht die Kraft direkt, sondern die Kraft auf ein System gemessen. Kraft bewirkt in einem Körper oder System eine Spannung oder Verformung, die in ein elektrisches Signal umgewandelt wird.

Ausgewählte Varianten der Kraftmessung sind:

- Messung der direkten Verformung durch z.B. induktive Messprinzipien
- Messung der relativen Verformung durch das DMS- bzw. piezoresistive Prinzip
- Messung spannungsbedingter Ladungsänderung an Quarzkristallen durch das piezoelektrische Prinzip
- Messung spannungsbedingter Permeabilitätsänderung durch das magnetoelastische Prinzip
- Messung der Druckänderung eines Fluids
- Messung der Kraft mittels Hall-Effekt
- Messung der Kraft mittels Kapazitätsänderung
- Spannungs-optische Kraftmessung

Es werden nachfolgend all jene Messprinzipien näher erläutert, die für die Beschreibung der taktilen Sensoren notwendig sind.

2.1.2 Messung der relativen Verformung

Die Kraftmessung über relativer Verformung kann entweder durch Dehnmessstreifen (DMS) oder über das piezoresistive Messprinzip durchgeführt werden.

2.1.2.1 Grundlagen der DMS-Messtechnik

Dehnmessstreifen werden zur Messung von Kräften, Drehmomenten, Drücken, kleinen Wegen und Beschleunigungen eingesetzt. [TO98] „*Unter Dehnungen versteht man in der Messtechnik kleine Längenänderungen, die infolge von Erwärmung bzw. Kraftänderung an festen Körpern auftreten.*“ [Par10] Wird nun die Temperatur konstant gehalten, so kann die Kraft als proportionale Widerstandsänderung gemessen werden.

Aus dem totalen Differential der Grundformel des elektrischen Widerstands:

$$R = \delta * \frac{l}{A} \quad (2.1)$$

ergibt sich:

$$\frac{\Delta R}{R} = \varepsilon * k \quad (2.2)$$

Symbol	Beschreibung	Einheit
R	Widerstand	[Ω]
δ	spezifischer Widerstand	[Ω]
ΔR	Widerstandsänderung	[Ω]
l	Länge des Leiters	[m]
ε	Dehnung	[m]
A	Querschnittsfläche des Leiters	[m ²]
k	k-Faktor (abhängig vom Material)	[N/m ²]
E	Elastizitätsmodul	[N/m ²]

Tabelle 2.1: Variablendefinition für (2.1) und (2.2)

Der k-Faktor oder Materialkonstante k beschreibt das Produkt Elastizitätsmodul E und dem piezoresistiven Koeffizienten π_p .

$$k = E * \pi_p \quad (2.3)$$

Bei Metallen basiert die Widerstandsänderung hauptsächlich auf der Geometrieänderung (Geometrie-Effekt) des Leiters, wobei der k-Faktor einen Wert von $\sim 2 \frac{m^2}{N}$ besitzt.[VZ06]

2.1.2.2 Piezoresistives Messprinzip

Bei Halbleiterelementen gibt es neben der widerstandsabhängigen Geometrieänderung auch die widerstandsabhängige Änderung der Bandstruktur. Der piezoresistive Koeffizient ist bei Halbleiterelementen, anders als bei Metallen, sehr viel höher (bei Si: k-Faktor = $140 \frac{m^2}{N}$)[VZ06]. Das wird durch den piezoresistiven Effekt erklärt. Dieser besagt, dass durch mechanische Spannung die Besetzungswahrscheinlichkeit der Bänder (Leitungsband, Valenzband) und die Ladungsträgerbeweglichkeit verändert wird, was in der Änderung des spezifischen Widerstands resultiert[?].

2.1.2.3 Taktile Sensoren, die den resistiven Effekt verwenden

Der Aufbau taktiler Sensoren, die den resistiven Effekt nutzen, kann sich je nach Hersteller unterscheiden. Im Folgenden werden ausgewählte Aufbauarten erläutert.

Leitfähige Elastomere [Mar04] „Leitfähige Elastomere wie z.B. mit Graphit versetztes Silikon ergeben zusammen mit einer isolierenden Abstandshalterschicht und einer Leiterplatte einen Aufbau zur Messung des auf eine Fläche wirkenden Drucks.“ [Mar04] Ist der Sensor nicht belastet, besteht keine Verbindung zwischen dem leitfähigem Silikongummi und der Leiterplatte (siehe Abb. 2.1). Erhöht sich der auf den Sensor wirkende Druck, so vergrößert sich die Kontaktfläche zwischen Silikongummi und Leiterplatte und der Widerstand sinkt.

Nachteile:

- Hystereseverhalten
- geringe mechanische Belastbarkeit des Elastomers



Abbildung 2.1: Aufbau taktile Sensoren mit leitfähigem Elastomer [Mar04]

Kraftabhängige Widerstände [Mar04] Eine weitere Möglichkeit der Kraftmessung ist Widerstandsmessung über FSR-Sensoren (force sensing resistor). Der piezoresistive Sensor ist aus drei beschichteten Folienlagen aufgebaut. Die erste Schicht besteht aus einer kammartig ineinandergreifenden Leiterstruktur, die über einen Abstandhalter (Schicht zwei) von der Trägerfolie (Schicht drei) getrennt ist (siehe Abb. 2.2). Auf der Trägerfolie ist die schwarze FSR-Schicht (halbleitendes Polymer) aufgedruckt.

Der FSR-Sensor ändert seinen Widerstand durch einleiten einer Kraft auf die aktive Oberfläche (Schicht eins). Berühren die kammartigen Elektroden die FSR-Schicht, so werden Widerstandsbrücken geschlossen. Werden die auf den Sensor wirkenden Kräfte größer, so werden immer mehr Widerstandsbrücken parallel geschaltet, die eine Verringerung des Widerstands an den Anschlussstellen bewirken.¹

Nachteil:

- geringe Genauigkeit der FSR-Sensoren

¹Vgl.: http://www.electrade.com/html/produkte/sensorik_fsr.htm (04.01.2011)

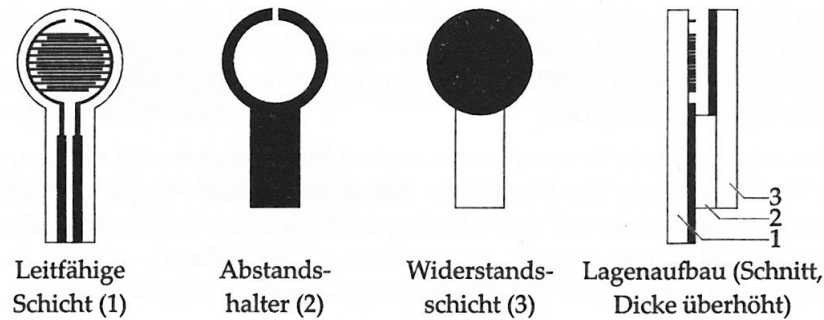


Abbildung 2.2: Schichtaufbau von FSR-Sensoren [Mar04]

Kombination von Kraft und positionsabhängigen Widerständen [Mar04] Ein FPSR (siehe Abb. 2.3) liefert, ähnlich wie beim FSR beschrieben, ein Kraftsignal. *„Entlang der Richtung der Positionsbestimmung wirkt ein Festwiderstand in der Kammstruktur als Spannungsteiler. Zur Erfassung von durch Kontakt hervorgerufenen Beschleunigungen befindet sich über dem FPSR-Sensor zwischen zwei elastischen Schichten ein PVDF-Sensor.“* [Mar04] PVDF ist Polyvinylidenfluorid und ist ein Material, das starke piezoelektrische Effekte zeigt. Durch dieses Material ist der Sensor für dynamische Messaufgaben geeignet (siehe Unterabschnitt 2.1.3).

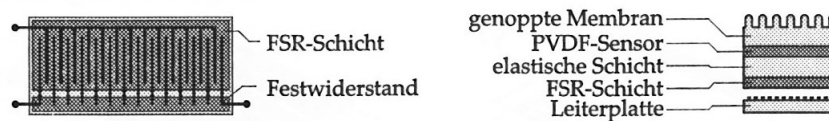


Abbildung 2.3: Aufbau eines linearen FPSR-Sensors [Mar04]

2.1.3 Messung der spannungsbedingten Ladungsänderung an Quarzkristallen (Piezoelektrischer Effekt)

„Unter Piezoelektrizität versteht man die Wechselwirkung zwischen den elektrischen Größen wie Polarisation, elektrischem Feld oder Oberflächenladung mit den mechanischen Größen wie mechanische Spannungen und Dehnungen in Festkörpern.“ [TO98] Der piezoelektrische Effekt kann nur in Kristallen auftreten, die mindestens eine Ebene besitzen, zu derer der Kristallaufbau nicht spiegelsymmetrisch ist. Wird auf einen solchen Kristall eine Kraft F eingeleitet, so verschieben sich die Ladungen der Kristallatome so, dass eine Oberflächenladung gemessen werden kann (siehe Abb. 2.4). Anhand der gemessenen Spannung an der Oberfläche des Kristalls kann auf die darauf wirkende Kraft zurückgeschlossen werden.

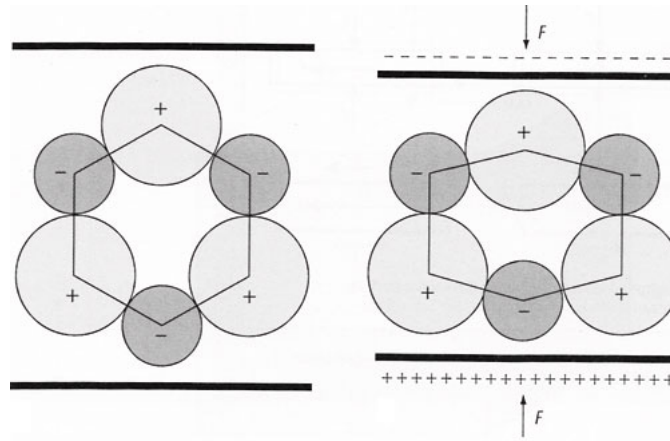


Abbildung 2.4: Piezoelektrischer Effekt [TO98]

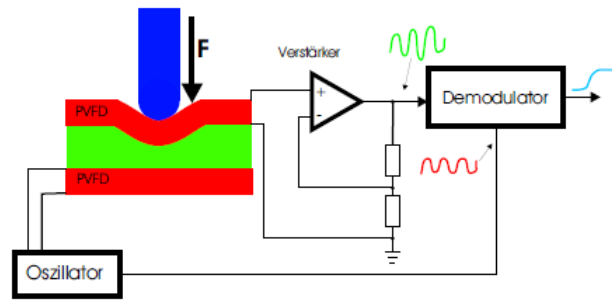
Bei piezoelektrischen Kraftaufnehmern können keine echten statischen Messungen durchgeführt werden, da die elektrische Ladung nicht für beliebig lange Zeit aufrecht gehalten werden kann. Grund dafür sind die endlichen Widerstände der Isolationsmaterialien bzw. die Leckverluste der zur Auswertung verwendeten Ladungsverstärker.[TO98]

2.1.3.1 Taktile Sensoren, die den piezoelektrischen Effekt verwenden

Als Materialien für taktile Sensoren, die auf dem piezoelektrischen Effekt basieren, scheiden aufgrund der steigenden Anforderung nach Verformbarkeit Kristalle wie z.B. Quarz oder Keramiken für die Realisierung aus. Weiters ergibt sich der Nachteil, dass keine statische Messung möglich ist, da nur aus einer Veränderung des Piezoelektrischen Materials, durch Krafteinwirkung, eine messbare Spannung resultiert. [Mel01]

Polymere wie z.B. PVDF (siehe Unterabschnitt 2.1.2.3) sind verformbar und kompensieren den Nachteil der piezoelektrischen Kristalle. In der Abb. 2.5 ist ein aktiver, ultraschallgekoppelter Berührungssensor dargestellt, der aus drei Schichten besteht, wobei die untere PVDF-Schicht durch einen Oszillator in Schwingung versetzt wird. Die mittlere Schicht dient als Transmissionschicht um die Eingangsschwingung an die obere PVDF-Schicht weiterzugeben. Wird nun eine Kraft F in die obere PVDF-Schicht eingeleitet, kann durch vergleichen der Ausgangsschwingung mit der Eingangsschwingung der momentane Druck berechnet werden.²

²Vgl.: http://tams-www.informatik.uni-hamburg.de/lehre/2005ws/vorlesung/angewandte_sensorik/vorlesung_05.4.pdf (28.02.2011)


 Abbildung 2.5: Aktiver, piezoelektrischer, taktile Sensor mit Ultraschallkopplung ²

2.1.4 Messung der spannungsbedingten Permeabilitätsänderung (Magnetoelastischer Effekt) [TO98]

Das Prinzip von magnetoelastischen Kraftaufnehmer beruht auf dem magnetoelastischen Effekt, der die Wechselwirkung zwischen mechanischer Spannung und Dehnung zu den magnetischen Größen, wie Induktion und magnetische Feldstärke in ferromagnetischen Stoffen (Eisen, Kobalt, Nickel) beschreibt. Diese Stoffe bilden im festen Aggregatzustand Weißsche Bezirke. Innerhalb eines Weißschen Bezirks ist das magnetische Moment der Atome gleichgerichtet. Betrachtet man den ferromagnetischen Stoff makroskopisch, so ist keine Magnetisierung zu erkennen, da die Weißschen Bezirke verschieden orientiert sind. Eine äußere mechanische Spannung oder ein äußeres Magnetfeld ändern die Weißschen Bezirke in Betrag und Richtung.

Der magnetoelastische Effekt wird anhand magnetoelastischen 45°-Anisotropiewandler erläutert, da die technische Bedeutung am größten ist. Diese Kraftaufnehmer bestehen aus elektrisch getrennten Blechen, um den Einfluss von Wirbelströme zu verringern. Der in Abb. 2.6 gezeigte Kraftaufnehmer besitzt eine Erregerwicklung w_1 und eine Sekundärwicklung w_2 , in der im unbelasteten Fall (Abb. 2.6 links) keine Spannung induziert wird. Im belasteten Fall (Abb. 2.6 rechts) wird in Abhängigkeit von der Kraft F eine Spannung in die Sekundärwicklung w_2 induziert. D.h. in Abhängigkeit der Kraft F ändert sich die Permeabilität μ (magnetische Leitfähigkeit) durch die Ausrichtung der Weißschen Bezirke, wodurch jede Kraft eine spezifische, induzierte Spannung hervorruft.

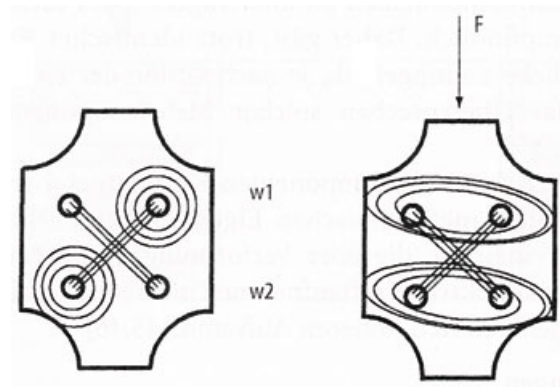


Abbildung 2.6: Magnetoelastischer 45°-Anisotropiewandler [TO98]

2.1.5 Messung der Druckänderung eines Fluids

Kraftaufnehmer, die zur Kraftmessung die Druckänderung eines Fluids in ein elektrisches Signal umsetzen, werden großteils über DMS realisiert. Eine Möglichkeit ist, dass DMS auf einer Membran amplifiziert werden, aus denen sich, je nach eingeleiteter Kraft und der sich daraus ergebende Fluid-Druck, ein bestimmter Widerstandswert einstellt (siehe Abb. 2.7). DMS wurden bereits unter Unterabschnitt 2.1.2.1 näher beschrieben.

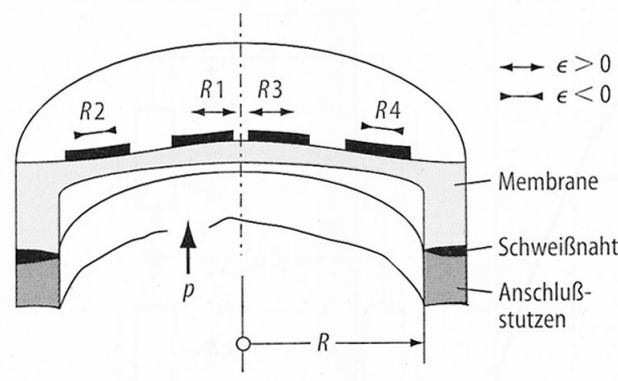


Abbildung 2.7: Einfache Plattenfedermembran zur Druckmessung [TO98]

2.1.6 Messung der Kraft mittels Hall-Effekt[TO98]

„Eine stabförmige Probe der Länge l , der Dicke d und der Breite b befinde sich unter Einfluss eines normal zur Oberfläche orientierten Magnetfeldes. Fließt ein Strom I in Längsrichtung, so tritt zwischen den in Querrichtung angeordneten gegenüberliegenden Elektroden eine Hall-Spannung U_H auf.“ (siehe Abb. 2.8) [TO98]

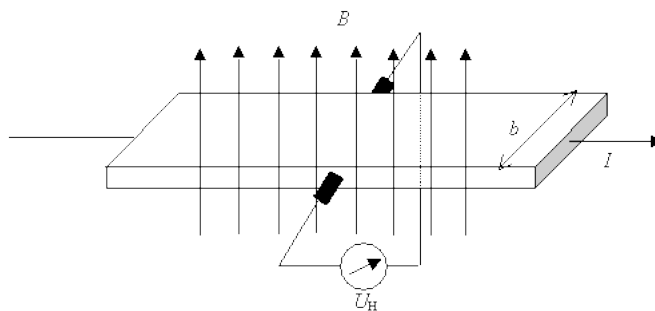


Abbildung 2.8: Halleffekt [TO98]

$$U_H = \frac{R_H}{b} * I * B \quad (2.4)$$

In Abhängigkeit des Ladungsträgertyps ergibt sich für die Hall-Konstante (R_H) bei negativen Ladungsträger:

$$R_{H,n} = -\frac{1}{n * q} \quad (2.5)$$

bei positiven Ladungsträger:

$$R_{H,p} = \frac{1}{p * q} \quad (2.6)$$

Symbol	Beschreibung	Einheit
U_H	Hall-Spannung	[V]
I	Strom	[A]
R_H	Hall-Konstante	[m ³ /C]
B	magnetisches Feld	[T]
d	Materialdicke	[m]
q	Ladung	[C]
n	Konzentration von neg. Ladungsträger	
p	Konzentration von pos. Ladungsträger	

Tabelle 2.2: Variablendefinition für (2.4),(2.5) und (2.6)

2.1.6.1 Verwendung des Hall-Effekts bei taktilen Sensoren

Der Hallsensor wird in Kombination mit elastischen Materialien (z.B. Silikon) und Permanentmagneten zur Kräftemessung verwendet (siehe Abb. 2.9). Durch eine Abstandsänderung zwischen Permanentmagnet und Hallsensor, die durch eine Krafteinwirkung hervorgerufen wird, ergibt sich eine Änderung der magnetischen Flussdichte.[Mar04] Die Auswertung der wirkenden Kraft ergibt sich aus der Änderung der Hall-Spannung U_H .

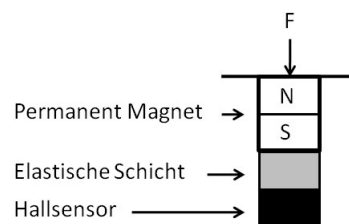


Abbildung 2.9: Schematische Darstellung der Kraftmessung mittels Hallsensor [TO98]

2.1.7 Messung der Kraft mittels Kapazitätsänderung [TO98]

„Kapazitive Drucksensoren nutzen die druckinduzierte Abstandsänderung einer beweglichen Elektrode (z.B. Membran) gegen eine feste Gegenelektrode.“ [TO98] Die Formel 2.7 beschreibt die Abhängigkeit der Kapazität bei Änderung des Elektrodenabstands:

$$C = \frac{\epsilon * A}{d} \quad (2.7)$$

Symbol	Beschreibung	Einheit
C	Kapazität im Startzustand	[C]
d	Elektrodenabstand im Startzustand	[m]
ϵ	Dielektrizitätskonstante	[As/Vm]
A	Querschnittsfläche des Leiters	[m ²]

Tabelle 2.3: Variablendefinition für (2.7)

Verringert sich demnach der Abstand d (z.B. durch einwirken einer Kraft) der Elektroden, so steigt die Kapazität C dazu proportional.

2.1.7.1 Verwendung Kapazitätsänderung bei taktilen Arrays

Basierend auf dem Prinzip von Unterabschnitt 2.1.7 wird unter Abb. 2.10 ein kapazitives Array dargestellt, das aus flachen Elektroden besteht. Diese Elektroden sind übereinander gekreuzt in Zeilen und Spalten angeordnet und durch eine elastische Gummischicht (Dielektrikum) voneinander getrennt. Die Auswertung der resultierenden Signale erfolgt durch eine externe Elektronik.

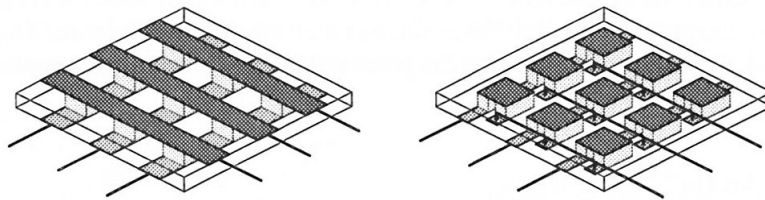


Abbildung 2.10: Schematische Darstellung des kapazitiven Sensorarrays [Mar04]

2.2 Spannungs-optische Kraftmessung

Taktile Sensoren können auch mit der Optik als Messprinzip realisiert werden. Dabei werden zwei Klassen von optischen Messprinzipien unterschieden:

- intrinsisches Messprinzip
- extrinsisches Messprinzip

Die erste Klasse behandelt Messprinzipien, die den optischen Lichtweg nicht beeinflussen. Im Gegensatz zum extrinsischen Messprinzip, wo z.B. die einwirkende Kraft den Lichtweg der Quelle direkt beeinflusst.³

³Vgl.: <http://www.soton.ac.uk/~rmc1/robotics/artactile.htm> (06.03.2011)

2.2.1 Intrinsisches Messprinzip am Beispiel eines taktilen Sensors

In einem flachen Lichtleiterkörper wird seitlich so Licht eingekoppelt, dass es zwischen den beiden Hauptflächen reflektiert wird. Auf der Seite, wo die Kraft einwirkt ist eine lichtundurchlässige strukturierte elastische Schicht. Wirkt eine Kraft auf die Kontaktfläche, so vergrößert sich diese und durch die höhere optische Dichte wird das Licht nun aus dem Lichtleiter ausgekoppelt und durch die berührende Fläche reflektiert. Auf der Unterseite des Sensors wird das Lichtsignal von einem Bildwandler aufgenommen (siehe Abb. 2.11).[Mar04]

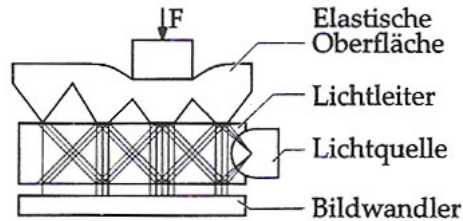


Abbildung 2.11: Planares Array mit Lichtleiter [Mar04]

2.2.2 Extrinsisches Messprinzip am Beispiel eines taktilen Sensors

Wie in Abb. 2.12 dargestellt, wird ein bekanntes Muster auf der Hautinnenseite der mit transparentem Gel gefüllten Fingerkuppe aufgenommen. Aus der Musterveränderung kann durch Bilderkennungsalgorithmen, auf die Kraftverteilung bzw. Veränderung der Kraft auf der Hautoberfläche geschlossen werden. [Mar04]

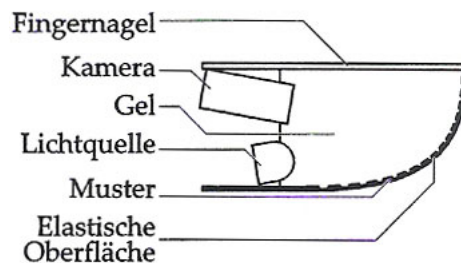


Abbildung 2.12: Fingerkuppe mit transparenter Gelfüllung [Mar04]

2.3 Problem der taktilen Inversion

Oftmals wird für taktile Sensoren in Arrayausführung ein elastisches Material verwendet, das den Sensor vor Beschädigung schützen soll. Beim Einsatz taktiler Sensorarrays bei Greifwerkzeugen wird durch das elastische Material zusätzlich der Reibkoeffizient $\mu \leq 1$ verbessert bzw. erhöht.[LN99]

Durch die beschriebene Ausführung ergibt sich das Problem der taktilen Inversion, das [Mar04] wie folgt definiert ist: „Sie beschreibt den Umstand, dass die Signale hochauflösender Sensorarrays durch eine elastische Fingeroberfläche verfälscht werden und nur auf einen Teil der Objektinformationen zurückgeschlossen werden kann. So wirkt sich ein punktförmiger Kontakt an der

Hautoberfläche durch das elastische Gewebe hindurch auf einen wesentlich größeren Bereich des darunter liegenden Sensorarrays aus, ein Rückschluss auf Objektgeometrie und Kontaktpunkte an der Fingeroberfläche ist nur unter Annahme von Randbedingungen möglich.“ [Lee00] Das elastische Material wirkt als Tiefpass und verhindert die genaue Aufnahme der Objektgeometrie.

Kapitel 3

Verarbeitung von taktilen Sensordaten

Neben der Aufnahme von Messsignalen gilt es auch diese, in Abhängigkeit zur Anwendung und der Aufnahmeumgebung, zu verarbeiten, d.h. Fehler in den Messwerten zu korrigieren, zu filtern und die gemessenen Daten zu interpretieren.

Techniken, die zur Auswertung von Messdaten taktiler Sensoren angewendet werden sind:

- Neuronale Netzwerke
- Fuzzy Logic
- Regelbasierte Systeme
- Modellbasierte Systeme

Als wichtigste Technik hierbei werden künstliche neuronale Netze gesehen, die durch parallele Netze eine Echtzeitverarbeitung der taktilen Daten ermöglicht.

Ein allgemeines Problem der Sensordatenverarbeitung ist das vereinen von Messdaten mehrerer Sensoren bzw. von Messdaten von Sensoren mit unterschiedlicher Sensorcharakteristik. [LN99] Detailliertere Erklärungen zum Thema Verarbeitung der Daten von taktilen Sensoren werden in dieser Arbeit nicht angeführt.

Kapitel 4

Stand der Technik

4.1 Sensortechnologie

Seit dem Beginn der Entwicklungen von taktilen Sensoren um 1970 wurden einige sensorische Ansätze verwendet, die unter Kapitel 2 aufgelistet sind. Aus der Recherche über den Stand der Technik von taktilen Sensoren konnte keine Aussage abgeleitet werden, welcher grundlegende sensorische Ansatz bei der Realisierung von taktilen Sensoren am häufigsten und welcher weniger häufig angewendet werden.

4.2 Materialien

Aktuelle Entwicklungen von Sensoren zeigen den Trend zu flexiblen und leichten Materialien, wie sie durch Silikon- oder Polymermaterialien realisiert werden können. Weiters zeigen Systeme, mit änderbaren Materialeigenschaften neue Wege, die komplexe Reibkraftsteuerung, wie sie bei Menschenhände passiert, zu realisieren. [Lee00]

4.3 Anwendungsbereiche

Nachfolgend werden Anwendungsbereiche und Beispiele taktiler Sensoren aufgelistet, wobei diese nicht auf Robotergreifer eingeschränkt werden:

- Industrie (Greifer, Sicherheitssysteme)
- Robotik (z.B. Care-O-Bot II Serviceroboter des Fraunhofer-Instituts)
- Medizin (medizinische Gerätschaften z.B. für minimal invasive Eingriffe)
- Landwirtschaft & Lebensmittelindustrie (Handhabung von Früchten, ...) [Lee00]
- Ergonomieanalyse (3D-Fußanalyse) ¹

¹Vgl.: http://www.pressureprofile.com/UserFiles/File/PPS%20_RoboTouch_SpecSheet.pdf (28.02.2011)

- Allgemeine Messaufgaben (z.B. Druckverteilung bei Scheibenwischerblätter) ²

Zusammenfassend beschrieben ist der Anwendungsbereich von taktilen Sensoren weit verbreitet und wird bei großflächigen Messaufgaben immer vermehrter eingesetzt (siehe Auflistung).

²Vgl.: http://www.pressureprofile.com/UserFiles/File/PPS%20_RoboTouch_SpecSheet.pdf (28.02.2011)

Kapitel 5

Taktile Sensoren für Roboter Greifer

Der Einsatzbereich von taktilen Sensoren reicht vom Medizinbereich bis hin zur Anwendung in der Industrie, der als Haupteinsatzbereich in den Anfängen der taktilen Sensorik gehandelt wurde [LN99].

Nachfolgend werden zwei ausgewählte, taktile Sensoren kurz beschrieben:

- *Sensorsystem WRT 101* von Weiss Robotics GmbH & Co. KG ¹

Dieses Sensorsystem wird für die SDH-2 Hand von Schunk verwendet, die wiederum als Greifeinheit für den Care-O-Bot II des Fraunhofer IPA Instituts eingesetzt wird.

WRT 101 besteht aus zwei verschiedenen taktilen Aufnehmern, nämlich dem *DS 9205* (Proximalglied mit 84 taxels) und *DS 9210* (gekrümmte Fingerkuppe mit 86 taxels).

Die beiden taktilen Aufnehmer basieren auf einem resistiven Messprinzip (Grundlagen siehe Unterabschnitt 2.1.2), wobei die Messfühler einseitig auf einem Polymer aufgebracht sind.



Abbildung 5.1: Sensorsystem WRT 1010 von Weiss Robotics GmbH & Co. KG (DS905 links, DS9210 rechts)

- *Robo Touch* von PPS Inc. ²

Dieses Produkt von PPS Inc. ist für den Einsatz an Roboter Greifer entwickelt und verwendet das kapazitive Messprinzip (Grundlagen siehe Unterabschnitt 2.1.7). Das *Robo Touch basic kit* besteht aus 7 Sensoren mit jeweils 22-24 Sensorelementen, einer API und einer Visualisierungssoftware (siehe Abb. 5.2).

¹Vgl.: <http://www.weiss-robotics.de/de/component/content/article/76-sensorsystem-wrt-101.html> (28.02.2011)

²Vgl.: http://www.pressureprofile.com/UserFiles/File/PPS%20_RoboTouch_SpecSheet.pdf (28.02.2011)

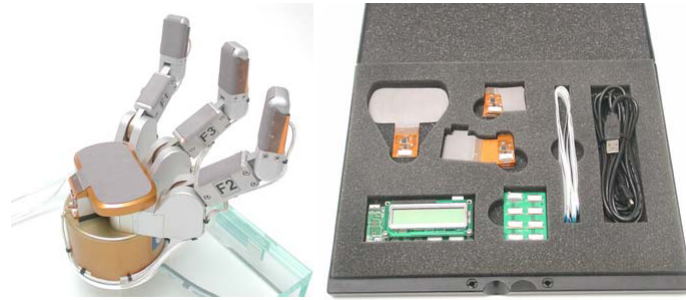


Abbildung 5.2: Robo Touch von PPS Inc.

Beide Systeme haben ihren Anwendungsbereich, lt. Website- bzw. Telefonrecherche bei der Fa. Schunk, noch in der Forschung.

Kapitel 6

Implementierung eines taktilen Sensors

Das Thema des aktuellen fächerübergreifenden Projekts ist die Realisierung eines intelligenten Greifers für die Rescue-League des Robocups. Es soll ein taktiler Sensor zur Detektion der Objektposition beim Greifvorgang bzw. zur Rutscherkennung bei bereits aufgenommenen Objekten implementiert werden. Folgend werden die Implementierungsüberlegungen für einen taktilen Sensor erläutert.

6.1 Ursprüngliche Implementierungsvariante

Basierend auf einen Zwei-Finger-Winkelgreifer (siehe Abb. 6.1), ohne der Möglichkeit des flexiblen greifens, ergab sich der Einsatz von jeweils zwei FSR-Kraftsensoren und einem Membran-Potentiometer für die Positionserkennung je Finger. Dabei wurde die Befestigung der Sensoren so geplant, dass der Membran-Potentiometer auf die FSR-Kraftsensoren angebracht wird, damit ein eindeutiger Positionswert und die Kraftverteilung im Bereich der angebrachten Sensoren ausgewertet werden kann. Ein Membran-Potentiometer ist ein Sensor, der je nach Position der einwirkenden Kraft einen Widerstandswert ausgibt, der mit der Position der einwirkenden Kraft am Sensor korrespondiert.

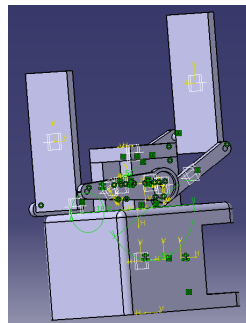


Abbildung 6.1: Zwei-Finger-Winkelgreifer

Durch Verwendung des Fin-Ray-Effekts an den Fingern, für ein flexibles Greifen, musste die angeführte Implementierungsvariante verworfen werden. Zum einen könnte bei flexiblen Fingern

die Position schwer oder gar nicht ermittelt werden, da das Greifobjekt in den meisten Fällen auf der gesamten Sensorfläche aufliegen würde und somit Fehlerwerte die Folge wären. Zum anderen sind die geplanten Sensoren nicht für flexiblen Untergrund einsetzbar, da bei Krümmungen des Fingers ohne Objektkontakt auf der Sensorfläche trotzdem Sensorsignale generiert werden.

Der Fin-Ray-Effekt ist ein bionischer Effekt, der bei den Schwanzflossen von Fischen entdeckt wurde. Wirkt eine Kraft in Form eines Objekts auf einen z.B. Greiferfinger, der nach dem Fin-Ray-Prinzip aufgebaut ist, so entsteht eine Gegenkraft, die den Greiferfinger an das Objekt anschmiegt. D.h. es entsteht eine formschlüssige Verbindung zwischen Greiferfinger und Greifobjekt.

6.2 Aktuelle Implementierungsvariante

Weitere Überlegungen für die Implementierung des taktilen Sensors am intelligenten Zwei-Finger-Winkelgreifer werden, unter anderem Inhalt einer weiteren Arbeit.

Kapitel 7

Ausblick

Durch die Anforderung die Intelligenz von mechatronischen Systemen zu erhöhen, werden sich in der Zukunft weitere Einsatzbereiche für taktile Sensoren erschließen. Diese Einsatzbereiche sind, wie unter Abschnitt 4.3 gezeigt, bereits jetzt sehr unterschiedlich, was sich folglich auf weitere Ansätze in der Entwicklung und Implementierung von taktilen Sensoren auswirken wird. Nicht zuletzt durch Neuentwicklungen im Bereich der Nanotechnik könnten sich drastische Verbesserungen im Bezug auf Größe, Auflösung der Sensordaten, usw. ergeben.

Die Zukunft bauen, heißt die Gegenwart bauen. Es heißt, ein Verlangen erzeugen, das dem Heute gilt.

Antoine de Saint-Exupéry (1900 - 1944), französischer Pilot und Schriftsteller

Literaturverzeichnis

- [KMM⁺09] KERN, Dr.-Ing. Thorsten A. ; MATYSEK, Marc ; MECKEL, Oliver ; RAUSCH, Jacqueline ; RETTIG, Alexander ; RÖSE, Andreas ; SINDLINGER, Stephanie: *Entwicklung haptischer Geräte*. Springer-Verlag, 2009
- [Lee00] LEE, Mark H.: *Tactile Sensing: New Directions, New Challenges* / University of Wales. 2000. – Forschungsbericht
- [LN99] LEE, M.H. ; NICHOLLS, M.R.: *Tactile sensing for mechatronics - a state of the art survey* / Department of Computer Science, University of Wals; Industrial Research Limited, Christchurch. 1999. – Forschungsbericht
- [Mar04] MARTIN, Jan C.: *Ein Beitrag zur Integration von Sensoren in eine anthropomorphe künstliche Hand mit flexiblen Fluidaktoren*. Universitätsverlag Karlsruhe, 2004
- [Mel01] MELCHIORRI, Claudio: *Tactile Sensing for Robotic Manipulation*. Springer-Verlag, 2001
- [Par10] PARTHIER, Rainer: *Messtechnik*. Vieweg + Teubner, 2010
- [TO98] TRÄNKLER, Hans-Rolf ; OBERMEIER, Ernst: *Sensortechnik*. Springer-Verlag, 1998
- [VZ06] VÖLKLEIN, Friedmann ; ZETTERER, Thomas: *Mikrosystemtechnik*. Vieweg, 2006